



TUGAS AKHIR - TF181801

RANCANG BANGUN SISTEM PENGENDALIAN KECEPATAN PADA MOTOR AC MENGGUNAKAN METODE *FIELD-ORIENTED CONTROL* DENGAN VARIASI DAYA MOTOR

Effran Rajagukguk
NRP. 0231 15 40000 043

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc
Murry Raditya, ST,MT.

PROGRAM STUDI S1 TEKNIK FISIKA
DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2019



TUGAS AKHIR - TF181801

**RANCANG BANGUN SISTEM
PENGENDALIAN KECEPATAN PADA MOTOR
AC MENGGUNAKAN METODE *FIELD-
ORIENTED CONTROL* DENGAN VARIASI
DAYA MOTOR**

**Effran Rajagukguk
NRP. 0231 15 40000 043**

Dosen Pembimbing

**Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc
NIP. 19620822 198803 1 001**

**Murry Raditya, ST, MT.
NIP. 19882017111055**

**PROGRAM STUDI S1 TEKNIK FISIKA
DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
2019**



FINAL PROJECT – TF181801

***DESIGN OF SPEED CONTROL SYSTEM
BASED ON FIELD-ORIENTED CONTROL
FOR AC MOTOR WITH POWER VARIATION***

Effran Rajagukguk
NRP. 0231 15 40000 043

Advisor Lecturer

Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc
NIP. 19620822 198803 1 001

Murry Raditya, ST, MT.
NIP. 1988201711055

STUDY PROGRAM OF BACHELOR ENGINEERING PHYSICS
DEPARTEMENT OF ENGINEERING PHYSICS
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2019

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Efran Rajagukguk
NRP : 0231154000043
Departemen/ Prodi : Teknik Fisika/ S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "Rancang Bangun Sistem Pengendalian Kecepatan Pada Motor AC Menggunakan Metode Field-Oriented Control Dengan Variasi Daya Motor" adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Surabaya, 25 Juni 2019

Yang membuat
pernyataan,



A handwritten signature in black ink, appearing to be "Efran".

Efran Rajagukguk
NRP. 0231154000043

LEMBAR PENGESAHAN I

RANCANG BANGUN SISTEM PENGENDALIAN KECEPATAN PADA MOTOR AC MENGUNAKAN METODE *FIELD-ORIENTED CONTROL* DENGAN VARIASI DAYA MOTOR

TUGAS AKHIR
Oleh

Effran Rajagukguk
NRP. 0231 15 40000 043

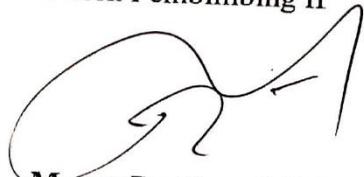
Surabaya, 18 Juni 2019
Mengetahui / Menyetujui

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II



Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc
NIP. 19840101 201212 1 002



Murry Raditya, S.T, M.T
NIP. 1988201711055



Kapala Departemen
Teknik Fisika ITS

Agus Muhammad Hatta, S.T, M.Si, Ph.D
NIP. 19780902 200312 1 002

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN II

RANCANG BANGUN SISTEM PENGENDALIAN KECEPATAN PADA MOTOR AC MENGUNAKAN METODE *FIELD-ORIENTED CONTROL* DENGAN VARIASI DAYA MOTOR

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

EFFRAN RAJAGUKGUK

NRP. 0231154000043

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito M.Sc.  (Pembimbing I)
2. Murry Raditya, S.T, M.T.  (Pembimbing II)
3. Hendra Cordova, S.T, M.T.  (Penguji I)
4. Ir. Matradji, M.Kom  (Penguji II)

SURABAYA

JULI 2019

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**RANCANG BANGUN SISTEM PENGENDALIAN
KECEPATAN PADA MOTOR AC MENGGUNAKAN
METODE FIELD-ORIENTED CONTROL DENGAN
VARIASI DAYA MOTOR**

Nama : Effran Rajagukguk
NRP : 0231154000043
Departemen : S1 Teknik Fisika, FTI - ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc
Murry Raditya, ST, MT.

Abstrak

Motor listrik AC telah banyak diaplikasikan dalam dunia industri. Penggunaan motor AC menjadi pilihan utama dikarenakan kemampuan torsi yang besar, kecepatan yang dapat diatur dan kemudahan dalam instalasi dan perawatan. Metode kontrol motor AC terbaru yang dikembangkan menggunakan metode vektor, yaitu field-oriented control. Metode kontrol FOC bekerja dengan cara memisahkan dua variable fisis motor yaitu flux magnet stator dan torsi rotor pada domain masing – masing. Pada tugas akhir ini dilakukan simulasi dan rancang bangun sistem pengendalian kecepatan motor dengan metode FOC. Motor AC yang digunakan adalah permanent magnet synchronous motor. Hasil dari simulasi menunjukkan setpoint 1000, 2000, 3000 dan 4000 memiliki rise time secara berturut-turut sebesar 0.35 detik, 0.75 detik, 1 detik dan 1.5 detik. Overshoot dari setiap variasi setpoint memiliki nilai +0.7% dari setpoint. Sedangkan untuk rancang bangun, respon rise time yang didapatkan untuk setpoint 1000, 2000, 3000 dan 4000 secara berturut - turut adalah 0.977 detik, 2.0007 detik, 2.137 detik dan 4.067 detik. Nilai overshoot tertinggi berada sebesar +2.4% dari setpoint.

Kata Kunci: Field-oriented control, Motor AC, Sistem Pengendali Kecepatan

**DESIGN OF SPEED CONTROL SYSTEM IN AC MOTOR
USING FIELD-ORIENTED CONTROL METHOD WITH
VARIATION OF MOTOR POWER**

Name : Effran Rajagukguk
NRP : 0231154000043
Departement : Bachelor Engineering Physics, FTI -
ITS
Advisors : Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc
Murry Raditya, ST, MT.

Abstract

AC electric motors have been widely applied in the industrial world. The application of AC motor became the main choice due to its large torque capability, adjustable speed and ease of installation and maintenance. The latest AC motor control method developed using vector methods, namely field-oriented control. The FOC control method works by separating two motor physical variables, namely the stator magnetic flux and rotor torque in each domain. In this final project a simulation and experimental of a motor speed control system using the FOC method is carried out. The AC motor used is permanent magnet synchronous motor. The results of the simulation show setpoints of 1000, 2000, 3000 and 4000 RRPM having a rise time of 0.35 seconds, 0.75 seconds, 1 second and 1.5 seconds respectively. The overshoot of each setpoint variation has a value of + 0.7% from the setpoint. Meanwhile for experimental result, the rise time response obtained for 1000, 2000, 3000 and 4000 setpoints is 0.977 seconds, 2,0007 seconds, 2,137 seconds and 4,067 seconds, respectively. The highest overshoot value is + 2.4% from the setpoint

Keywords : *Field-oriented control, AC Motor, Speed Control System*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yesus Kristus atas limpahan kasih karunia dan damai sejahtera sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **“Rancang Bangun Sistem Pengendalian Kecepatan Pada Motor AC Menggunakan Metode Field-Oriented Control Dengan Variasi Daya Motor”**. Penulis telah banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Dr. Ir. Agus Muhammad Hatta, ST, M.Si, Ph.D selaku Kepala Departemen Teknik Fisika ITS.
2. Bapak Dr. Ir. Syamsul Arifin M.T. selaku dosen wali penulis yang telah sabar memberikan dukungan, bimbingan, serta ilmu yang sangat bermanfaat.
3. Bapak Dr. Ir Purwadi Agus Darwito, M.Sc dan Bapak Murry Raditya, ST, M.T. selaku dosen pembimbing yang senantiasa memberikan motivasi, bimbingan dan arahan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Bapak dan Ibu Dosen, Tenaga Pendidik dan Seluruh Staf Teknik Fisika yang telah memberikan ilmu selama kuliah.
5. Orang Tua dan Seluruh Keluarga besar op. Abbas Rajagukguk yang memberikan dukungan moral maupun material dan senantiasa memberikan dukungan, semangat dan doa kepada penulis.
6. Tim Penelitian Teknik Fisika dan Teknik Instrumentasi ITS (C272) Mbak Hal, Galuh, Awe, Dana, Dino Wildan
7. Tim Riset Sosiopolitik Icarus Gideon, Godwin, Matius Josafat dan Mas Berto
8. Teman-teman Angkatan TF15-ITS (Transcedent Frontier)
9. Dan pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu-persatu oleh penulis.

Penulis menyadari bahwa penulisan laporan Tugas Akhir ini tidaklah sempurna. Oleh karena itu sangat diharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak sehingga

mencapai sesuatu yang lebih baik lagi. Penulis juga berharap semoga laporan ini dapat menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembacanya.

Surabaya, 18 Juni 2019

Effran Rajagukguk

DAFTAR ISI

Halaman Judul.....	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME	iii
LEMBAR PENGESAHAN I	v
LEMBAR PENGESAHAN II.....	vii
Abstrak	ix
<i>Abstract</i>	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR	xviii
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Tujuan	3
1.4. Batasan Masalah.....	3
BAB II DASAR TEORI.....	5
2.1 Motor AC	5
2.1.1. Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM)	6
2.2 Field-Oriented Control	10
2.2.1 Vektor Ruang	12
2.2.2 Transformasi Clarke	13
2.2.3 Transformasi Park	14
2.3 Inverter	15
2.4 Pulse Width Modulation.....	17
2.4.1 Prinsip Dasar PWM.....	18
2.4.2 Space Vector PWM.....	19
2.5 Eval Board M1-1302.....	22
2.6 Eval Board M1-36-45A.....	23
2.7 Microcontroller dan Digital Signal Processing	25
2.8 μ C-Probe	26
BAB III METODOLOGI.....	30
3.1. Deskripsi Masalah.....	30

3.2.	Perancangan Simulasi.....	32
3.2.1	Deklarasi Model Permanent Magnet Synchronous Motor	35
3.2.2	Deklarasi Algoritma Field-Oriented Control	36
3.2.3	Deklarasi inverter tiga fasa dan diode rectifier	38
3.2.4	Deklarasi Speed Controller.....	40
3.2.5	Deklarasi Braking Chooper	41
3.2.6	Integrasi sistem pengendalian kecepatan motor PMSM dengan algoritma FOC	42
3.2.7	Pemasangan block input dan output pada sistem pengendalian kecepatan motor PMSM.....	43
3.3	Desain Rancang Bangun Field-Oriented Control ..	46
3.3.1	Setup Rancang Bangun.....	46
3.3.2	Deklarasi Fungsi PMSM_FOC.....	49
3.3.3	Mengatur Algoritma FOC	50
3.3.4	Memasukkan Nilai Parameter.....	50
3.3.5	Mengatur PIN Allocator	52
3.3.6	Atur Library Path.....	54
3.3.7	Deklarasi Timer dan Interrupt	55
3.3.8	Membuat Indikator Numerik, Chart dan Data Logger	56
3.4	Pengujian dan Pengambilan Data	58
3.5	Penulisan Laporan Akhir	60
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN		61
4.1	Analisa Data	61
4.1.1	Hasil Simulasi.....	61
4.1.2	Hasil Pengujian Rancang Bangun	66
4.2	Pembahasan	69
BAB V PENUTUP		71
5.1	Kesimpulan.....	71
DAFTAR PUSTAKA.....		73
LAMPIRAN		76

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Klasifikasi Motor AC	5
Gambar 2.2 Cara Kerja Motor PMSM	8
Gambar 2.3 Skematik Motor DC Eksitasi	11
Gambar 2.4 Skematik Field-Oriented Control.....	12
Gambar 2.5 Vektor Ruang Arus Tiga Fasa	13
Gambar 2.6 Arus Stator dalam Bidang Stationary	14
Gambar 2.7 Rangkaian Inverter Jembatan Tiga Fasa.....	17
Gambar 2.8 Bentuk Gelombang Kotak dengan kondisi High dan Low	18
Gambar 2.9 Sinyal PWM pada variasi duty cycle.....	20
Gambar 2.10 Vektor Ruang Switching Inverter	20
Gambar 2.11 Rangkaian Eval Board M1-1302	23
Gambar 2.12 Eval Board M1-36-45A.	24
Gambar 2.13 Cara Kerja μ C-Probe.	28
Gambar 2.14 Toolbox Chart.....	28
Gambar 2.15 Toolbox Data Logging.....	29
Gambar 3.1 Flowchart Kegiatan.....	31
Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian Tahap Simulasi	33
Gambar 3.3 Block Diagram Sistem Pengendalian Motor PMSM	34
Gambar 3.4 Block motor induksi FOC.....	34
Gambar 3.5 Block Simscape Permanent Magnet Synchronous Machine	36
Gambar 3.6 Block FOC.....	37
Gambar 3.7 Block Fungsi Rectifier	39
Gambar 3.8 Block Inverter	40
Gambar 3.9 Block Speed Controller.....	41
Gambar 3.10 Block Chopper	42
Gambar 3.11 Simulink Field-Oriented Control	44

Gambar 3.12 Simulink Sistem Pengendalian Kecepatan FOC	45
Gambar 3.13 Diagram Alir Penelitian Rancang Bangun	47
Gambar 3.14 Set-up Power Board dan XMC1300.....	48
Gambar 3.15 PMSM_FOC pada Apps Dependency Tree ...	49
Gambar 3.16 Control Algorithm Configuration.....	50
Gambar 3.17 Parameter Kontrol	51
Gambar 3.18 Parameter Motor.....	51
Gambar 3.19 Konfigurasi Kecepatan	52
Gambar 3.20 Konfigurasi Power Board	52
Gambar 3.21 Konfigurasi PIN pada PIN Allocator	54
Gambar 3.22 Library Path PMSM_FOC_0.....	55
Gambar 3.23 HW Signal Connection pada TIMER_0.....	56
Gambar 3.24 Apps Dependency Tree	56
Gambar 3.25 Worksheet Indicator uC-Probe	57

Gambar 4.1 Respon Kecepatan Setpoint 1000 RPM Tanpa Beban.....	62
Gambar 4.2 Respon Kecepatan Setpoint 2000 RPM Tanpa Beban.....	62
Gambar 4.3 Respon Kecepatan Setpoint 3000 RPM Tanpa Beban.....	63
Gambar 4.4 Respon Kecepatan Setpoint 4000 RPM Tanpa Beban.....	63
Gambar 4.5 Respon Kecepatan Setpoint 1000 RPM Beban 2N	64
Gambar 4.6 Respon Kecepatan Setpoint 2000 RPM Beban 2N	64
Gambar 4.7 Respon Kecepatan Setpoint 3000 RPM Beban 2N	64
Gambar 4.8 Respon Kecepatan Setpoint 4000 RPM Beban 2N	65
Gambar 4.9 Respon Kecepatan Setpoint 1000 RPM Beban 4N	65

Gambar 4.10 Respon Kecepatan Setpoint 2000 RPM Beban 4N	66
Gambar 4.11 Respon Kecepatan Setpoint 3000 RPM Beban 4N	66
Gambar 4.12 Respon Kecepatan Setpoint 4000 RPM Beban 4N	66
Gambar 4.13 Respon Rancang Bangun Setpoint 1000 RPM Tanpa Beban	67
Gambar 4.14 Respon Rancang Bangun Setpoint 2000 RPM Tanpa Beban	68
Gambar 4.15 Respon Rancang Bangun Setpoint 3000 RPM Tanpa Beban	68
Gambar 4.16 Respon Rancang Bangun Setpoint 4000 RPM Tanpa Beban	69

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Konfigurasi Switching Inverter Tiga Fasa	21
Tabel 2.2. Kombinasi Switching domain $\alpha\beta$	21
Tabel 2.3 Perbandingan DSP dan Mikrokontroler	27
Tabel 3.1. Parameter Motor.....	36
Tabel 3.2 Konfigurasi PIN Allocator	53
Tabel 3.3 Konfigurasi symbol pointer uC-Probe	57
Tabel 3.4 Variasi Pengujian Simulasi dan Rancang Bangun	58

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Motor listrik AC telah banyak diaplikasikan dalam dunia industri. Penggunaan motor AC menjadi pilihan utama dikarenakan kemampuan torsi yang besar, kecepatan yang dapat diatur dan kemudahan dalam instalasi dan perawatan. Dalam industri, kinerja motor bersifat kompleks dikarenakan kerja motor bergantung dari proses yang sedang dikerjakan. Sehingga diperlukan sebuah metode kontrol untuk mengatur motor pada berbagai kebutuhan. Metode kontrol motor AC yang sudah banyak digunakan adalah metode skalar.

Metode skalar menggunakan besaran tegangan dan frekuensi dalam mengatur perputaran motor. Metode scalar yang diaplikasikan pada industri adalah kontrol V/f. Kontrol V/f telah menghasilkan sistem motor AC yang dapat bekerja dengan baik pada *steady state* . Tetapi kelemahan metode kontrol V/f yaitu respon transient sistem masih belum bisa dicapai dengan baik [1]–[3]. Hal ini dikarenakan pengendalian motor masih bergantung pada magnitudo nilai tegangan dan frekuensi. Pengaruh dari pengendalian magnitudo kedua besaran ini adalah flux magnet pada bagian *air gap* tidak dapat dikendalikan. Efek lebih lanjut flux magnet ini akan mengurangi arus yang mengalir pada bagian stator sehingga impedansi stator akan terus berkurang. Sehingga pada kondisi impedansi sangat kecil, tegangan akan menjadi sangat besar dan akan menyebabkan stator terbakar [4].

Metode kontrol motor AC baru telah dikembangkan menggunakan metode vektor. Metode vektor menganalisis dan mengendalikan motor AC dalam domain besar dan arah besaran fisis arus. Salah satu metode kontrol vektor motor AC adalah Field Oriented Control (FOC). Metode kontrol FOC bekerja dengan cara memisahkan dua variable fisis motor

yaitu flux magnet stator dan torsi rotor pada domain masing – masing . Pemisahan ini bertujuan untuk dapat mengendalikan dua besaran secara terpisah. Hasil pengujian yang didapatkan adalah respon transient motor AC dapat mencapai nilai yang memuaskan baik dari nilai overshoot maupun rise time .

Pada penelitian sebelumnya, Zineb Mekrini, 2016 [5] telah melakukan simulasi FOC pada motor AC tipe induksi. Hasil yang didapatkan berupa karakteristik kecepatan putar, torsi dan arus stator dengan respon transient . Penelitian lain telah dilakukan oleh Faisal Amin, 2017 menggunakan permanent magnet synchronous motor (PMSM) [6]. Penelitian ini menggunakan metode simulasi untuk melihat respon dari system jika kecepatan dan torsi divariasikan menggunakan metode FOC. Hasil dari penelitian ini menunjukkan sistem dapat bekerja stabil terhadap variasi yang dilakukan. Respon kecepatan putar motor sudah konstan meskipun pembebanan berubah dalam rentang waktu tertentu. Kedua penelitian ini menunjukkan bahwa pada simulasi menggunakan metode *field-oriented control* pada motor AC sudah mencapai setpoint yang diinginkan oleh peneliti.

Aplikasi dari metode *field-oriented control* tidak hanya pada industri saja. Penelitian yang sedang berkembang saat ini mengarah biologi dan aerospace. Pada bidang biologi, field oriented control digunakan sebagai metode kontrol untuk pembuatan pompa darah mekanik [7]. Kemampuannya yang baik dilihat dari respon transient dan steady selama ini bisa diimplementasikan. Selain itu, bidang aerospace, motor yang digunakan satelit juga sedang dilakukan penelitian untuk pengimplementasian field-oriented control [8]. Implementasi field-oriented control juga sudah merambah pada kamera dan UAV. UAV (unmanned aerial vehicle) [9] dan kamera PTZ [10] memiliki karakteristik kerja yang sangat presisi. Sehingga, metode kontrol ini tepat untuk diimplementasikan.

Oleh karena itu, tugas akhir ini membuat sebuah rancang bangun *field-oriented control* pada motor AC

dengan memvariasikan daya motor. Variasi daya motor merupakan variable penting karena pada industri kemampuan motor ditentukan oleh daya motor. Pada penelitian sebelumnya pun belum ditemukan penelitian yang menganalisis pengaruh perbedaan daya motor terhadap respon kinerja motor AC.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka rumusan masalah dalam Tugas Akhir ini adalah :

1. Bagaimana mereduksi atau menghilangkan chattering yang dihasilkan saat proses pengendalian?
2. Bagaimana rancang bangun sistem pengendalian kecepatan motor AC dengan metode Field-oriented Control?
3. Bagaimana pengaruh variasi daya motor AC terhadap performansi sistem pengendalian kecepatan motor?

1.3. Tujuan

Tujuan utama dari rancang bangun alat ini adalah untuk memenuhi mata kuliah Tugas Akhir sebagai syarat kelulusan dari program studi S1 Teknik Fisika serta untuk memberikan solusi pada rumusan masalah yaitu :

1. Merancang sistem pengendalian yang dapat mereduksi atau menghilangkan chattering selama proses pengendalian
2. Membuat rancang bangun sistem pengendalian kecepatan motor AC dengan metode Field-oriented Control
3. Mengetahui pengaruh variasi daya motor AC terhadap performansi driver motor Field-Oriented Control

1.4. Batasan Masalah

Perlu diberikan beberapa Batasan masalah agar pembahasan tidak meluas dan menyimpang dari tujuan.

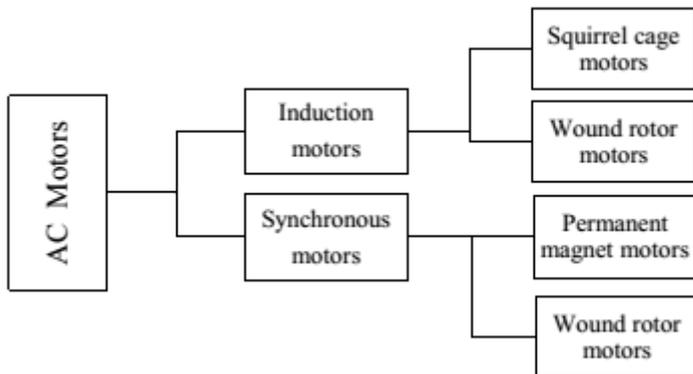
Adapun Batasan masalah dari sistem yang dirancang ini adalah sebagai berikut :

1. Objek penelitian motor berjenis motor *permanent magnet synchronous motor* 3 fasa
2. Analisis dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan pengujian rancang bangun
3. Variasi daya motor AC menggunakan beban massa 2 N; 4 N

BAB II DASAR TEORI

2.1 Motor AC

Motor AC merupakan mesin listrik yang mengubah energi listrik AC menjadi energi mekanik. Mengingat perbedaan pada prinsip operasional, karakteristik fisik dan daya motor, terdapat berbagai macam variasi motor AC. Menurut prinsip operasinya, motor AC diklasifikasikan dua utama kategori: induksi dan sinkron. Setiap jenis motor masih dibagi menjadi dua kategori, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Klasifikasi Motor AC

Motor induksi dikategorikan menjadi dua jenis, yaitu squirrel cage dan wound rotor [9]. Motor sinkron juga dikategorikan mejadi dua yaitu permanent magnet dan wound rotor. Sejak ditemukannya prinsip kerja motor listrik oleh Michael Faraday pada 1821, pengembangan kontrol motor menjadi sangat pesat. Dunia berubah secara dramatis sejak motor induksi pertama dipatenkan oleh

Nikola Tesla pada 1888. Motor induksi telah banyak digunakan hampir disemua industri karena harganya yang terjangkau dan keandalan sistem yang baik. Meskipun begitu, motor sinkron juga merupakan motor yang menarik untuk diimplementasikan. Salah satu aplikasi dari motor sinkron adalah motor servo. Motor servo dapat dijalankan pada torsi tinggi dan rendah serta range kecepatan yang lebar. Pada tugas akhir ini, motor AC yang dibahas adalah motor sinkron atau *permanent magnet synchronous motor*.

2.1.1. Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM)

Synchronous motor adalah motor AC tiga-fasa yang dijalankan pada kecepatan sinkron, tanpa slip. Motor sinkron merupakan motor arus bolak-balik (AC) yang penggunaannya tidak seluas motor asinkron. Secara umum penggunaan motor sinkron difungsikan sebagai generator, akan tetapi motor sinkron tetap digunakan oleh industri yang membutuhkan ketelitian putaran dan putaran konstan.

Sebuah motor sinkron selalu beroperasi pada kecepatan konstan, pada kondisi tidak berbeban. Tetapi apabila motor diberi beban, maka motor akan selalu akan berusaha untuk tetap pada putaran konstan. Dan motor akan melepaskan kondisi sinkronnya apabila beban yang ditanggung terlalau besar (Torsi Pull-out) [11]. Motor sinkron memiliki kekurangan didalam melakukan start dengan sendirinya. Karena tidak memiliki torsi start awal, oleh karena itu motor sinkron memerlukan beberapa alat bantu untuk membantu didalam start awal sehingga masuk didalam kondisi sinkron.

Pada sebuah induksi motor, rotor harus memiliki slip. Kecepatan rotor harus kurang atau terlambat dari perputaran fluks stator supaya arus diinduksikan ke rotor. Jika induksi rotor motor tersebut itu bertujuan untuk mencapai kecepatan sinkron, maka tidak ada garis gaya yang memotong melalui rotor, sehingga tidak ada arus yang akan diinduksikan ke rotor dan tidak ada torsi yang akan dikembangkan.

Synchronous motor memiliki karakteristik sebagai berikut:

- Sebuah stator tiga fasa sama dengan motor induksi. Stator yang memiliki tegangan menengah sering digunakan.
- Sebuah rotor yang bersinggungan (bidang yang berputar) yang memiliki jumlah kutub yang sama sebagai statornya, dan dipasok oleh sumber eksternal arus DC. Tipe brush dan brushless exciters digunakan untuk memasok medan arus DC ke rotor. Arus pada rotor membentuk suatu hubungan kutub magnetik Utara-Selatan pada kutub-kutub rotor, yang memungkinkan rotor untuk “mengunci” dengan fluks stator yang berputar.
- Dimulai sebagai sebuah motor induksi. Rotor synchronous motor juga mempunyai sebuah squirrel-cage winding yang dikenal sebagai Amortisseur winding, yang berfungsi menghasilkan torsi untuk menyalakan motor.
- Synchronous motorakan dijalankan pada kecepatan sinkron sesuai dengan rumus:

$$n_s = \frac{120 \times f}{p} \text{ (rpm)} \dots \dots \dots (1)$$

Dimana,

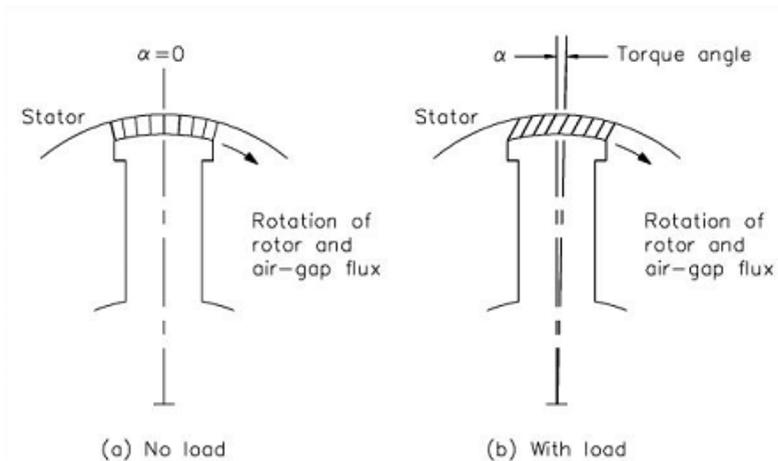
n_s = kecepatan sinkron (rpm)

f = frekuensi stator (Hz)

p = jumlah kutub stator

Sebuah motor sinkron dapat dinyalakan oleh sebuah motor dc pada satu sumbu. Ketika motor mencapai kecepatan sinkron, arus AC diberikan kepada belitan stator. Motor dc saat ini berfungsi sebagai generator dc dan memberikan eksitasi medan dc kepada rotor. Beban sekarang boleh diberikan kepada motor sinkron. Motor sinkron seringkali dinyalakan dengan menggunakan belitan sangkar tupai (squirrel-cage) yang dipasang di hadapan kutub rotor. Motor kemudian dinyalakan seperti halnya motor induksi hingga mencapai 95% kecepatan sinkron, saat mana arus searah diberikan, dan motor mencapai sinkronisasi. Torque yang diperlukan untuk menarik motor hingga mencapai sinkronisasi disebut pull-in torque.

Seperti diketahui, rotor motor sinkron terkunci dengan medan putardan harus terus beroperasi pada kecepatan sinkron untuk semua keadaanbeban. Selama kondisi tanpa beban (no-load), garis tengah kutub medan putar dan kutub medan dc berada dalam satu garis (gambar dibawah bagian a). Seiring dengan pembebanan, ada pergeseran kutub rotor ke belakang, relative terhadap kutub stator (gambar bagian b). Tidak ada perubahan kecepatan. Sudut antara kutub rotor dan stator disebut sudut torque α .



Gambar 2.2 Cara Kerja Motor PMSM

Prinsip kerja dari synchronous motor adalah sebagai berikut: [11]

- Amortisseur pada rotor menghasilkan Memulai Torsi dan Mempercepat Torsi untuk mempercepat synchronous motor.
- Ketika kecepatan motor mencapai sekitar 97% dari papan RPM, medan arus DC diterapkan ke rotor untuk menghasilkan torsi tarikan dan rotor akan menarik langkah dan mensinkronisasi dengan medan fluks yang berputar di

dalam stator. Motor akan dijalankan pada kecepatan sinkron dan menghasilkan torsi yang sinkron atau Synchronous Torque.

- Setelah sinkronisasi, dorongan torsi tidak dapat ditingkatkan lagi atau motor akan menjadi di luar kendali. Kadang-kadang, jika kelebihan beban sesaat, motor akan slip dan sinkronisasi ulang. Perlindungan saat dorongan harus disediakan, jika tidak motor akan berjalan sebagai sebuah motor induksi arus tinggi dan memungkinkan kerusakan motor yang parah.

Pada kontrol motor field-oriented control, pemodelan matematis dari motor permanent magnet synchronous motor diperlukan. Pemodelan yang digunakan mengacu pada domain direct dan quadrature. Penggunaan domain direct dan quadrature bertujuan untuk menyamakan model dinamis motor PMSM dengan motor DC eksitasi. Persamaan matematisnya seperti berikut [12].

$$v_{sd} = R_S i_{sd} + \frac{d\lambda_{sd}}{dt} - \omega_e \lambda_{sq} \dots\dots\dots (2)$$

$$v_{sq} = R_S i_{sq} + \frac{d\lambda_{sq}}{dt} + \omega_e \lambda_{sd} \dots\dots\dots (3)$$

$$v_D = R_D i_D + \frac{d\lambda_D}{dt} = 0 \dots\dots\dots (4)$$

$$v_Q = R_Q i_Q + \frac{d\lambda_Q}{dt} = 0 \dots\dots\dots (5)$$

Persamaan fluks diatas dijabarkan sebagai berikut [12].

$$\lambda_{sd} = (L_{md} + L_{s\sigma}) + L_{md} i_D + \lambda_{pm} \dots\dots\dots (6)$$

$$\lambda_{sd} = L_{sd} i_{sd} + L_{md} i_D + \lambda_{pm} \dots\dots\dots (7)$$

$$\lambda_{sq} = (L_{mq} + L_{s\sigma}) + L_{mq} i_Q = L_{sq} i_{sq} + L_{mq} i_Q \dots\dots\dots (8)$$

$$\lambda_D = L_{md} i_{sd} + L_D i_D + \lambda_{pm} \dots\dots\dots (9)$$

$$\lambda_Q = L_{mq} i_{sq} + L_Q i_Q \dots\dots\dots (10)$$

Dengan mendeklarasikan bahwa permanent magnet adalah sumber arus listrik, maka fluks magnet λ_{pm} dapat dituliskan secara matematis sebagai berikut.

$$\lambda_{pm} = L_{md} i_{pm} \dots\dots\dots (11)$$

Notasi d dan q merupakan komponen direct dan quadrature.

v_{sd} dan v_{sq} adalah komponen tegangan stator.

v_D dan v_Q adalah tegangan induksi pada kumparan, umumnya bernilai nol saat kondisi steady.

i_{sd} dan i_{sq} adalah komponen arus kumparan armature.

L_{sd} dan L_{sq} adalah komponen induktansi armature.

$L_{s\sigma}$ adalah inductor stator.

R_s adalah hambatan kumparan armature.

λ_{pm} adalah fluks magnet yang dihasilkan setiap satu siklus eksitasi.

R_D dan R_Q adalah hambatan pada kumparan peredam.

L_D dan L_Q adalah induktansi pada kumparan peredam.

Besarnya daya pada sistem dengan domain ABC sebagai berikut [12].

$$P_{in,abc} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \dots\dots\dots (12)$$

Menggunakan persamaan transformasi yang akan dijelaskan dibawah, maka daya dalam domain dq adalah.

$$P_{in,dq} = \frac{3}{2} v_d i_d + \frac{3}{2} v_q i_q + 3 v_0 i_0 \dots\dots\dots (13)$$

Pada kondisi steady, daya elektromagnetik dapat dirumuskan secara matematis sebagai berikut [12].

$$P_e = \omega_m \frac{3p}{2} (\lambda_{sd} i_{sq} - \lambda_{sq} i_{sd}) \dots\dots\dots (14)$$

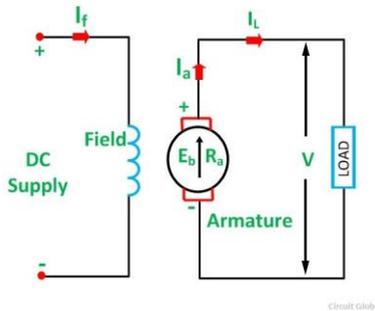
Dengan membagi daya dengan kecepatan angular ω_m didapatkan torsi dari *permanent magnet synchronous motor* sebagai berikut [12].

$$T_e = \frac{3p}{2} [(L_d i_{sd} + \lambda_{pm}) i_{sq} - L_{sq} i_{sq} i_{sd}] \dots\dots\dots (15)$$

2.2 Field-Oriented Control

Prinsip algoritma field oriented control didasarkan pada pola sistem kontrol motor DC eksitasi. Tipe motor DC eksitasi sama dengan motor DC pada umumnya yaitu mempunyai stator dan rotor. Stator merupakan bagian yang diam dan memiliki magnet permanen atau lilitan yang disebut field winding. Sedangkan rotor merupakan lilitan/kumparan armature yang berputar sehingga

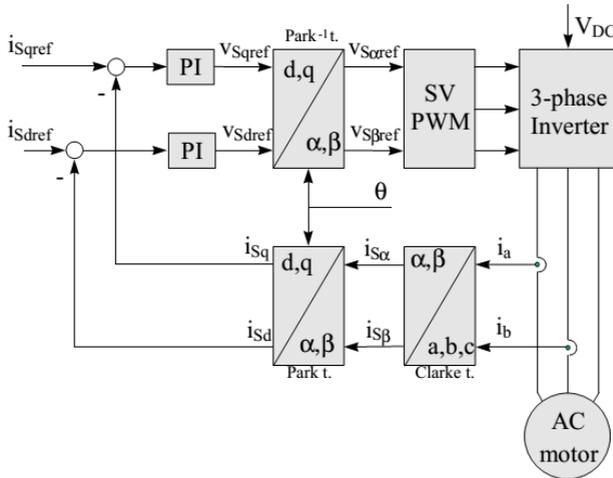
disebut armature winding. Motor DC eksitasi dikenal karena field winding dan armature winding berpisah secara fisik dan elektrik seperti Gambar 2.3. Pengendalian arus pada field dan armature winding secara independent akan memberikan kemudahan pada pengaturan torsi dan fluks secara independent juga. Arus armature bersumber pada brush dan komutator dimana medan stator akan menghasilkan torsi yang maksimal pada range kecepatan yang lebar [7].



Gambar 2.3 Skematik Motor DC Eksitasi

Motor PMSM tidak memiliki karakteristik motor yang sama dengan motor DC eksitasi, karena torsi dan fluks pada motor saling berhubungan antara satu dengan yang lain. Sehingga, diperlukan model transformasi matematika yang dapat memisahkan dua variable tersebut.

Dengan prinsip dasar yang mirip dengan motor DC eksitasi, transformasi matematika yang digunakan adalah transformasi clark-park. Transformasi ini bertujuan untuk mengendalikan arus direct dan quadrature pada stator motor. Arus direct dan quadrature merupakan hasil dari transformasi arus tiga fasa (i_a , i_b dan i_c) yang masuk pada motor. Skematik dari metode kontrol field-oriented control dijelaskan pada Gambar 2.4 [13].



Gambar 2.4 Skematik Field-Oriented Control

2.2.1 Vektor Ruang

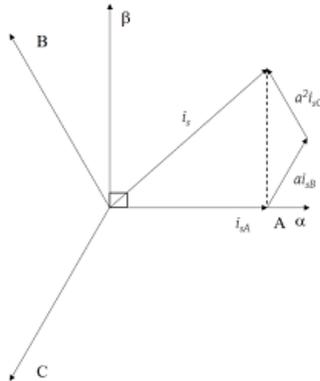
Tegangan, arus dan fluks tiga fasa pada motor AC dapat dimodelkan secara matematika dalam koordinat vektor ruang. Pada besaran arus (i_a , i_b , i_c) adalah arus stator tiga fasa, kemudian dimodelkan pada keadaan ruang (I_s) sebagai berikut [9].

$$I_s = i_a + \alpha i_b + \alpha^2 i_c \dots\dots\dots (16)$$

Dimana,

$$\alpha = e^{j\frac{2}{3}\pi} \dots\dots\dots (17)$$

$$\alpha^2 = e^{j\frac{4}{3}\pi} \dots\dots\dots (18)$$



Gambar 2.5 Vektor Ruang Arus Tiga Fasa

2.2.2 Transformasi Clarke

Transformasi Clarke mengubah sistem tiga fasa menjadi sistem dua fasa dengan bidang orthogonal sama dengan bidang stationary. Variable dua fasa yang baru dinotasikan dalam bentuk α dan β . Persamaan dan koordinat yang baru dituliskan sebagai berikut [14].

$$I_{s\alpha} = I_{sA} \dots\dots\dots (19)$$

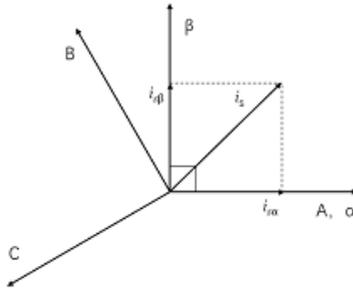
$$I_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}(I_{sA} + I_{sB}) \dots\dots\dots (20)$$

Dimana α dan β adalah bidang stationary. Persamaan ini dituliskan dalam bentuk matriks sebagai berikut [10].

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{2}{\sqrt{3}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sA} \\ I_{sB} \\ I_{sC} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (21)$$

Inverse tranformasi Clarke merubah domain α dan β menjadi ABC atau tiga fasa. Persamaan matriks inverse tranformasi park dituliskan sebagai berikut [10].

$$\begin{bmatrix} I_{sA} \\ I_{sB} \\ I_{sC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (22)$$



Gambar 2.6 Arus Stator dalam Bidang abc-αβ

Penggunaan transformasi Clark bertujuan untuk memisahkan arus pada vector ruang menjadi bagian real yang dinotasikan dalam domain $i_{s\alpha}$ dan bagian imajiner yang dinotasikan dalam domain $i_{s\beta}$. Meskipun sudah dipisahkan, dua variabel ini masih bergantung terhadap waktu dan kecepatan, sehingga masih perlu dipisahkan menggunakan transformasi yang lain, yaitu transformasi Park.

2.2.3 Transformasi Park

Transformasi Park merubah bidang stationary menjadi bidang rotating (d-q) dimana d (direct) dibuat sejajar dengan fluks rotor. Persamaan dan koordinat sistem yang baru dari transformasi ini dituliskan sebagai berikut [15].

$$I_{sd} = I_{s\alpha} \cos \theta + I_{s\beta} \sin \theta \dots\dots\dots (23)$$

$$I_{sq} = -I_{s\alpha} \sin \theta + I_{s\beta} \cos \theta \dots\dots\dots (24)$$

Dimana, I_{sd} adalah komponen arus direct, I_{sq} adalah komponen

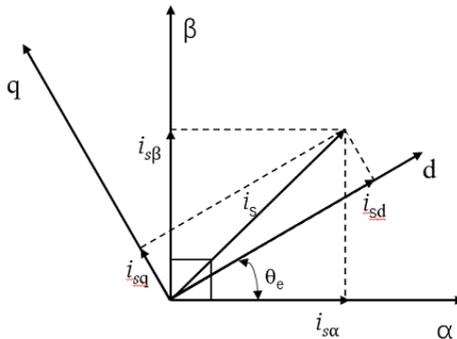
arus quadrature dan θ adalah posisi fluks rotor antara komponen α dan d. Model matriks dari transformasi park sebagai berikut [16].

$$\begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (25)$$

Inverse dari transformasi park dituliskan pada persamaan matematis dibawah ini dengan bentuk matriks.

$$\begin{bmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (26)$$

I_{sd} dan I_{sq} mengendalikan torsi dan fluks secara berurutan tetapi kedua besaran ini masih bergantung pada komponen $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$ dan posisi fluks rotor.

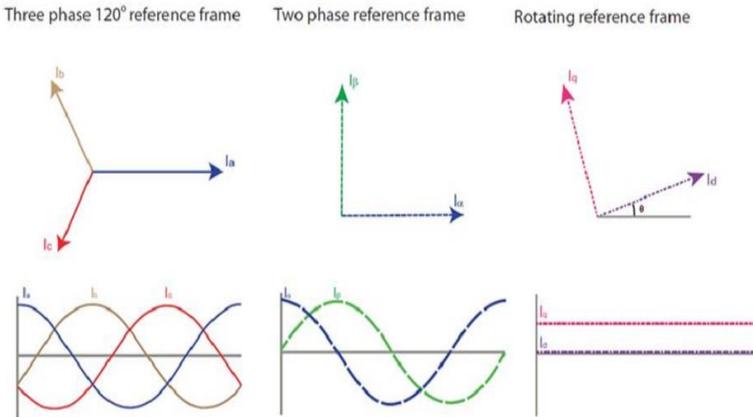


Gambar 2.7 Arus Stator dalam Bidang $\alpha\beta$ - dq

2.3 Inverter

Inverter adalah suatu konverter yang merubah sistem tegangan DC menjadi tegangan AC dengan nilai tegangan dan frekuensi sesuai dengan kebutuhan. Jika tegangan DC dapat diatur, maka inverter dengan rasio tegangan DC dan AC yang tetap dapat digunakan. Namun, bila tegangan DC masukan tidak dapat diatur,

pengaturan tegangan keluaran inverter dapat diperoleh dengan menggunakan metode pengaturan modulasi lebar pulsa [17].



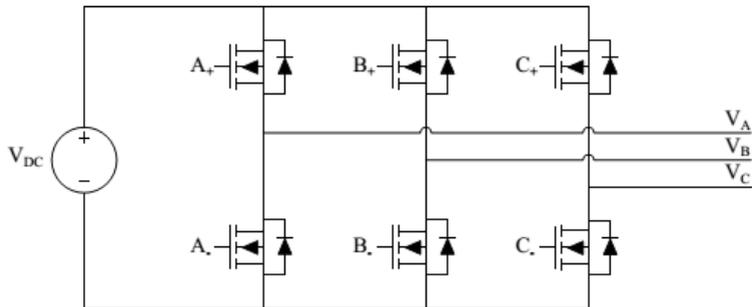
Gambar 2.8 Referensi Arus dalam Tiga Acuan

Bentuk gelombang tegangan output dari sebuah inverter yang ideal membentuk gelombang sinusoidal. Namun biasanya bentuk gelombang yang dihasilkan tidak membentuk gelombang sinusoidal yang sempurna dan memiliki kandungan harmonik. Untuk mengurangi kandungan harmonik pada suatu inverter dilakukan teknik switching.

Terdapat dua jenis inverter berdasarkan besaran yang diatur, yaitu voltage fed inverter (VFI) dan current-feed inverter (CFI). Voltage feed inverter apabila tegangan masukan selalu dijaga konstan, sedangkan CFI apabila arus masukan selalu dipelihara konstan.

Inverter pada penelitian ini menggunakan jembatan tiga fasa. Gambar 2.9 merupakan rangkaian dasar inverter jembatan tiga fasa dengan beban resistif dan bentuk gelombangnya. Seperti

halnya pada rangkaian inverter setengah-jembatan di atas, dalam rangkaian ini diperlukan dua buah kapasitor untuk menghasilkan titik N agar tegangan pada setiap kapasitor $V_i/2$ dapat dijaga konstan. Terdapat tiga sisi sakelar, yaitu: sakelar S1+ dan S1- serta S2+ dan S2-. Kedua sisi sakelar ini, sakelar S1 dan S4, S3 dan S4, serta S5 dan S2. Masing-masing sakelar, S1 dan S4, atau S3 dan S4, atau S5 dan S2, tidak boleh bekerja secara serempak/ simultan, karena akan terjadi hubung singkat rangkaian. Kondisi ON dan OFF dari kedua sisi sakelar ditentukan dengan teknik modulasi, dalam hal ini menggunakan prinsip PWM.



Gambar 2.9 Rangkaian Inverter Jembatan Tiga Fasa

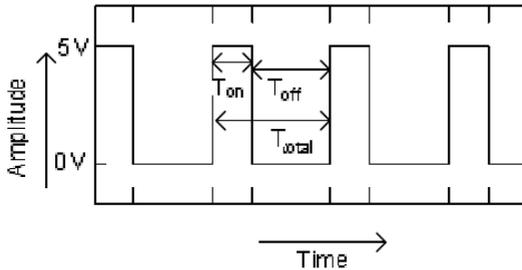
2.4 Pulse Width Modulation

PWM merupakan sebuah mekanisme untuk membangkitkan sinyal keluaran yang periodenya berulang antara high dan low dimana kita dapat mengontrol durasi sinyal high dan low sesuai dengan yang kita inginkan. Duty cycle merupakan prosentase periode sinyal high dan periode sinyal, prosentase duty cycle akan berbanding lurus dengan tegangan rata-rata yang dihasilkan. Berikut ilustrasi sinyal PWM, misalkan kondisi high 5 V dan kondisi low 0 V. Pengaturan lebar modulasi dipergunakan di berbagai bidang yang sangat luas, salah satu diantaranya adalah:

speed control (kendali kecepatan), power control (kendali sistem tenaga), measurement and communication (pengukuran atau instrumentasi dan telekomunikasi).

2.4.1 Prinsip Dasar PWM

Modulasi lebar pulsa (PWM) dicapai/diperoleh dengan bantuan sebuah gelombang kotak yang mana siklus kerja (duty cycle) gelombang dapat diubah - ubah untuk mendapatkan sebuah tegangan keluaran yang bervariasi yang merupakan nilai rata rata dari gelombang tersebut [18].



Gambar 2.10 Bentuk Gelombang Kotak dengan kondisi High dan Low

T_{on} adalah waktu dimana tegangan keluaran berada pada posisi tinggi (baca: high atau 1) dan, T_{off} adalah waktu dimana tegangan keluaran berada pada posisi rendah (baca: low atau 0). Anggap T_{total} adalah waktu satu siklus atau penjumlahan antara T_{on} dengan T_{off} , biasa dikenal dengan istilah “periode satu gelombang” [18].

$$T_{total} = T_{on} + T_{off} \dots\dots\dots (27)$$

Siklus kerja atau duty cycle sebuah gelombang didefinisikan sebagai berikut.

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on}+T_{off}} = \frac{T_{on}}{T_{total}} \dots\dots\dots (28)$$

Tegangan keluaran dapat bervariasi dengan duty-cycle dan dapat dirumuskan sebagai berikut,

$$V_{out} = D \times V_{in} \dots\dots\dots (29)$$

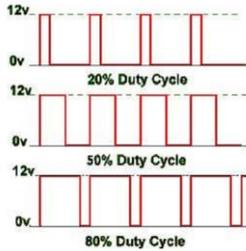
Sehingga,

$$V_{out} = \frac{T_{on}}{T_{total}} \times V_{in} \dots\dots\dots (30)$$

Dari rumus diatas dapat ditarik kesimpulan bahwa tegangan keluaran dapat diubah ubah secara langsung dengan mengubah nilai T_{on} . Apabila T_{on} adalah 0, V_{out} juga akan 0. Apabila T_{on} adalah T_{total} maka V_{out} adalah V_{in} atau katakanlah nilai maksimumnya. PWM bekerja sebagai switching power suplai untuk mengontrol on dan off. Tegangan dc dikonvert menjadi sinyal kotak bolak balik, saat on mendekati tegangan puncak dan saat off menjadi nol (0) volt [19], [20]. Jika frekuensi switching cukup tinggi maka temperatur (suhu) airyang dikendalikan akan semakin sesuai dengan yang diharapkan . Dengan mengatur duty cycle dari sinyal (modulasi lebar pulsa dar i sinyal disebabkan oleh PWM). Terlihat pada gambar di bawah sinyal ref adalah sinyal tegangan dc yang dikonversi oleh sinyal gergaji dan menghasilkan sinyal kotak [18].

2.4.2 Space Vector PWM

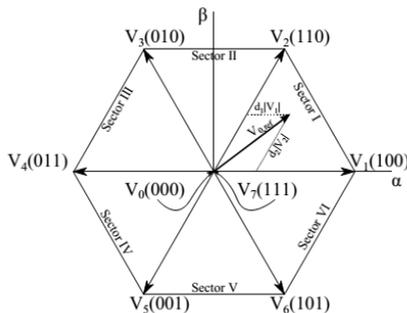
Teknik modulasi PWM memiliki berbagai metode. Salah satu metode yang menghasilkan distorsi harmonic rendah dan penggunaan daya DC lebih efisien adalah space vector PWM. Inverter yang digunakan sebagai objek modulasi bertipe Voltage Source Inverter (VSI) seperti Gambar 2.12 [10].



Gambar 2.11 Sinyal PWM pada variasi duty cycle

Konsep dari space vector PWM adalah sumber tegangan tiga fasa (V_a , V_b dan V_c) ditransformasikan kedalam koordinat dua fasa stator (V_α dan V_β). Koordinat dua fasa stator akan menghasilkan besaran dengan nilai vector tertentu. Berdasarkan Gambar 2.7, terdapat delapan kondisi switching yang dapat dicapai oleh inverter seperti yang ditunjukkan Tabel 2.1 [10]

Konfigurasi switching diatas masih dalam domain abc, kemudian ditransformasikan menggunakan transformasi clark dalam domain $\alpha\beta$. Maka kombinasi switching $\alpha\beta$ ditunjukkan pada Tabel 2.2. Gambar 2.10 merupakan vector yang menunjukkan koordinat $\alpha\beta$ dalam satuan tegangan.



Gambar 2.12 Vektor Ruang Switching Inverter

Tabel 2.1 Konfigurasi Switching Inverter Tiga Fasa

S_C	S_B	S_A	V_{AB}	V_{BC}	V_{CA}
0	0	0	0	0	0
0	0	1	V_{DC}	0	$-V_{DC}$
0	1	0	$-V_{DC}$	V_{DC}	0
0	1	1	0	V_{DC}	$-V_{DC}$
1	0	0	0	$-V_{DC}$	V_{DC}
1	0	1	V_{DC}	$-V_{DC}$	0
1	1	0	$-V_{DC}$	0	V_{DC}
1	1	1	0	0	0

Tabel 2.2. Kombinasi Switching domain $\alpha\beta$

S_C	S_B	S_A	V_α	V_β
0	0	0	0	0
0	0	1	$2/3 V_{DC}$	0
0	1	0	$-1/3 V_{DC}$	$1/\sqrt{3} V_{DC}$
0	1	1	$1/3 V_{DC}$	$1/\sqrt{3} V_{DC}$
1	0	0	$-1/3 V_{DC}$	$-1/\sqrt{3} V_{DC}$
1	0	1	$1/3 V_{DC}$	$-1/\sqrt{3} V_{DC}$
1	1	0	$-2/3 V_{DC}$	0
1	1	1	0	0

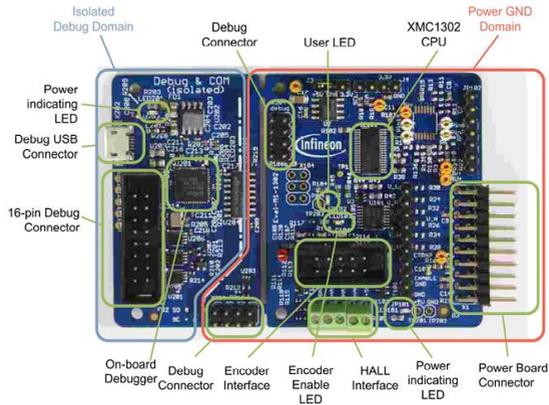
Saat vector berkoordinat 000 dan 111, maka kondisi itu disebut vector referensi yang berlokasi di pusat koordinat. Sedangkan enam kombinasi lainnya memiliki nilai vector berdasarkan koordinatnya.

2.5 Eval Board M1-1302

Eval Board M1-1302 adalah rangkaian elektronik untuk beroperasinya IC mikrokontroller XMC1300. XMC1300 adalah mikrokontroller buatan Infineon Technology dengan tipe ARM Cortex-M0. Pada tugas akhir ini mikrokontroller yang digunakan merupakan series TSSOP38. Komponen penunjang dari eval board M1-1302 sebagai berikut [21]

- a. Port Power pada power board connector
- b. Hall sensor dan encoder interface
- c. Port USIC interface untuk menghubungkan UART, SPI atau I2C
- d. 6 LED
 - 2 LED indicator power
 - 1 User LED
 - 1 LED untuk Encoder
 - 2 LED untuk Debug
- e. 2 Isolated debug
 - SEGGER J-LINK menggunakan USB connector
 - 16-pin debug connector
- f. Port Power Supply untuk mikrokontroller melalui konektor J3 sebesar 3.3V dan 5V
- g. Port Power Supplu untuk mikrokontroller melalui isolated debug
 - SEGGER J-LINK menggunakan USB connector
 - 16-pin debug connector

Rangkaian listrik Eval Board M1-1302 beserta keterangan ditunjukkan pada Gambar 2.13



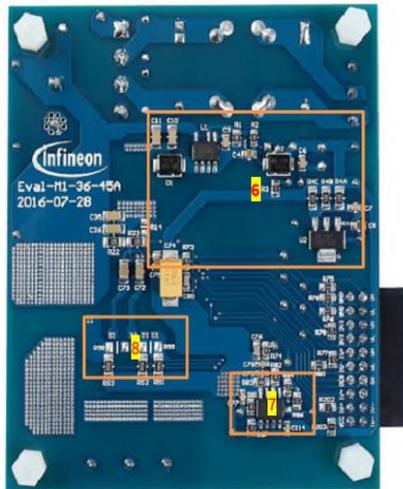
Gambar 2.13 Rangkaian Eval Board M1-1302

2.6 Eval Board M1-36-45A

Eval board M1-36-45A merupakan rangkaian listrik yang bertujuan sebagai power inverter pada driver motor. Power inverter yang digunakan bekerja sama dengan IC CIPOS. CIPOS diproduksi oleh Infineon Technology. Pada tugas akhir ini, tipe CIPOS yang digunakan adalah CIPOS Nano Intelligent Power Module (IRSM836-045MA). Gambar 2.14 merupakan Eval Board M1-36-45A dengan deskripsi komponennya. Pin yang akan digunakan adalah pin J1 yaitu AC-Line connector dan in J2 yaitu Motor side connector. Pin J1 dihubungkan pada sumber listrik PLN, sedangkan pin J2 dihubungkan pada motor tiga fasa sesuai dengan hubungan arusnya yaitu U, V, W [22].



(a)



(b)

Gambar 2.14 Eval Board M1-36-45A. (a) Tampak atas (b) Tampak Bawah

Keterangan Gambar :

1. CIPOS Nano Module
2. Motor Three Phase Connector (J3)
3. iMotion M1 20 Pin Connector (J4)
4. AC input Connector (J1)
5. EMI Filter and Rectifier Group
6. On-Board Power Supply for 15 V and 3.3 V
7. Shunt Resistor
8. Over Current Protection

Fungsi utama eval board M1-36-45A sebagai berikut:

- a. Tegangan input yang diterima 220 Vac
- b. Dapat men-drive motor sebesar 85 W tanpa headsink
- c. Dapat membaca arus pada setiap fasa
- d. Fault diagnostic output

2.7 Microcontroller dan Digital Signal Processing

Microcontroller adalah rangkaian elektronik yang berukuran kecil dan biasa disebut computer skala kecil. Komponen utama dari mikrokontroller umumnya sebagai berikut.[23]

- 8 atau 16 bit microprocessor (CPU)
- RAM dalam jumlah kecil
- Programmable ROM dan atau Flash Memory
- I/O paralel dan atau seri
- Timer dan signal generator
- Analog to digital (ADC) atau Digital to analog (DAC)

Mikrokontroller biasanya digunakan untuk membuat perintah pengendalian satu atau lebih perangkat keras. Kemampuan mikrokontroller yang dapat bekerja secara mandiri ketika

algoritma ditanam membuat sistem ini disebut juga embedded controller. Konsumsi daya yang diperlukan untuk menjalankan mikrokontroler 0.5 – 1 Watt.

Digital signal processing adalah piranti yang bertugas untuk mengubah dan menganalisa informasi terukur dari sinyal. Penggunaan digital signal processing yang paling sering pada bidang audio, digital image dan speech. Cara kerja digital signal processing adalah mengubah sinyal dari analog menjadi digital, kemudian dilakukn proses pengukuran dan filter sinyal dan tahap akhir adalah mengembalikan sinyal tersebut menjadi analog kembali.

Karakteristik digital signal processor sebagai berikut. [24]

- Program dan data memory terpisah (Harvard Architecture)
- Instruksi special untuk operasi SIMD (Single Instruction, Multiple Data)
- Pengerjaan tugas bersifat parallel, tidak bisa multitasking

Perbandingan antara mikrokontroler dengan digital signal processing ditunjukkan pada Tabel 2.3 [25]–[27]

2.8 μ C-Probe

μ C-Probe adalah aplikasi yang didesain untuk membaca dan mencatat di memory dari kerja sebuah embedded processor secara real-time. Alokasi memori diatur secara virtual melalui aplikasi ini oleh user. Gambar 2.15 menunjukkan sistem dan pergerakan data. [28], [29]

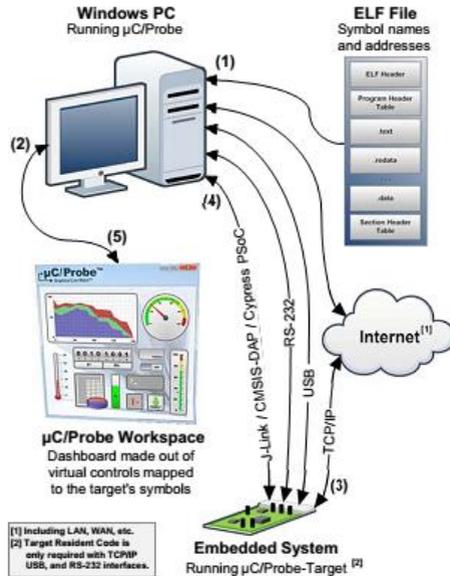
μ C-Probe memiliki toolbox penampilan dan penyimpanan data run-time yang beragam. Pada tugas akhir ini yang digunakan

adalah toolbox charts dan data logging. Toolbox chart menampilkan data dalam bentuk grafik secara real-time.

Toolbox data logging menyimpan data parameter fisis yang dijalankan oleh embedded system. Data akan disimpan dalam bentuk excel kedalam direktori file uC-Probe terinstall.

Tabel 2.3 Perbandingan DSP dan Mikrokontroler

	Mikrokontroler	DSP
Memory penyimpanan	Memiliki flash program memory	Tidak memiliki flash program memory
Kecepatan operasi matematika	Hanya dapat bekerja jika diberikan perintah melalui software	Sangat cepat
Operasi floating point	Harus menggunakan software	Sangat cepat
Orientasi kerja	Multitasking dan dapat digunakan untuk banyak tujuan	Hanya dapat bekerja sebagai “mesin hitung” dengan memberikan input output



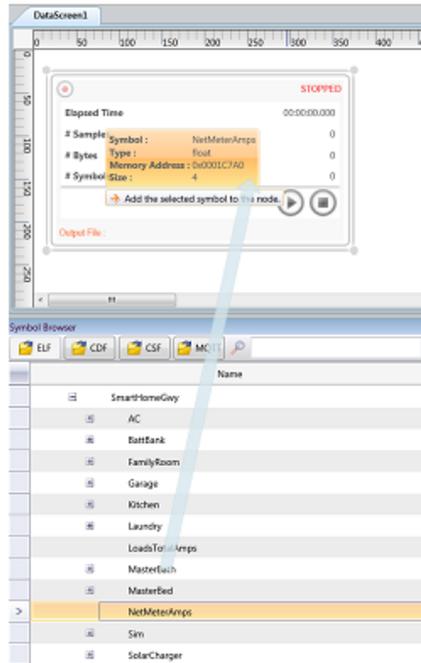
Gambar 2.15 Cara Kerja μ C-Probe.



Gambar 2.16 Toolbox Chart

Dalam penggunaan aplikasi uC-probe perlu diketahui spesifikasi sistem yang akan dikontrol. Parameter motor dan driver menjadi penentu bagi sistem dalam bekerja. Hal ini dikarenakan sistem hanya akan memberikan perintah kepada driver tanpa memberikan sistem proteksi atau keamanan selama berlangsungnya proses pengontrolan. Seperti contoh, kecepatan yang diatur pada uC-probe diberikan nilai 7000 RPM, tetapi batas maksimal driver 5000 RPM. Maka driver tetap akan memberikan

keluaran daya maksimal. Jika hal ini terjadi maka driver akan terbakar.



Gambar 2.17 Toolbox Data Logging

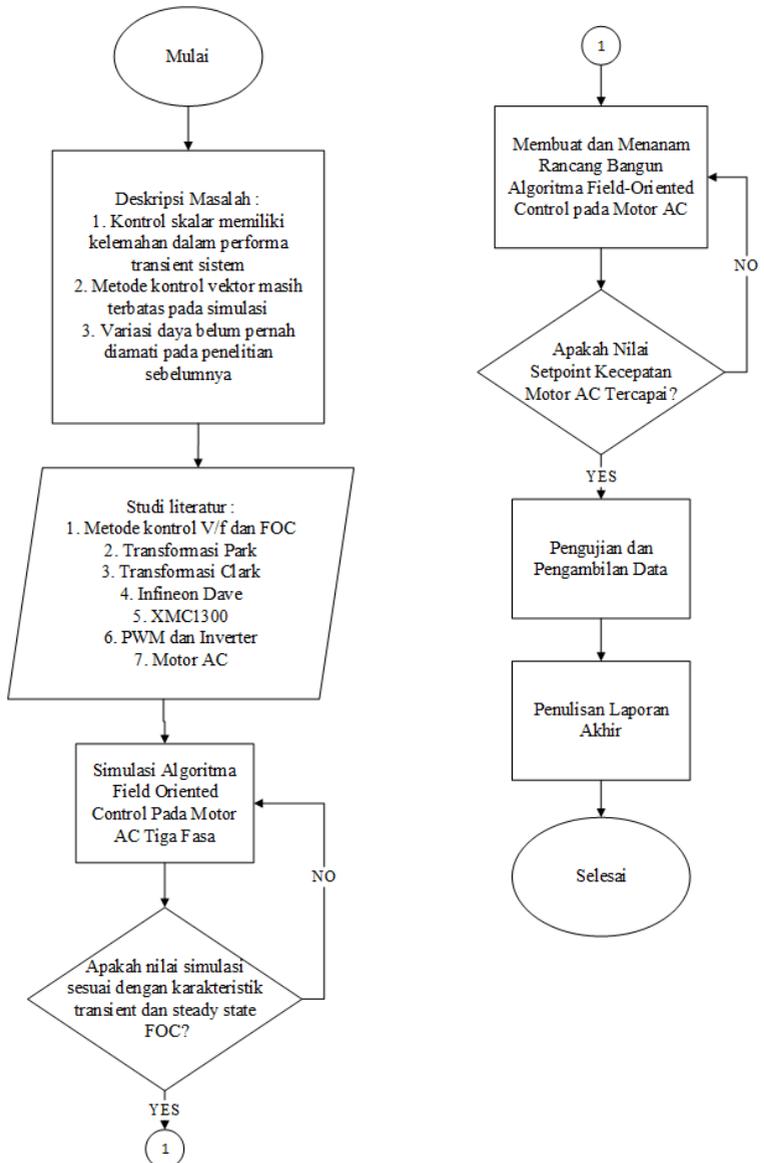
BAB III METODOLOGI

Bab ini berisi langkah – langkah dari pengerjaan tugas akhir rancang bangun kontrol motor AC dengan metode field-oriented control. Gambar 3.1 merupakan diagram alir pengerjaan tugas akhir secara keseluruhan.

Penelitian ini dibagi menjadi dua bagian utama, yaitu tahapan simulasi dan rancang bangun. Pada tahap simulasi dilakukan pemodelan sistem pengendalian kecepatan motor AC. Kemudian diimplementasikan algoritma field-oriented control pada simulasi. Tahap kedua adalah rancang bangun sistem pengendalian kecepatan motor. Motor AC yang digunakan berjenis *permanent magnet synchronous motor* (PMSM). Driver yang digunakan adalah XMC1300 dengan dua eval board driver dan power inverter. Algoritma field-oriented control ditanam pada driver dan dilakukan pengujian pada motor. Respon motor terhadap masukkan kecepatan menjadi bahan analisa untuk dibandingkan dengan tahap simulasi.

3.1. Deskripsi Masalah

Deskripsi masalah dimaksud untuk menjabarkan permasalahan yang akan diselesaikan pada penelitian tugas akhir ini. Terdapat tiga pokok permasalahan yaitu kontrol skalar memiliki kelemahan dalam performa kondisi transient, metode kontrol vector masih sebatas simulasi dan belum adanya penelitian dalam analisis variasi daya motor terhadap performa sistem.



Gambar 3.1 Flowchart Kegiatan

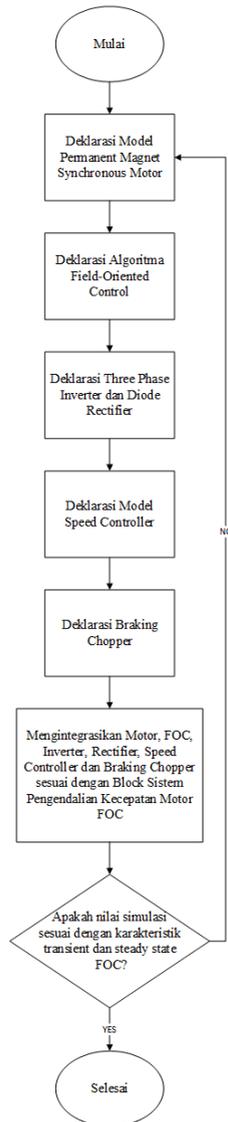
Studi literatur bertujuan untuk membangun pemahaman dari awal sampai detail mengenai topik penelitian yang bersumber dari jurnal-jurnal, buku dan tesis yang terkait dengan topik. Literatur yang dipelajari adalah komparasi metode kontrol V/f dan FOC, transformasi park, transformasi clark, Infineon dave, XMC 1300, PWM dan inverter serta motor AC.

3.2. Perancangan Simulasi

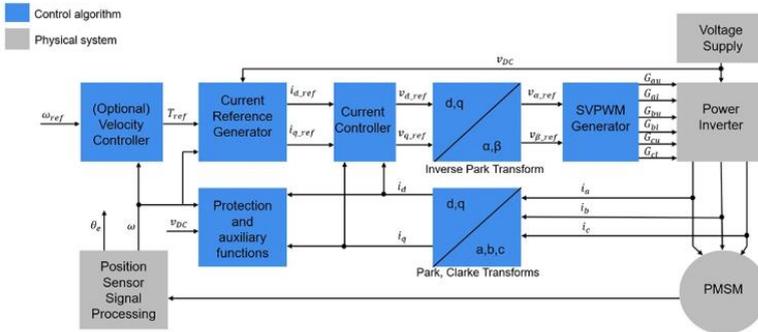
Simulasi system pengendalian kecepatan motor AC dilakukan dengan software MATLAB/SIMULINK. Diagram alir tahap penelitian dengan metode simulasi dijelaskan pada Gambar 3.2.

Tahapan yang dilakukan pada penelitian ini terdapat tujuh langkah utama, yaitu deklarasi model motor PMSM, deklarasi algoritma field-oriented control, deklarasi inverter tiga fasa, deklarasi speed controller dan braking chooper. Setelah tahap deklarasi fungsi dilakukan integrasi antar komponen tersebut sesuai dengan blok diagram system pengendalian (Gambar 3.3). Bagian akhir dari tahap penelitian simulasi ini melihat respon system pada kondisi transient dan steady.

Simulasi pada MATLAB/SIMULINK menggunakan toolbox Simscape. Fungsi untuk menggerakkan motor permanent magnet synchronous motor dengan metode FOC adalah PM Synchronous Motor Drive. Blok motor PMSM Field Oriented Controller ditunjukkan pada Gambar 3.4 [30], [31].

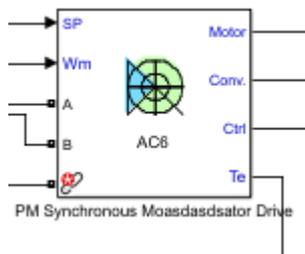


Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian Tahap Simulasi



Gambar 3.3 Block Diagram Sistem Pengendalian Motor PMSM [31]

Drive ini dilengkapi dengan kontrol kecepatan loop tertutup berdasarkan metode kontrol vektor tidak langsung (indirect). Kontrol kecepatan mengeluarkan torsi elektromagnetik referensi dan fluks rotor pada mesin. Referensi kecepatan dan komponen kuadrat (dq) dari arus stator, sesuai dengan fluks dan torsi rotor yang diperintahkan, diturunkan berdasarkan pada strategi pengendalian vektor tidak langsung. Komponen referensi dq dari arus stator kemudian digunakan untuk mendapatkan gerbang sinyal yang dibutuhkan untuk inverter melalui pita histeresis atau pengendali arus PWM.



Gambar 3.4 Block motor induksi FOC

Blok Field Oriented Control Induction Motor menggunakan blok-blok dari Electric Drive / Fundamental Drive Bloks yaitu:

- Speed Controller (AC)
- FOC (Field Oriented Controller)
- Bus DC
- Inverter (Tiga Fasa)

Waktu sampling pengendali kecepatan harus multipel waktu sampling FOC. Waktu sampling yang terakhir harus belih banyak dari waktu simulasi. Untuk waktu sampling FOC sebesar 30 μ s. Hasil simulasi yang baik telah diperoleh untuk simulasi waktu 30 μ s.

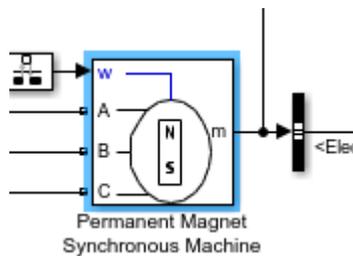
Pada blok fungsi ini dilakukan tahapan deklarasi motor, algoritma field-oriented control, inverter tiga fasa dan rectifiernya serta model speed controller. Satu blok tambahan adalah braking chopper bertujuan untuk menstabilkan arus DC pada kontroller. Tahapan deklarasi dijelaskan sebagai berikut:

3.2.1 Deklarasi Model Permanent Magnet Synchronous Motor

Permanent Magnet Synchronous Machine didapatkan dari *library* Fundamental Blocks (powerlib). Gambar serta parameter blok yang dapat diatur terlihat pada Gambar 3.5 dibawah ini. Adapun parameter motor PMSM yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 3.1

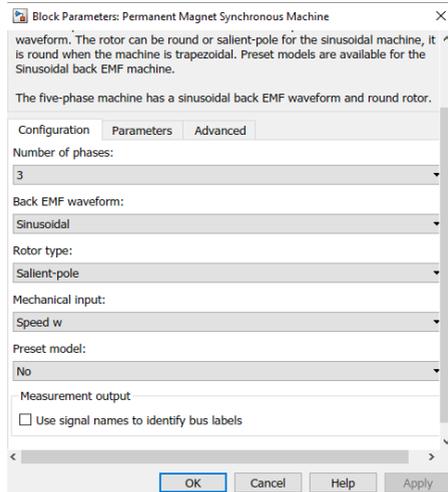
Tabel 3.1. Parameter Motor

Parameter	Nilai	Satuan
Stator Resistance	0.2	Ω
d-inductance	7000	μH
q-inductance	7000	μH
Motor Inertia	0.125	Kg m^2
Flux	0.175	V.s
Torque	40	Nm
Poles	2	Pasang

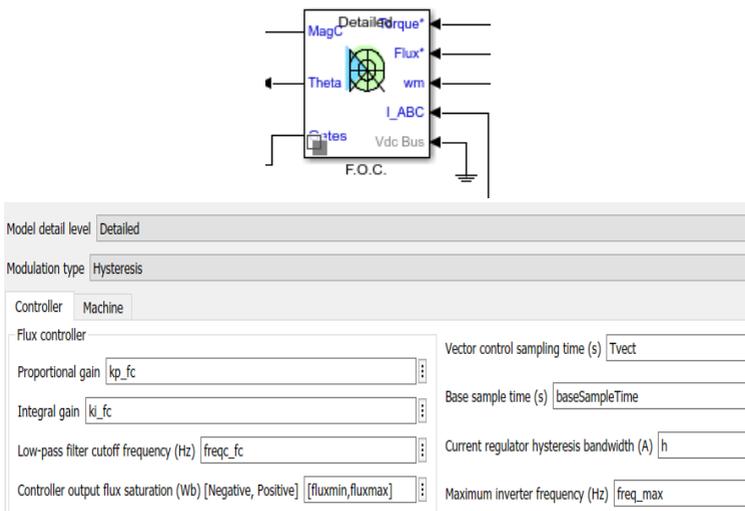


3.2.2 Deklarasi Algoritma Field-Oriented Control

Field Oriented Control adalah sebuah alat yang digunakan untuk mengubah sistem couple menjadi decouple. block Field Oriented Control terlihat pada Gambar 3.6 serta skemanya dibawah ini



Gambar 3.5 Block Simscape Permanent Magnet Synchronous Machine



Gambar 3.6 Block FOC

Block input dan output pada block FOC adalah sebagai berikut. SP adalah kecepatan atau torsi set point. Titik setel kecepatan bisa menjadi fungsi langkah, namun laju perubahan kecepatan akan mengikuti percepatan / perlambatan landai. Jika torsi beban dan kecepatannya memiliki tanda yang berlawanan, torsi akselerasi akan menjadi jumlah torsi elektromagnetik dan beban.

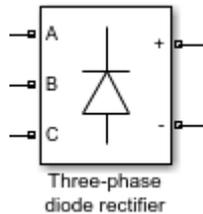
T_m atau W_m adalah masukan mekanis: torsi beban (T_m) atau kecepatan motor (W_m). Untuk port rotasi mekanis (S), input ini akan dihapus. A, B, C adalah terminal tiga fasa dari motor drive. W_m , T_e atau S adalah output mekanik: kecepatan motor (W_m), torsi elektromagnetik (T_e) atau port rotasi mekanis (S). Ketika parameter mode bus output diatur ke beberapa bus keluaran, blok tersebut memiliki tiga bus keluaran berikut:

- Motor
Vektor pengukuran motor. Vektor ini memungkinkan mengamati variabel motor menggunakan blok Bus Selector.
- Conv
Vektor pengukuran tiga fase konverter. Vektor ini berisi Tegangan bus DC, Penyearah arus keluaran, Masukan arus inverter
- Ctrl
Vektor pengukuran pengontrol. Vektor ini berisi Referensi torsi, Kesalahan kecepatan (perbedaan antara kecepatan referensi jalan dan kecepatan aktual), Referensi kecepatan ramp atau referensi torsi

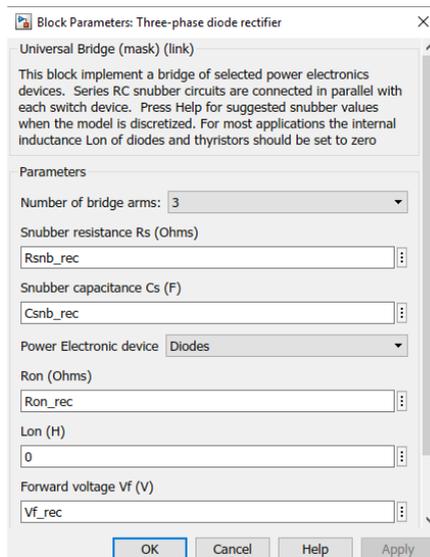
3.2.3 Deklarasi inverter tiga fasa dan diode rectifier

Rectifier merupakan sebuah alat yang digunakan untuk mengubah sumber arus AC menjadi sumber arus DC. Pada

bagian Rectifier terdapat block-block yang dapat diatur terlihat pada Gambar 3.7. Komponen yang diatur adalah tipe rectifier yang digunakan adalah IGBT.



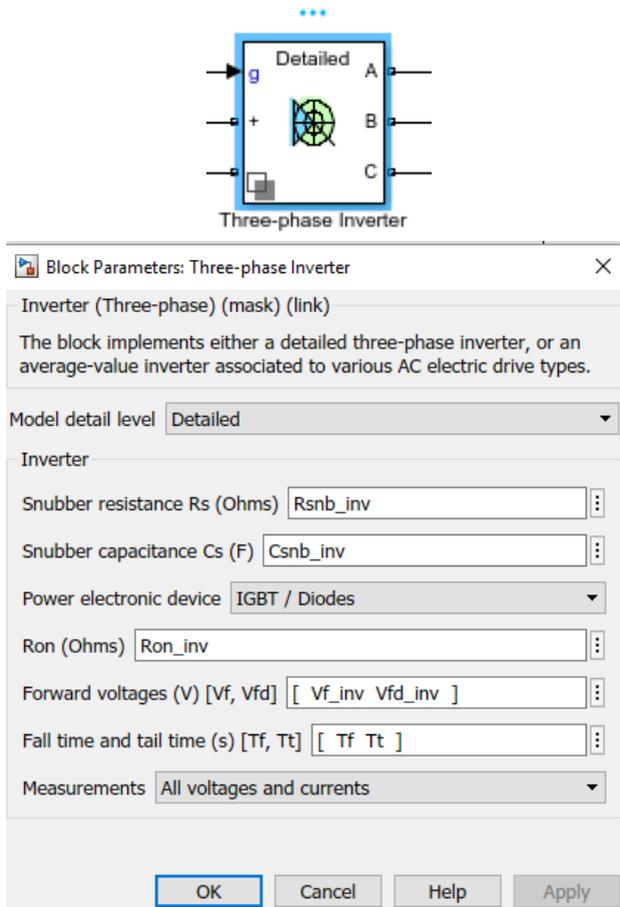
(a)



Gambar 3.7 Block Fungsi Rectifier

Inverter adalah sebuah alat untuk mengubah arus DC menjadi arus AC. Bagian Inverter berasal dari tab Converters and DC Bus. Tampilan parameter blok Universal Bridge dari library Fundamental Blocks (powerlib). Gambar dan parameter blok dapat

dilihatlah pada Gambar 3.8. Komponen yang diatur adalah power electronic device dan model detail level. Power electronic device dipilih IGBT dan model detail dipilih SVM

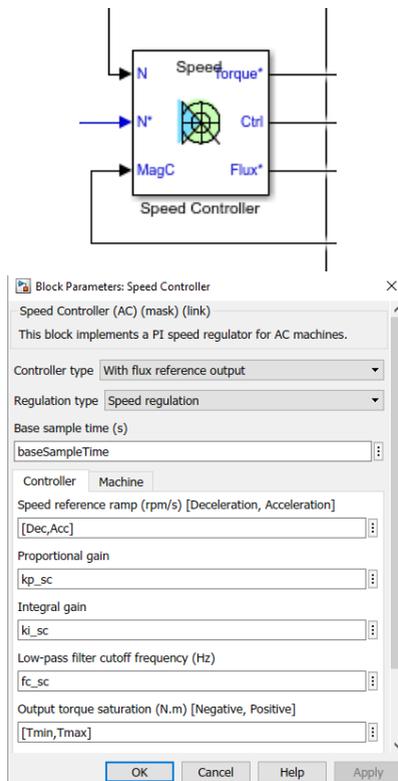


Gambar 3.8 Block Inverter

3.2.4 Deklarasi Speed Controller

Speed Controller merupakan sebuah alat untuk mengatur masukan dari kecepatan referensi sehingga motor

dapat stabil dan diteruskan menjadi inputan dari FOC. Gambar 3.9 menunjukkan blok simscape dan komponen yang harus diisi. Komponen yang diisi adalah sampel time sebesar 2×10^{-5} s dan tipe regulator dipilih Speed Regulation yang bertujuan untuk mengatur kecepatan motor.

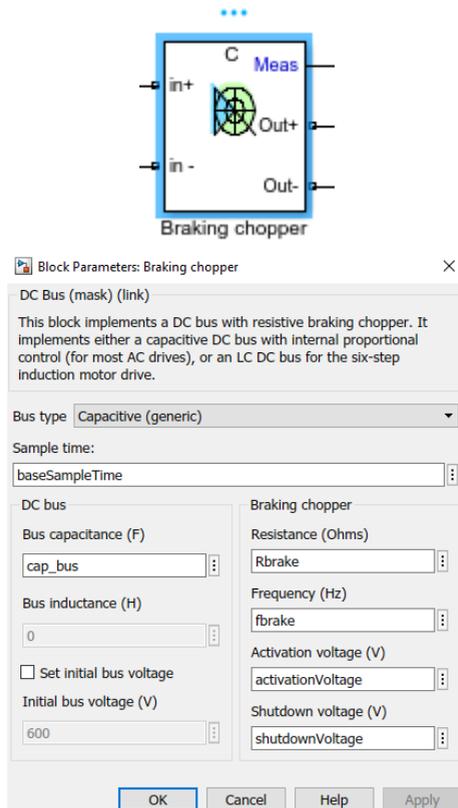


Gambar 3.9 Block Speed Controller

3.2.5 Deklarasi Braking Chopper

Braking Chopper merupakan sebuah sistem yang digunakan untuk menstabilkan arus DC ketika over voltage (kelebihan tegangan). Pada bagian braking chopper terdapat blok-

blok yang dapat diatur terlihat pada Gambar 3.10. Nilai yang dimasukkan default atau nilainya sesuai dengan block parameter.



Gambar 3.10 Block Chopper

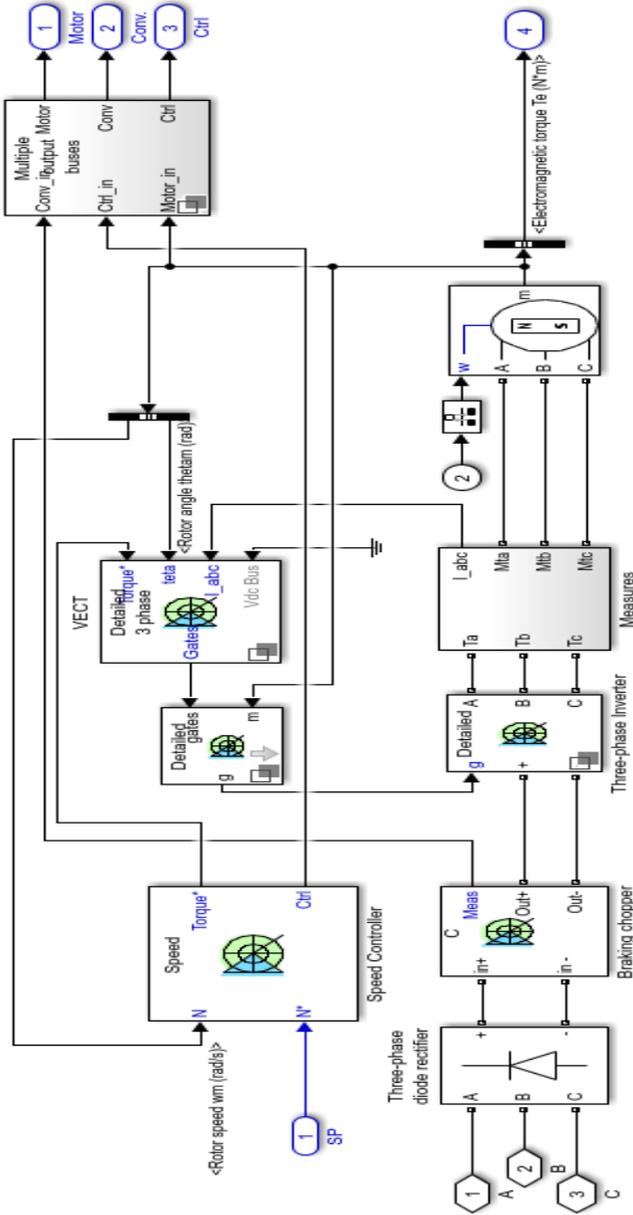
3.2.6 Integrasi sistem pengendalian kecepatan motor PMSM dengan algoritma FOC

Blok diagram sistem pengendalian motor dengan metode field-oriented control ditunjukkan pada Gambar 3.3. Pada block diagram tersebut block PMSM dihubungkan dengan inverter. Semua sinyal pengendalian akan dirubah dari DC menjadi AC

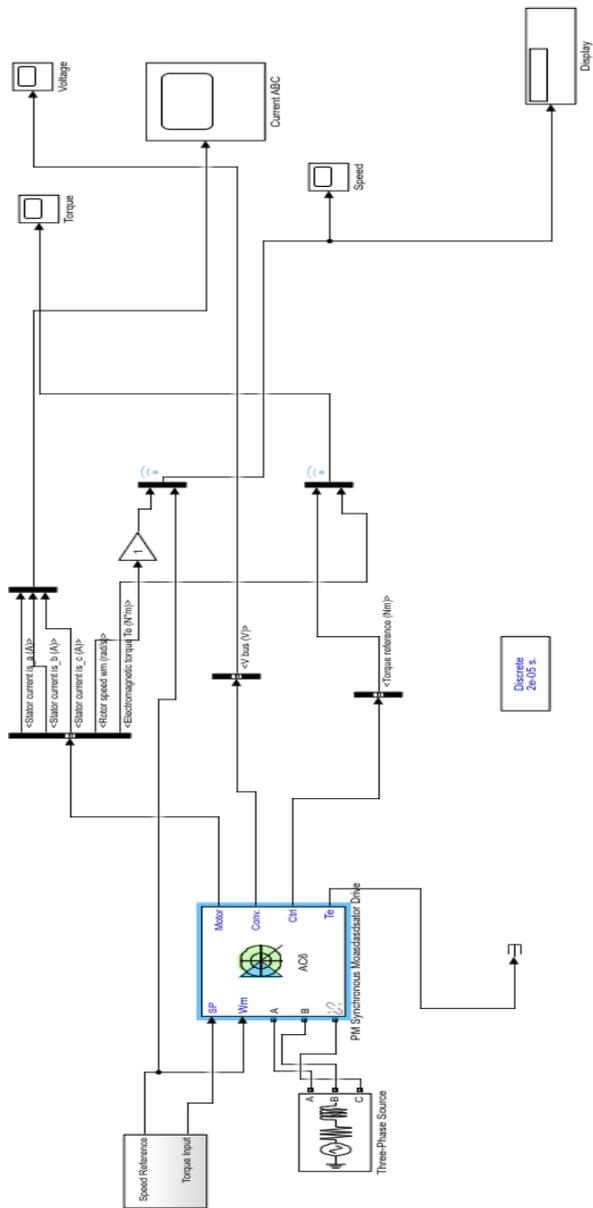
supaya sinyal pengendalian dapat dibaca oleh motor PMSM. Sinyal pengendalian yang dimasukkan kedalam inverter didapatkan dari blok SVPWM. Didalam block Simulink, blok sudah memiliki fungsi switching, sehingga pulsa yang keluar dari blok FOC akan diteruskan menuju inverter. Nilai switching diketahui melalui pengukuran arus ABC dan posisi fluks rotor. Proses ini dilakukan di blok FOC dan blok speed controller. Pada speed controller, torsi motor akan diatur dengan membandingkan data pengukuran kecepatan putar motor dengan setpoint yang ditentukan. Block inverter pada simulasi membutuhkan sumber DC yang nantinya akan dirubah menjadi arus AC. Sumber DC dihasilkan dari blok three-phase diode rectifier. Sehingga sistem secara keseluruhan didapatkan seperti Gambar 3.11.

3.2.7 Pemasangan block input dan output pada sistem pengendalian kecepatan motor PMSM

Input sistem adalah nilai kecepatan dan torsi. Variable yang dirubah adalah kecepatan motor dengan menggunakan fungsi pulse generator dengan variasi waktu dan speed yang diinginkan. Ouput sistem dengan memberikan sensor dibagian pin control, motor dan converter. Respon sistem kemudian diamati melalui blok scope. Adapun parameter yang diamati adalah kecepatan putar motor, torsi motor, arus ABC dan tegangan DC-link. Pada bagian setpoint dan torsi referensi diletakkan blok pulse generator untuk mengatur nilai setpoint. Sehingga didapatkan block lengkap sistem pengendalian motor field-oriented control pada Gambar 3.12



Gambar 3.11 Simulink Field-Oriented Control



Gambar 3.12 Simulink Sistem Pengendalian Kecepatan FOC

3.3 Desain Rancang Bangun Field-Oriented Control

Rancang bangun field-oriented control merupakan tahapan kedua dalam penelitian tugas akhir ini. Pada tahap ini, dibuat sistem pengendalian kecepatan motor dalam bentuk rangkain listrik yang dapat memberikan masukan dan keluaran pada motor PMSM. Tahapan penelitian rancang bangun ini ditunjukkan pada diagram alir di Gambar 3.13.

3.3.1 Setup Rancang Bangun

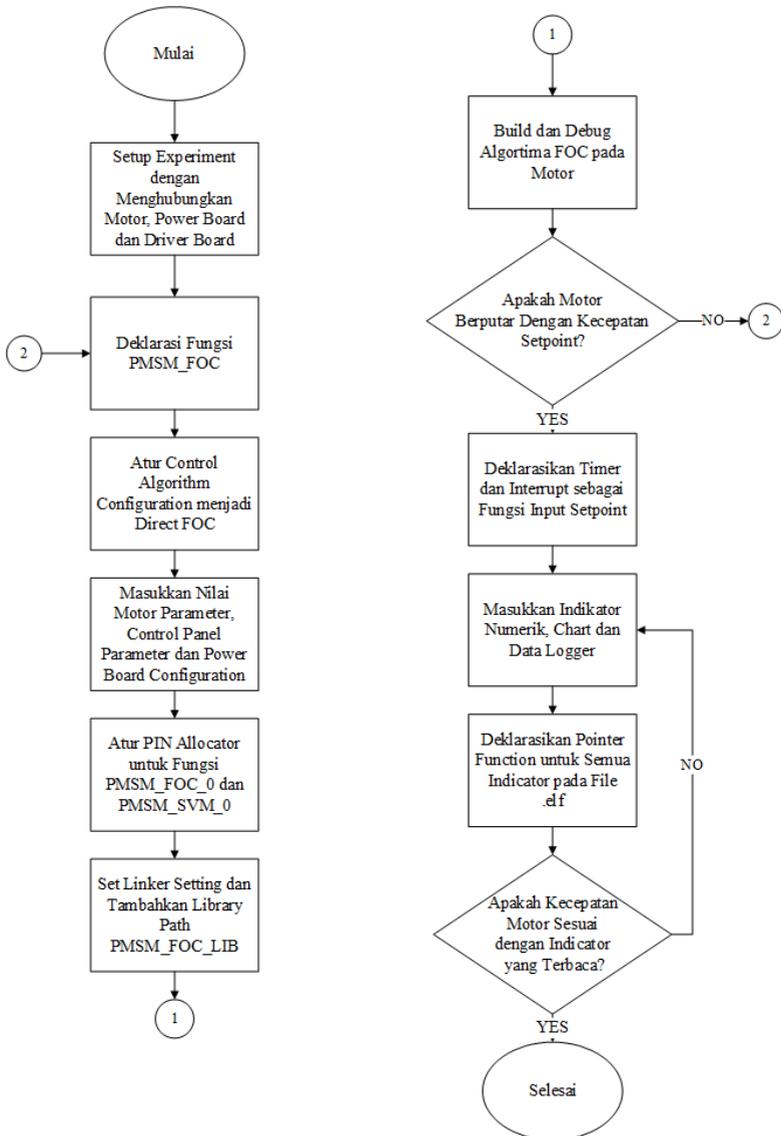
Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan pada MATLAB/SIMULINK diperlukan komponen inverter, speed controller, rectifier dan pengukur tegangan serta arus. Pada penelitian tugas akhir ini digunakan dua komponen untuk mendiskripsika fungsi yang sama dengan komponen pada MATLAB/SIMULINK, yaitu

a. Eval Board M1-1302

Rangkaian elektronik ini bertujuan sebagai speed controller dan pusat kendali dari masukan yang akan diberikan pada motor PMSM. Mikrocontroller yang digunakan pada M1-1302 adalah XMC1300.

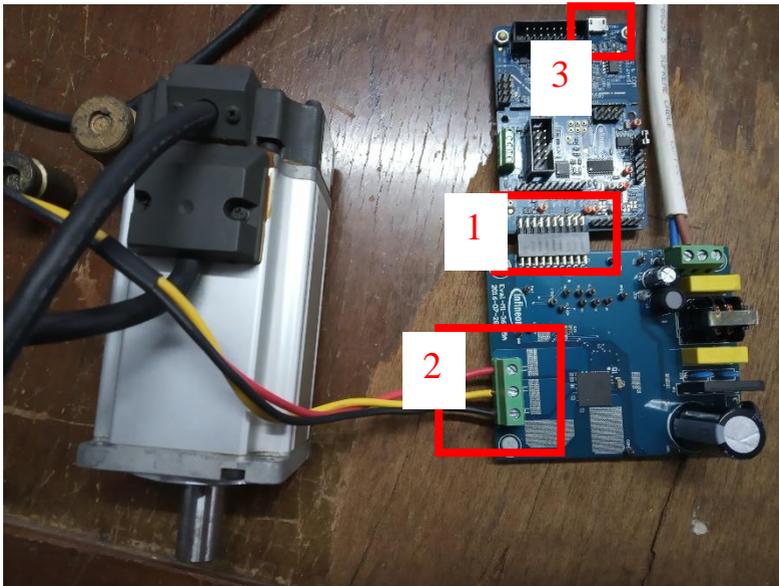
b. Eval Board M1-36-45A

Rangkaian elektronik ini berfungsi sebagai power inverter sistem. Rangkaian inverter, rectifier, pengukur tegangan dan arus serta output keluaran untuk menghubungkan sistem dengan motor terdapat di dalam board ini. Rangkaian ini dikendalian oleh driver inverter berseri CIPOS.



Gambar 3.13 Diagram Alir Penelitian Rancang Bangun

Kedua Eval Board dihubungkan menggunakan power connector. Motor PMSM tiga fasa disambungkan pada AC-line connector (J1) di Eval Board M1-36-45. Sedangkan kontroller XMC1300 yang terdapat pada eval board M1-1302 disambungkan ke computer untuk diberikan perintah melalui USB J-Link Segger (Gambar 3.14)



Gambar 3.14 Set-up Power Board dan XMC1300

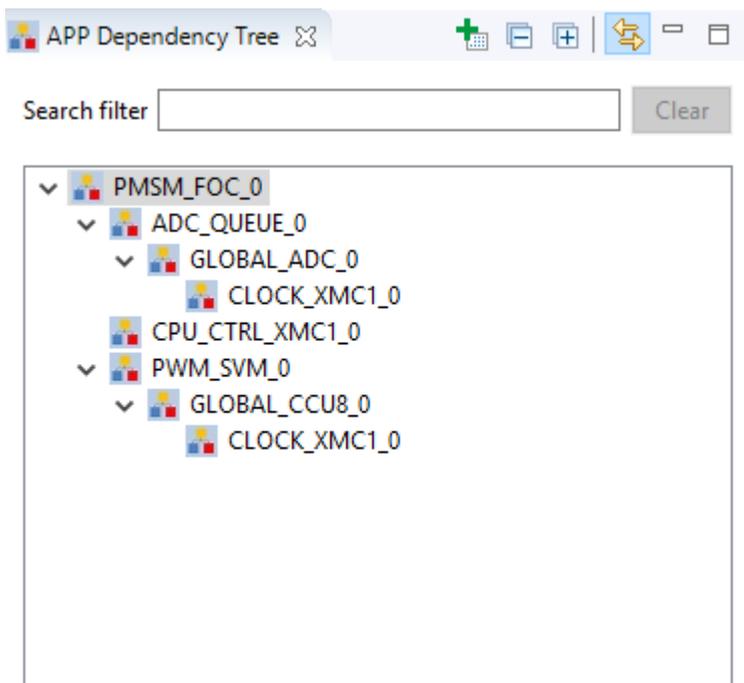
Keterangan Gambar :

1. Power Connector
2. AC-Line Connector (J1)
3. USB J-Link Segger

3.3.2 Deklarasi Fungsi PMSM_FOC

Tahapan ini dilakukan pada software Infineon DAVE 4.4.2 Software ini merupakan IDE (Integrated Development Environment) C/C++ pada mikrokontroler bertipe ARM. Pada tugas akhir ini digunakan XMC1300 yang merupakan mikrokontroler bertipe ARM-Cortex M0.

Ketika DAVE sudah dijalankan, deklarasikan tipe mikrokontroler yang akan digunakan. Kemudian deklarasikan algoritma pengendalian yang diimplementasikan pada board Eval M1-1302. Algoritma dinyatakan dalam PMSM_FOC pada Apps Dependency Tree (Gambar 3.13).



Gambar 3.15 PMSM_FOC pada Apps Dependency Tree

3.3.3 Mengatur Algoritma FOC

Fungsi PMSM_FOC diatur konfigurasi parameter algoritma control. Pada tugas akhir ini, konfigurasi motor sebagai berikut (Gambar 3.14).

- Start-up technique : Direct FOC Startup
- Control scheme : Speed Control
- Berikan tanda centang pada Vd-Vq decoupling

Control Algorithm Configuration

Control technique: Field Oriented Control

Startup technique: Direct FOC Startup

Feedback mechanism: Sensorless

Control scheme: Speed Control

Vd-Vq decoupling

Gambar 3.16 Control Algorithm Configuration

3.3.4 Memasukkan Nilai Parameter

Parameter yang diisi pada PMSM_FOC adalah parameter kontrol, parameter motor, konfigurasi kecepatan motor dan konfigurasi power board.

Nilai parameter motor ini ditentukan oleh datasheet motor. Nilai parameter kontrol dipilih arah positive untuk putaran searah jarum jam. Parameter ini nantinya bisa dirubah sesuai dengan kaingin user. Akselerasi naik dan turun sebesar 500 RPM/detik. Nilai ramp pada driver terbatas sampai 5600 RPM. Hal ini dikarenakan daya maksimal yang dapat dikeluarkan driver untuk mensupply arus pada stator PMSM sebesar 80 Watt.

Nilai setpoint motor 1000 RPM. Pada power board configuration, nilai yang ditentukan oleh tugas akhir ini adalah DC-Link Voltage sebesar 24 VDC. Sedangkan nilai diluar itu diatur sesuai dengan basis program Infineon DAVE. Adapun nilai parameter pada Gambar 3.15-3.18.

Control Panel Parameters	
Motor direction:	U->V->W (Positive) ▾
Startup speed [rpm]:	0
Ramp up rate [rpm/s]:	500
Ramp down rate [rpm/s]:	500

Gambar 3.17 Parameter Kontrol

Motor Parameters	
Nominal voltage [V]:	24
No load speed [rpm]:	5500
Motor resistance [Ohms]:	13.7
Motor inductance Ld [uH]:	7000
Motor inductance Lq [uH]:	7000
Pole pair:	2

Gambar 3.18 Parameter Motor

Speed Control Configuration

Speed set [rpm]:

Default User defined

Kp:

Ki:

Output limit Uk [%]:

Integral limit Ik [%]:

Gambar 3.19 Konfigurasi Kecepatan

Power Board Configuration

DC link voltage [V]:

Dead time rising edge [ns]:

Dead time falling edge [ns]:

Switch delay [ns]:

Inverter enable pin:

Bootstrap time [ms]:

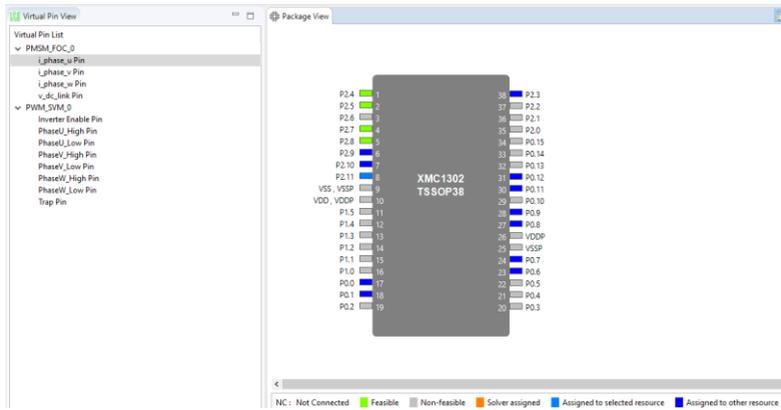
Gambar 3.20 Konfigurasi Power Board

3.3.5 Mengatur PIN Allocator

Tahap ini mengatur PIN *input* dan *output* mikrokontroler XMC1300. Input dan output didiskripsikan dalam bentuk fungsi PMSM_FOC dan PMSM_SVM. Tabel 3.2 dan Gambar 3.19 menunjukkan konfigurasi PIN dengan variable PMSM_FOC dan PMSM_SVM.

Tabel 3.2 Konfigurasi PIN Allocator

Fungsi	Variabel	PIN.Number
PMSM_FOC	i_phase_u	P2.11
	i_phase_v	P2.10
	i_phase_w	P2.9
	v_dc_link	P2.3
PMSM_SVM	Inverter Enable	P0.11
	PhaseU_High	P0.0
	PhaseU_Low	P0.1
	PhaseV_High	P0.7
	PhaseV_Low	P0.6
	PhaseW_High	P0.8
	PhaseW_Low	P0.9
	Trap	P0.12

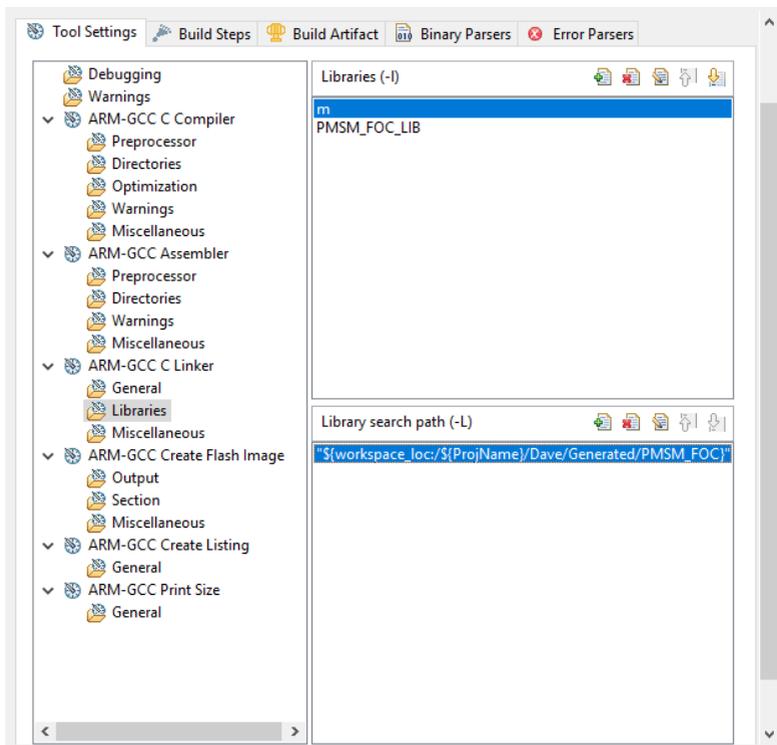


Gambar 3.21 Konfigurasi PIN pada PIN Allocator

3.3.6 Atur Library Path

Library path dibutuhkan karena program yang akan didebug pada Eval M1-1302 tidak akan bekerja tanpa adanya perintah dari PMSM_FOC. Adapun tahapan dari pengaturan library path sebagai berikut:

- a. Buka Project -> Active Project Properties.
- b. Buka Folder C++ Builder dengan subfolder Settings
- c. Isi Libraries (-i) dengan PMSM_FOC_LIB
- d. Isi Library search path (-L) dengan "`${workspace_loc}/${ProjName}/Dave/Generated/PMSM_FOC`" (Gambar 3.20)



Gambar 3.22 Library Path PMSM_FOC_0

3.3.7 Deklarasi Timer dan Interrupt

Timer dan interrupt digunakan untuk memberikan perintah prioritas pada saat eval board M1-1302. Pada tugas akhir ini, timer dan interrupt untuk membaca dan mengatur kecepatan motor PMSM. Deklarasi dua fungsi ini dilakukan pada Apps Dependency Tree. Adapun tahapan deklarasi fungsi ini sebagai berikut.

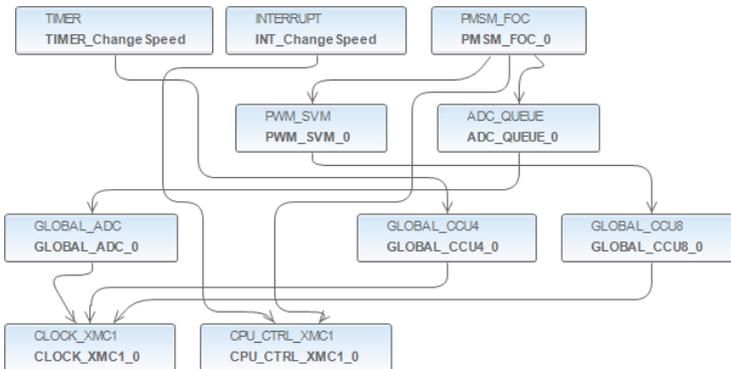
- a. Berikan centang bintang pada “enable interrupt at initialization”
- b. Interrupt priority diberikan nilai 3 pada preemption priority
- c. Interrupt handler didefinisikan changeSpeed

- d. Select timer module “CCU4”
- e. Timer Settings diberikan nilai time interval 50000000 μ s
- f. Berikan tanda centang pada “Start after initialization”
- g. Berikan tanda centang pada “Time internal event”
- h. Atur HW Signal Connection pada Timer_ChangeSpeed dengan menambahkan source signal “event_time_interval”. Target APP Instance Name diatur menjadi interrupt_0 dan target signal sr_irq seperti Gambar 3.23

Source Signal	Connect To	Target APP Instance Name	Target Signal
event_time_interval	---->	INTERRUPT_0	sr_irq
Not Selected	---->	Not Selected	Not Selected

Gambar 3.23 HW Signal Connection pada TIMER_0

- i. Apps dependency tree akhir menjadi seperti Gambar 3.22



Gambar 3.24 Apps Dependency Tree

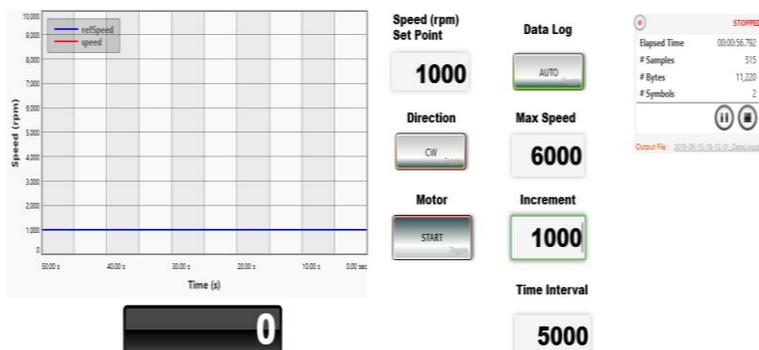
3.3.8 Membuat Indikator Numerik, Chart dan Data Logger

Indicator bertujuan untuk melihat respon dari sistem pengendalian. Bentuk indicator yang digunakan berbasis software

interface. Software yang digunakan untuk menampilkan respon sistem pengendalian adalah micrium uC-probe. Pada tugas akhir ini toolbox yang digunakan adalah chart dan data logger. Selain itu, diberikan juga fungsi input berupa indicator numerik. Ketika chart, data logger dan indicator sudah dimasukkan dalam worksheet uC-probe dilakukan konfigurasi symbol. Tujuan konfigurasi ini untuk membuat pointer respon kepada direktori yang dituju. Adapun konfigurasinya seperti Tabel 3.3. Worksheet lengkap dari ketiga indicator ditunjukkan pada Gambar 3.23.

Tabel 3.3 Konfigurasi symbol pointer uC-Probe

Indikator	Symbol pointer
Chart	ActualSpeed dan RefSpeed
Data Logger	ActualSpeed dan RefSpeed
Numerik	RefSpeed



Gambar 3.25 Worksheet Indicator uC-Probe

3.4 Pengujian dan Pengambilan Data

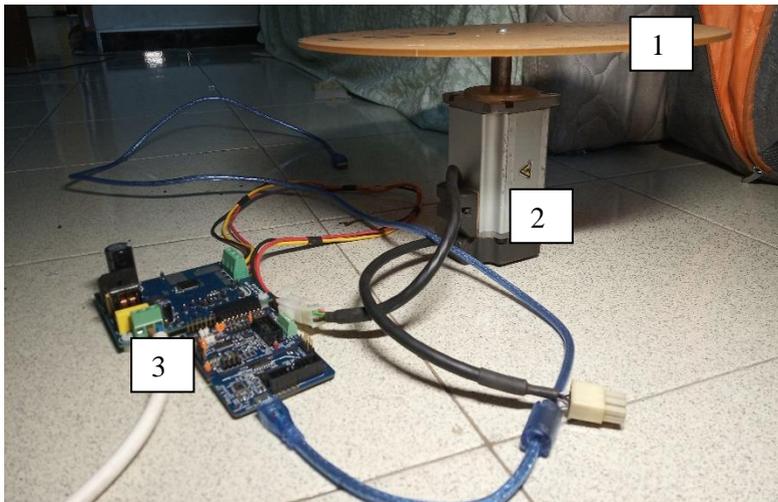
Tahap penelitian ini dilakukan setelah simulasi dan rancang bangun sistem pengendalian telah dicapai. Tahap simulasi berhasil jika respon yang diberikan memiliki karakteristik transient nilai settling time dan profil respon transient yang tidak menghasilkan chattering. Sedangkan, tahap rancang bangun berfokus pada algoritma yang ditanam

Tabel 3.4 Variasi Pengujian Simulasi dan Rancang Bangun

Percobaan ke	Kecepatan Setpoint (RPM)	Beban
1	1000	0 N
2	2000	
3	3000	
4	4000	
5	1000	2 N
6	2000	
7	3000	
8	4000	
9	1000	4 N
10	2000	
11	3000	
12	4000	

Pada pengujian dan pengambilan data dilakukan metode komparasi antara simulasi dan rancang bangun. Nilai kecepatan referensi yang akan diujikan pada sistem ditampilkan pada Tabel 3.4. Nilai kecepatan yang digunakan adalah fungsi step terhadap kecepatan setpoint. Kecepatan awal dan akhir adalah 0 RPM. Variabel tambahan yang akan diuji pada sistem adalah penambahan beban yang akan dilihat variasi daya pada motor PMSM.

Skematik pengujian racang bangun dijelaskan pada Gambar 3.26. Motor PMSM disambungkan pada driver motor kit, yaitu Eval M1-36-45A dan Eval M1-1302. Kemudian bagian ujung rotor dari motor PMSM disambungkan pada beban.



Gambar 3.26 Model Pengujian Beban

Keterangan Gambar:

1. Beban
2. Motor PMSM
3. Driver Kit Motor, tersusun dari Eval M1-36-45A dan Eval M1-1302

3.5 Penulisan Laporan Akhir

Setelah semua tahapan penelitian sudah selesai, laporan akhir dibuat.

BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas tentang data yang didapatkan berdasarkan hasil simulasi dan pengambilan data dari rancang bangun sistem pengendalian menggunakan Eval Board M1-1302. Pengujian menggunakan variable yang terdapat pada Tabel 3.4.

4.1 Analisa Data

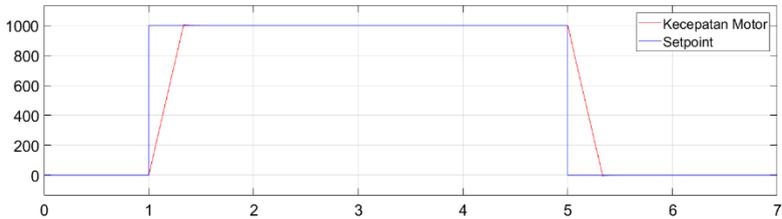
Data yang didapatkan dari hasil simulasi dan pengujian rancang bangun adalah performa sistem pengendalian kecepatan motor PMSM. Performa sistem ditampilkan dalam bentuk respon kecepatan motor terhadap input kecepatan yang diberikan. Input kecepatan yang digunakan berupa step up dan step down. Tujuan dari penggunaan input tersebut untuk melihat kemampuan sistem jika simpangan input yang diberikan semakin besar apakah kemampuannya akan tetap stabil atau tidak.

4.1.1 Hasil Simulasi

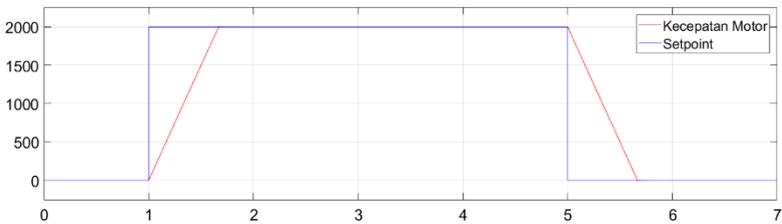
Berdasarkan tabel 3.4, variasi kecepatan dan beban diberikan pada simulasi. Parameter yang teramati melalui simulasi adalah kecepatan motor, torsi motor dan arus ABC kontrol pada motor. Pada bab ini, ditampilkan hasil simulasi berupa perubahan kecepatan motor terhadap setpoint. Torsi motor dan arus ABC control pada motor ditampilkan pada lampiran.

Gambar 4.1- 4.4 menunjukkan respon kecepatan saat setpoint 1000-4000 RPM tanpa beban. Karakteristik respon yang didapatkan berupa nilai rise time yang berbanding lurus dengan kenaikan nilai setpoint. Saat setpoint bernilai 1000, rise time yang didapatkan adalah 0.35 detik.

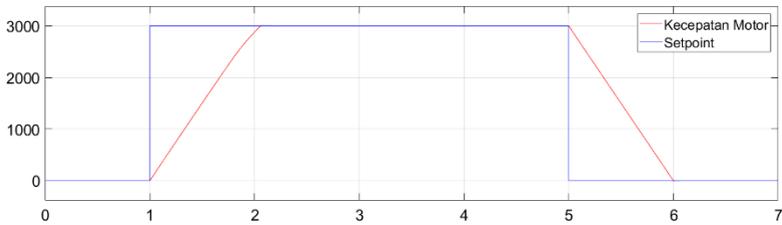
Untuk setpoint 2000 RPM, rise time senilai 0.75 detik. Untuk setpoint 3000 RPM, rise time bernilai 1 detik. Sedangkan setpoint 4000 RPM, rise time bernilai 1.5 detik Overshoot dari setiap variasi setpoint memiliki nilai +0.7% dari setpoint. Profil kecepatan saat kondisi transient dan steady baik, karena tidak ada chattering.



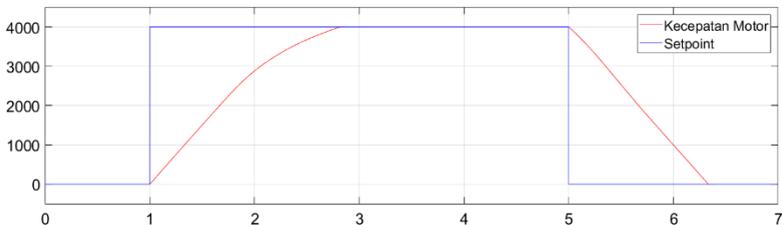
Gambar 4.1 Respon Kecepatan Setpoint 1000 RPM Tanpa Beban



Gambar 4.2 Respon Kecepatan Setpoint 2000 RPM Tanpa Beban



Gambar 4.3 Respon Kecepatan Setpoint 3000 RPM Tanpa Beban



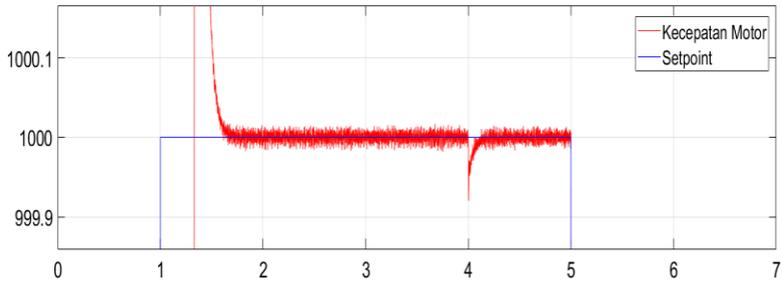
Gambar 4.4 Respon Kecepatan Setpoint 4000 RPM Tanpa Beban

Variasi kedua yang ingin diamati dari simulasi adalah penambahan beban. Penambahan beban akan mempengaruhi daya motor. variasi pertama dengan memberikan beban 2N. Beban ini memiliki lengan sepanjang 13 cm. Sehingga nilai torsi yang dibutuhkan sebagai berikut.

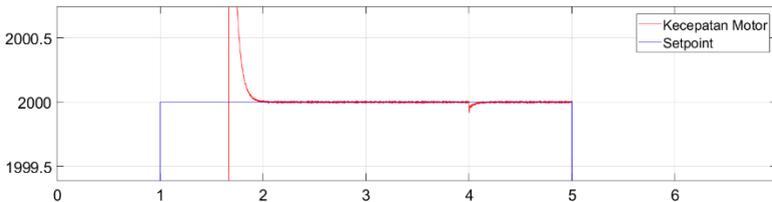
$$\begin{aligned}\tau &= F \times r \\ \tau &= m \times g \times r \\ \tau &= 2 \times 13 \times 10^{-2} \\ \tau &= 26 \times 10^{-2} \text{ Nm}\end{aligned}$$

Hasil dari simulasi ini ditunjukkan dari Gambar 4.5 – 4.8. Pada Gambar 4.5 – 4.8, setpoint yang diberikan sama dengan tanpa

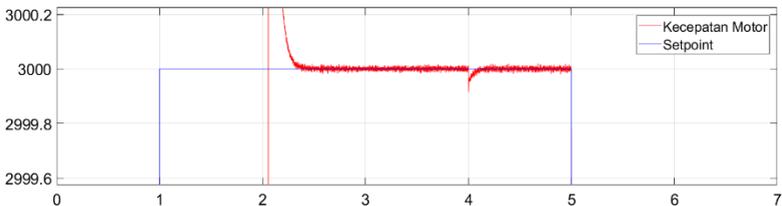
beban yaitu 1000 RPM – 4000 RPM. Respon yang diperoleh terhadap penurunan kecepatan sebesar -0.05% RPM setpoint. Sedangkan kondisi rise time baik dari step up maupun step down masih sama dengan kondisi tanpa beban. Profil respon transient dan steady tidak menghasilkan chattering.



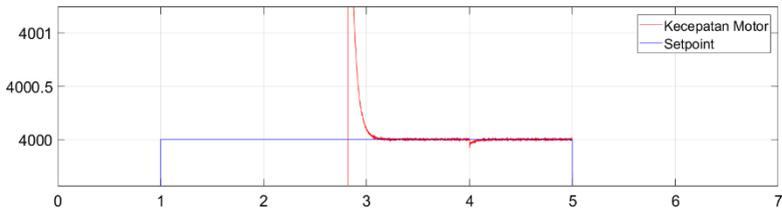
Gambar 4.5 Respon Kecepatan Setpoint 1000 RPM Beban 2N



Gambar 4.6 Respon Kecepatan Setpoint 2000 RPM Beban 2N



Gambar 4.7 Respon Kecepatan Setpoint 3000 RPM Beban 2N



Gambar 4.8 Respon Kecepatan Setpoint 4000 RPM Beban 2N

Variasi kedua dengan menambahkan beban menjadi 4N. Lengan beban yang digunakan sama dengan variasi pertama yaitu 13 cm. Sehingga perubahan torsi yang terjadi pada sistem sebagai berikut.

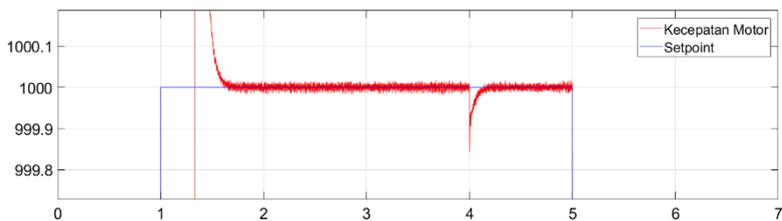
$$\tau = F \times r$$

$$\tau = m \times g \times r$$

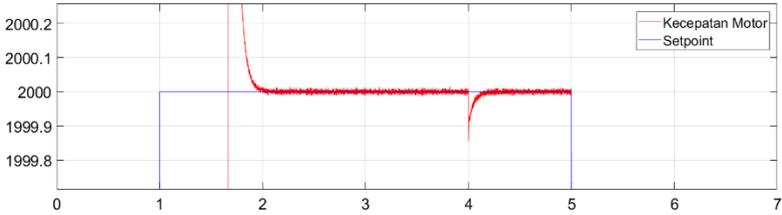
$$\tau = 4 \times 13 \times 10^{-2}$$

$$\tau = 52 \times 10^{-2} \text{ Nm}$$

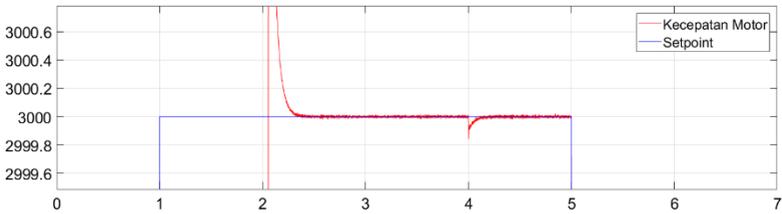
Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 4.9 – 4.12 dengan kecepatan setpoint 1000 – 4000 RPM. Nilai yang didapatkan berupa kondisi transient yang baik tanpa chattering. Sedangkan pada kondisi steady terdapat chattering pada saat pemberian beban. Nilai kecepatan berubah sebesar ± 0.002 dari setpoint.



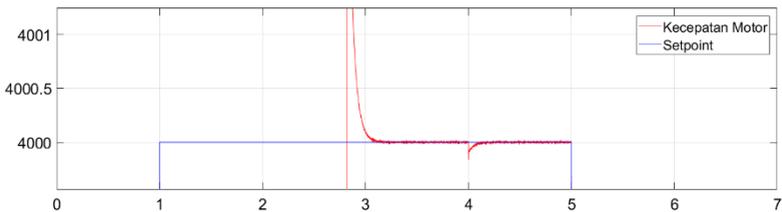
Gambar 4.9 Respon Kecepatan Setpoint 1000 RPM Beban 4N



Gambar 4.10 Respon Kecepatan Setpoint 2000 RPM Beban 4N



Gambar 4.11 Respon Kecepatan Setpoint 3000 RPM Beban 4N



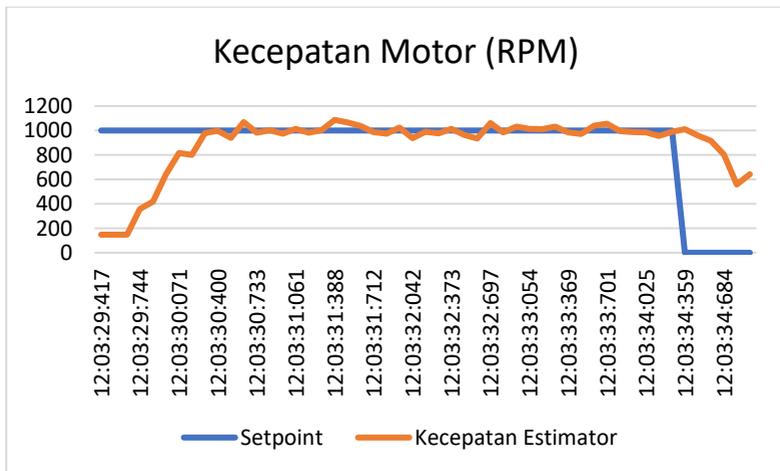
Gambar 4.12 Respon Kecepatan Setpoint 4000 RPM Beban 4N

4.1.2 Hasil Pengujian Rancang Bangun

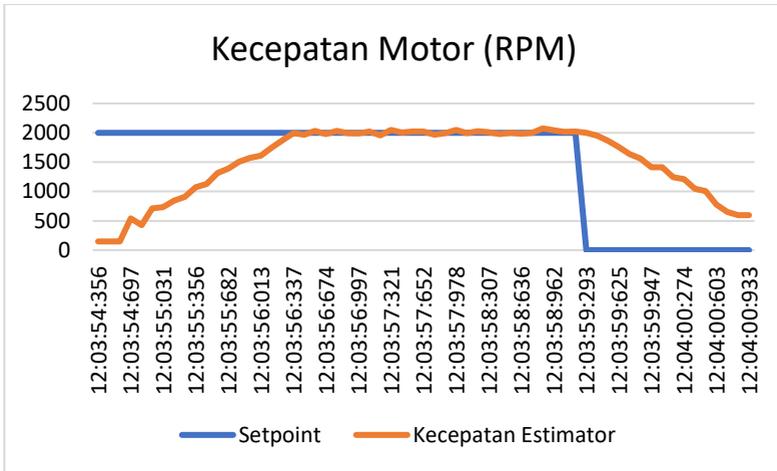
Pengujian rancang bangun dilakukan dengan memberikan setpoint kecepatan 1000-4000 RPM. Pembacaan kecepatan menggunakan interface uC-probe dengan menggunakan estimator kecepatan. Fungsi estimator telah terdapat dalam fungsi PMSM_FOC pada Infineon Dave. Gambar 4.13 – 4.16 menunjukkan hasil dari pengujian. Rise time yang didapatkan oleh

sistem pada setpoint 1000 RPM selama 0.977 detik. Profil respon saat transient dan steady masih terlihat chattering tapi tidak harmonik.

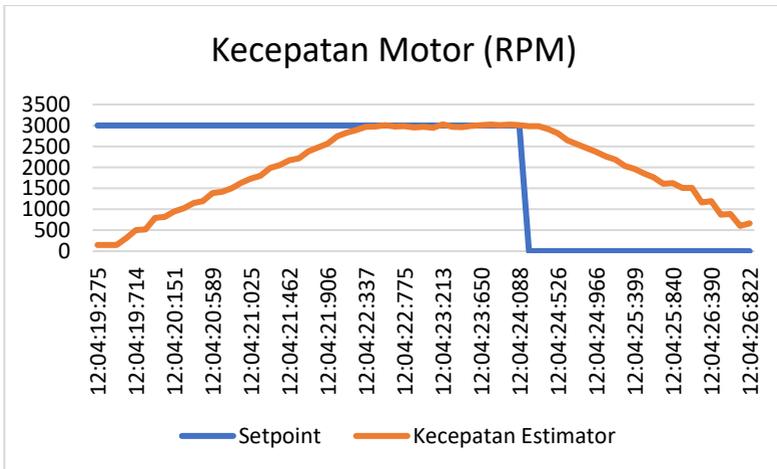
Setpoint 2000 RPM, rise time yang didapat sebesar 2.007 detik. Untuk setpoint ini, kondisi saat steady lebih stabil daripada setpoint 1000 RPM. Pada 0.554 detik setelah step down, respon transient memiliki performa tanpa chattering. Setpoint 3000 RPM, rise time sebesar 2.137 detik dan setpoint 4000 RPM rise time sebesar 4.067 detik. Kondisi transient saat step down untuk RPM 3000 memiliki karakteristik yang sama dengan RPM 2000 dimana respon tidak menghasilkan chattering. Nilai overshoot tertinggi berada sebesar +2.4% dari setpoint.



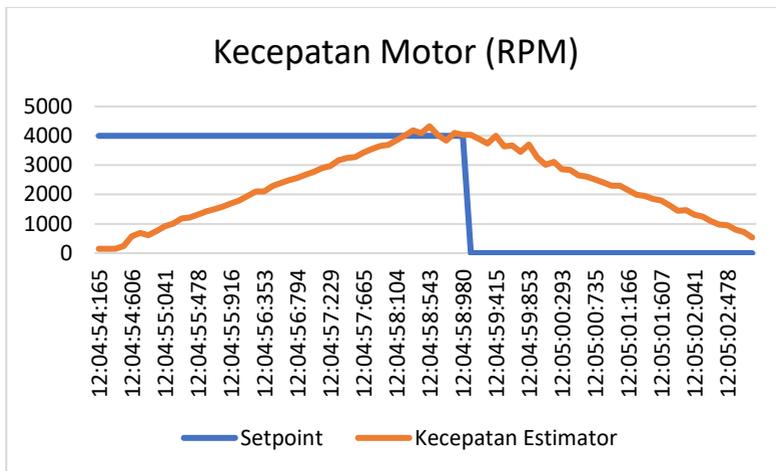
Gambar 4.13 Respon Rancang Bangun Setpoint 1000 RPM Tanpa Beban



Gambar 4.14 Respon Rancang Bangun Setpoint 2000 RPM Tanpa Beban



Gambar 4.15 Respon Rancang Bangun Setpoint 3000 RPM Tanpa Beban



Gambar 4.16 Respon Rancang Bangun Setpoint 4000 RPM Tanpa Beban

4.2 Pembahasan

Hasil dari simulasi dan pengujian rancang bangun ditunjukkan pada sub bab 4.1. Berdasarkan grafik pada Gambar 4.4, respon yang diberikan menunjukkan performa sesuai dengan penelitian sebelumnya. Karakteristik tidak ada chattering pada kondisi transient dan steady telah dicapai. Selain itu nilai rise time tidak mencapai 1 detik pada setpoint kecepatan 1000 RPM menandakan bahwa simulasi telah sesuai.

Jika dikomparasi dengan hasil rancang bangun, rise time untuk kecepatan 1000 RPM diperlukan waktu 0.977 detik masih dibawah simulasi. Tetapi nilai ini masih dibawah 1 detik. Selama kondisi transient sistem control tidak sepenuhnya berupa garis lurus, masih terdapat chattering. Tetapi nilai chattering tidak harmonik. Nilainya cenderung datar dan kemudian naik untuk mencapai setpoint. Hal ini dikarenakan estimator memiliki kelemahan dalam pembacaan arus yang memiliki waktu sampling sampai milidetik. Peningkatan setpoint kecepatan mempengaruhi rise time dari setpoint tersebut juga didapatkan dalam penelitian

ini. Baik simulasi maupun rancang bangun memiliki karakteristik rise time yang sama.

Pada variable penambahan beban terdapat perbedaan hasil antara rancang bangun dan simulasi. Simulasi menunjukkan performa yang dapat diukur. Sedangkan pada rancang bangun, sistem pengendalian tidak dapat melakukan pengendalian. Hal ini dikarenakan kemampuan power board pada Eval Board M1-36-45A yang tidak mampu memberikan arus control yang dapat menggerakkan motor pada torsi 26×10^{-2} dan 52×10^{-2} Nm.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan rancang bangun dan analisa data yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa:

- a. Sistem pengendalian *field-oriented control* dapat menghilangkan chattering selama kondisi transient dan steady berdasarkan simulasi. Karakteristik respon yang didapatkan pada setpoint 1000 – 4000 RPM yaitu rise time sebesar 0.35 detik; 0.75 detik; 1 detik dan 1.5 detik
- b. Rancang bangun sistem pengendalian dengan algoritma *field-oriented control* menunjukkan performa untuk setpoint 1000 - 4000 RPM dengan nilai rise time 0.977; 2.007; 2.137; 4.063 detik.
- c. Variasi daya pada motor AC tipe PMSM dapat diamati pada simulasi tetapi tidak pada rancang bangun. Untuk simulasi daya motor tidak berpengaruh secara besar pada beban 2N dan 4N. Sedangkan pada rancang bangun tidak dapat diamati pengaruhnya.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. Arvianto and M. Rameli, "Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Metode Flux Vector Control Berbasis Self-Tuning PI," *J. Tek. ITS*, vol. 6, no. 2, 2017.
- [2] G. Kohlrusz and D. Fodor, "Comparison of Scalar and Vector Control Strategies of Induction Motors," *Hungarian J. Ind. Chem. Veszprém*, vol. 39, no. 2, pp. 265–270, 2011.
- [3] N. Sharma and V. K. Garg, "Impending Power Demand and Innovative Energy Paths A Comparative Analysis of Scalar and Vector Control of Induction Motor Drive," pp. 230–242.
- [4] A. Y. Yousef and S. M. Abdelmaksoud, "Review on Field Oriented Control of Induction Motor," no. 7, pp. 5–16, 2015.
- [5] Z. Mekrini and S. Bri, "Performance of an indirect field-oriented control for asynchronous machine," *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 8, no. 2, pp. 726–733, 2016.
- [6] F. Amin, E. Bin Sulaiman, W. M. Utomo, H. A. Soomro, M. Jenal, and R. Kumar, "Modelling and simulation of field oriented control based permanent magnet synchronous motor drive system," *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 6, no. 2, pp. 387–395, 2017.
- [7] D. A. Morales, "Motor Controller Simulation and Embedded Implementation for a Blood Pump," vol. 2014, pp. 561–565, 2014.
- [8] Sumitra. K, Suresh. M, and M. K. Giridharan, "PMSM

- Field Oriented Control using Svpwm for Control Moment Gyroscope (CMG),” *Int. J. Eng. Res.*, vol. V4, no. 08, 2015.
- [9] Y. Shi, “FIELD ORIENTED CONTROL OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR WITH THIRD-HARMONIC INJECTION PULSE WIDTH MODULATION TO REDUCE QUADROTORS’ SPEED RIPPLES,” *New Jersey’s Sci. Technol. Univ.*, p. 107, 2017.
- [10] H. Isaksson and P. Önnheim, “High Precision Positioning and Very Low Velocity Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor,” 2015.
- [11] C. Wirabuana, “Synchronous motor - Makalah Tenaga Listrik,” 2011.
- [12] A. Kronberg, “Design and Simulation of Field Oriented Control and Direct Torque Control for a Permanent Magnet Synchronous Motor with Positive Saliency,” p. 56, 2012.
- [13] I. P. Sutawinaya, “Pengembangan Model Fuzzy Mamdani Untuk Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa,” *Logic*, vol. 13, no. 2, pp. 74–79, 2013.
- [14] D. V. Muñoz, “Design , Simulation and Implementation of a PMSM Drive System,” *Master Thesis, Chalmers Univ. Technol. Sweden*, p. 75, 2011.
- [15] P. Stopa, “High Speed Field Oriented Control,” no. June, 2009.
- [16] Z. Shang, “Simulation and Experiment for Induction Motor Control Strategies,” p. 93, 2011.
- [17] R. Hutabalian and A. Hamzah, “Desain dan Analisa Inverter Tiga Fasa Dengan Metode SVPWM Sebagai Penggerak Motor Induksi Tiga Fasa Pada Aplikasi Sepeda

- Listrik,” vol. 3, no. 2, pp. 1–11, 2016.
- [18] N. Abdurahman, “Pulse Width Modulation,” 2014.
- [19] Anonim, “Chapter 3, Space Vector Pulse Width Modulation,” vol. 69, no. 6, pp. 423–438, 1997.
- [20] Anonim, “CHAPTER 4, SPACE VECTOR PULSE WIDTH MODULATION,” no. 2006, pp. 61–111, 2007.
- [21] I. T. Ag, “Eval-M1-1302,” 2016.
- [22] I. T. Ag, “EVAL-M1-05-65D EVAL-M1-05-65D,” 2016.
- [23] Shaaban, “EECC250 -Shaaban EECC250 -Shaaban #1 Lec # 20 Winter99 2-9-2000,” pp. 1–46.
- [24] U. Indonenesia, “Digital Signal Processing,” pp. 3–5.
- [25] J. L. Hennessy and M. Kaufmann, “Microcontrollers and DSPs,” 2000.
- [26] M. K. Kumar, “General Definition Computer, DSP, Microcontroller,” pp. 1–52, 2004.
- [27] K. Williston, “Microprocessors vs. DSPs : Fundamentals and Distinctions,” *Berkeley Des. Technol. Embed. Syst. Conf. San Fr. CA*, no. March, pp. 1–23, 2005.
- [28] M. Press, “ μ C / Probe Target Manual,” vol. 4, 2016.
- [29] M. Press, “ μ C / Probe User Manual,” vol. 4, 2016.
- [30] I. T. Ag, “Washing machine motor control solution with XMC™, IGBT, CoolSET™,” no. January, 2017.
- [31] I. T. Ag, “PMSM FOC motor control software using XMC™,” 2017.

LAMPIRAN 1

Program C/C++ Dave

```
#include <DAVE.h>

#define MOTOR_START          1
#define MOTOR_STOP           0
#define MOTOR_CW              1
#define MOTOR_CCW            -1
#define DATA_MANUAL         0
#define DATA_AUTO           1

uint32_t speed;
uint32_t refSpeed = 0;

bool motorStatus = 0;
int motorDirection = 1;

bool dataLog = 0;
uint32_t maxSpeed = 5000;
uint32_t increment = 1000;

uint32_t timeInterval = 5000; //time in mS (mili
second)

int main(void)
{
    DAVE_STATUS_t status;
    status = DAVE_Init();

    if(status != DAVE_STATUS_SUCCESS)
    {
        XMC_DEBUG("DAVE APPs initialization failed\n");

        while(1U)
        {
        }
    }
}
```

```

    }

    while(1U)
    {
        if (motorStatus == MOTOR_START && dataLog ==
DATA_MANUAL)
        {
PMSM_FOC_SetMotorDirection(&PMSM_FOC_0,
motorDirection);
            PMSM_FOC_SetEndSpeed(&PMSM_FOC_0,
refSpeed);
            PMSM_FOC_MotorStart(&PMSM_FOC_0);
        }
        else if (motorStatus == MOTOR_STOP)
        {
            PMSM_FOC_MotorStop(&PMSM_FOC_0);
        }
        speed = PMSM_FOC_GetMotorSpeed(&PMSM_FOC_0);
        TIMER_SetTimeInterval(&TIMER_ChangeSpeed,
timeInterval*100000U);
    }
}

Void changespeed (void){
    if (dataLog == DATA_AUTO && motorStatus ==
MOTOR_START)
    {
        if ((refSpeed + increment > maxSpeed) ||
(refSpeed + increment < 0))
        {
            increment -= (increment*2);
        }
        refSpeed += increment;
        PMSM_FOC_SetEndSpeed(&PMSM_FOC_0,
refSpeed);
        PMSM_FOC_MotorStart(&PMSM_FOC_0);
    }
    TIMER_ClearEvent(&TIMER_ChangeSpeed);
}

```

78

```
    TIMER_Clear(&TIMER_ChangeSpeed);  
}
```

LAMPIRAN 2 Datasheet XMC 1300

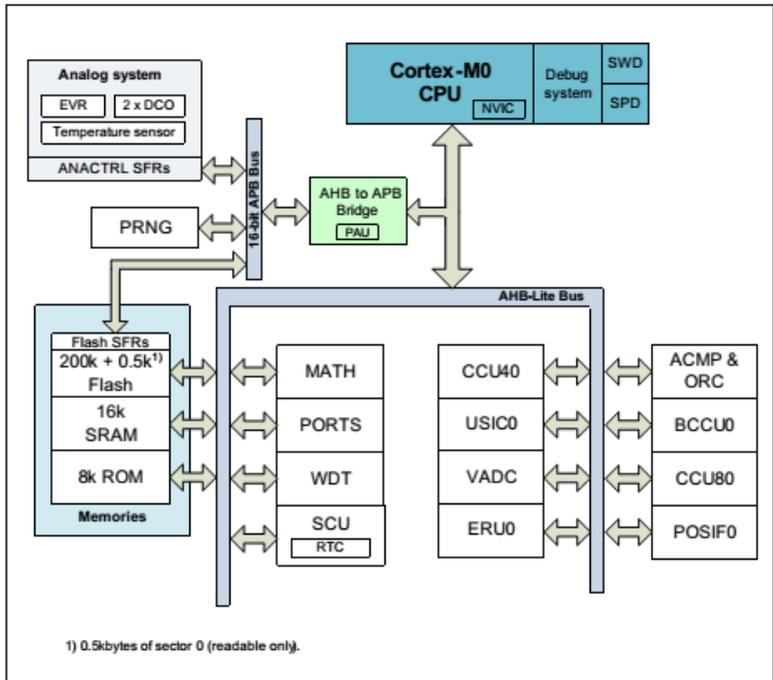


Figure 1 System Block Diagram

CPU Subsystem

- CPU Core
 - High-performance 32-bit ARM Cortex-M0 CPU
 - Most 16-bit Thumb and subset of 32-bit Thumb2 instruction set
 - Single cycle 32-bit hardware multiplier
 - System timer (SysTick) for Operating System support

- Ultra low power consumption
- Nested Vectored Interrupt Controller (NVIC)
- Event Request Unit (ERU) for processing of external and internal service requests
- MATH Co-processor (MATH)
 - CORDIC unit for trigonometric calculation
 - division unit

On-Chip Memories

- 8 kbytes on-chip ROM
- 16 kbytes on-chip high-speed SRAM
- up to 200 kbytes on-chip Flash program and data memory

Communication Peripherals

- Two Universal Serial Interface Channels (USIC), usable as UART, double-SPI, quad-SPI, IIC, IIS and LIN interfaces

Analog Frontend Peripherals

- A/D Converters
 - up to 12 analog input pins
 - 2 sample and hold stages with 8 analog input channels each
 - fast 12-bit analog to digital converter with adjustable gain
- Up to 8 channels of out of range comparators (ORC)
- Up to 3 fast analog comparators (ACMP)
- Temperature Sensor (TSE)

Industrial Control Peripherals

- Capture/Compare Units 4 (CCU4) as general purpose timers
- Capture/Compare Units 8 (CCU8) for motor control and power conversion
- Position Interfaces (POSIF) for hall and quadrature encoders and motor positioning
- Brightness and Colour Control Unit (BCCU), for LED color and dimming application

System Control

- Window Watchdog Timer (WDT) for safety sensitive applications
- Real Time Clock module with alarm support (RTC)
- System Control Unit (SCU) for system configuration and control
- Pseudo random number generator (PRNG) for fast random data generation

Input/Output Lines

- Tri-stated in input mode
- Push/pull or open drain output mode
- Configurable pad hysteresis

On-Chip Debug Support

- Support for debug features: 4 breakpoints, 2 watchpoints
- Various interfaces: ARM serial wire debug (SWD), single pin debug (SPD)

2.2 Pin Configuration and Definition

The following figures summarize all pins, showing their locations on the different packages.

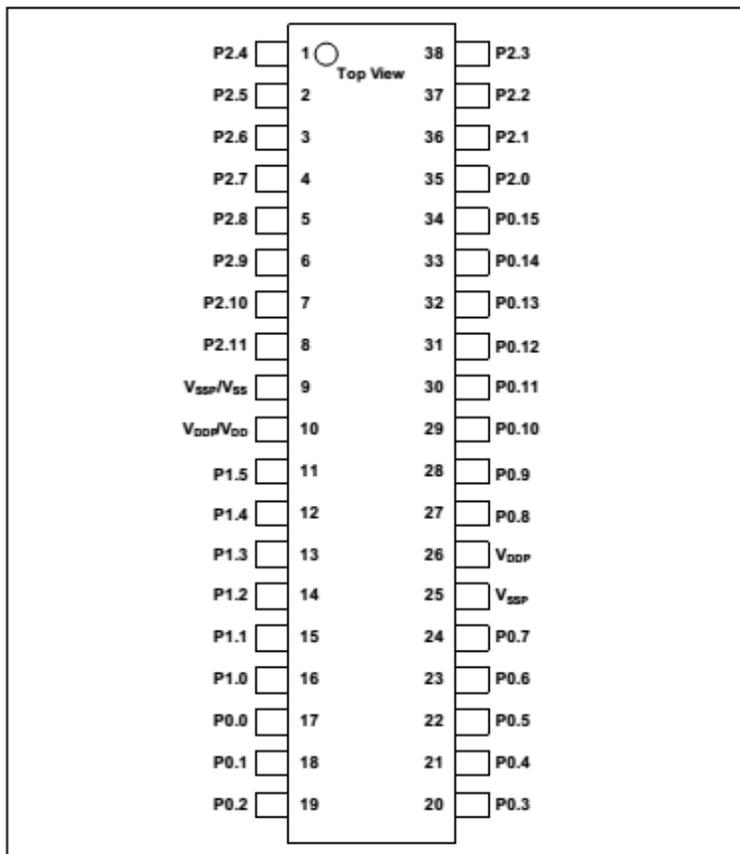


Figure 4 XMC1300 PG-TSSOP-38 Pin Configuration (top view)

1.1 Ordering Information

The ordering code for an Infineon microcontroller provides an exact reference to a specific product. The code "XMC1<DDD>-<Z><PPP><T><FFFF>" identifies:

- <DDD> the derivatives function set
- <Z> the package variant
 - T: TSSOP
 - Q: VQFN
- <PPP> package pin count
- <T> the temperature range:
 - F: -40°C to 85°C
 - X: -40°C to 105°C
- <FFFF> the Flash memory size.

For ordering codes for the XMC1300 please contact your sales representative or local distributor.

This document describes several derivatives of the XMC1300 series, some descriptions may not apply to a specific product. Please see [Table 1](#).

For simplicity the term **XMC1300** is used for all derivatives throughout this document.

Table 6 Package Pin Mapping

Function	VQFN 40	TSSOP 38	TSSOP 28	VQFN 24	TSSOP 16	Pad Type	Notes
P0.0	23	17	13	15	7	STD_IN OUT	
P0.1	24	18	-	-	-	STD_IN OUT	
P0.2	25	19	-	-	-	STD_IN OUT	
P0.3	26	20	-	-	-	STD_IN OUT	
P0.4	27	21	14	-	-	STD_IN OUT	
P0.5	28	22	15	16	8	STD_IN OUT	
P0.6	29	23	16	17	9	STD_IN OUT	

Table 6 Package Pin Mapping (cont'd)

Function	VQFN 40	TSSOP 38	TSSOP 28	VQFN 24	TSSOP 16	Pad Type	Notes
P0.7	30	24	17	18	10	STD_IN OUT	
P0.8	33	27	18	19	11	STD_IN OUT	
P0.9	34	28	19	20	12	STD_IN OUT	
P0.10	35	29	20	-	-	STD_IN OUT	
P0.11	36	30	-	-	-	STD_IN OUT	
P0.12	37	31	21	21	-	STD_IN OUT	
P0.13	38	32	22	22	-	STD_IN OUT	
P0.14	39	33	23	23	13	STD_IN OUT	
P0.15	40	34	24	24	14	STD_IN OUT	
P1.0	22	16	12	14	-	High Current	
P1.1	21	15	11	13	-	High Current	
P1.2	20	14	10	12	-	High Current	
P1.3	19	13	9	11	-	High Current	
P1.4	18	12	-	-	-	High Current	
P1.5	17	11	-	-	-	High Current	
P1.6	16	-	-	-	-	STD_IN OUT	
P2.0	1	35	25	1	15	STD_IN OUT/AN	

Table 6 Package Pin Mapping (cont'd)

Function	VQFN 40	TSSOP 38	TSSOP 28	VQFN 24	TSSOP 16	Pad Type	Notes
P2.1	2	36	26	2	-	STD_IN OUT/AN	
P2.2	3	37	27	3	-	STD_IN/ AN	
P2.3	4	38	-	-	-	STD_IN/ AN	
P2.4	5	1	-	-	-	STD_IN/ AN	
P2.5	6	2	28	-	-	STD_IN/ AN	
P2.6	7	3	1	4	16	STD_IN/ AN	
P2.7	8	4	2	5	1	STD_IN/ AN	
P2.8	9	5	3	5	1	STD_IN/ AN	
P2.9	10	6	4	6	2	STD_IN/ AN	
P2.10	11	7	5	7	3	STD_IN OUT/AN	
P2.11	12	8	6	8	4	STD_IN OUT/AN	
VSS	13	9	7	9	5	Power	Supply GND, ADC reference GND
VDD	14	10	8	10	6	Power	Supply VDD, ADC reference voltage/ ORC reference voltage
VDDP	15	10	8	10	6	Power	When VDD is supplied, VDDP has to be supplied with the same voltage.

Table 6 Package Pin Mapping (cont'd)

Function	VQFN 40	TSSOP 38	TSSOP 28	VQFN 24	TSSOP 16	Pad Type	Notes
VSSP	31	25	-	-	-	Power	I/O port ground
VDDP	32	26	-	-	-	Power	I/O port supply
VSSP	Exp. Pad	-	-	Exp. Pad	-	Power	Exposed Die Pad The exposed die pad is connected internally to VSSP. For proper operation, it is mandatory to connect the exposed pad to the board ground. For thermal aspects, please refer to the Package and Reliability chapter.

3.1.2 Absolute Maximum Ratings

Stresses above the values listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions may affect device reliability.

Table 9 Absolute Maximum Rating Parameters

Parameter	Symbol		Values			Unit	Note / Test Con- dition
			Min	Typ.	Max.		
Junction temperature	T_J	SR	-40	-	115	°C	-
Storage temperature	T_{ST}	SR	-40	-	125	°C	-
Voltage on power supply pin with respect to V_{SSP}	V_{DDP}	SR	-0.3	-	6	V	-
Voltage on digital pins with respect to V_{SSP} ¹⁾	V_{IN}	SR	-0.5	-	$V_{DDP} + 0.5$ or max. 6	V	whichever is lower
Voltage on P2 pins with respect to V_{SSP} ²⁾	V_{INP2}	SR	-0.3	-	$V_{DDP} + 0.3$	V	-
Voltage on analog input pins with respect to V_{SSP}	V_{AIN} V_{AREF}	SR	-0.5	-	$V_{DDP} + 0.5$ or max. 6	V	whichever is lower
Input current on any pin during overload condition	I_{IN}	SR	-10	-	10	mA	-
Absolute maximum sum of all input currents during overload condition	ΣI_{IN}	SR	-50	-	+50	mA	-

1) Excluding port pins P2.[1,2,6,7,8,9,11].

2) Applicable to port pins P2.[1,2,6,7,8,9,11].

LAMPIRAN 3

Datasheet Eval M1-1302

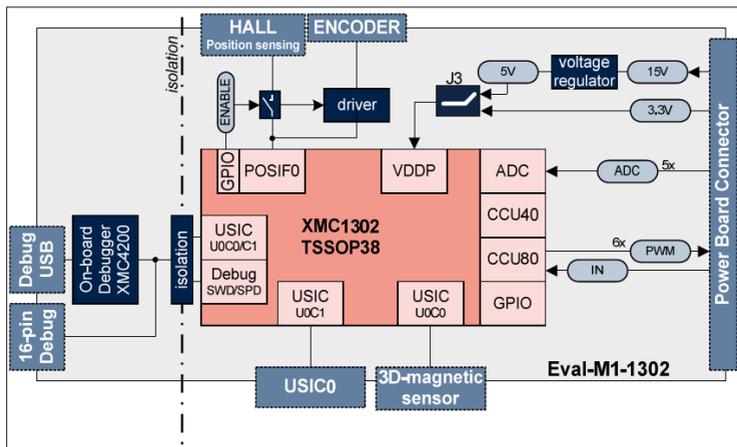


Figure 1 Block Diagram of the Eval-M1-1302

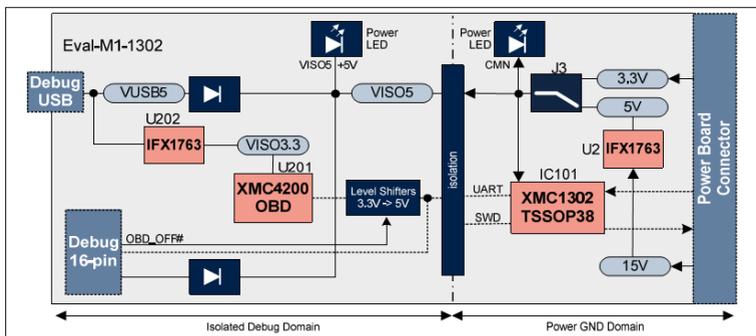


Figure 4 Block Diagram of the Power Supply Concept

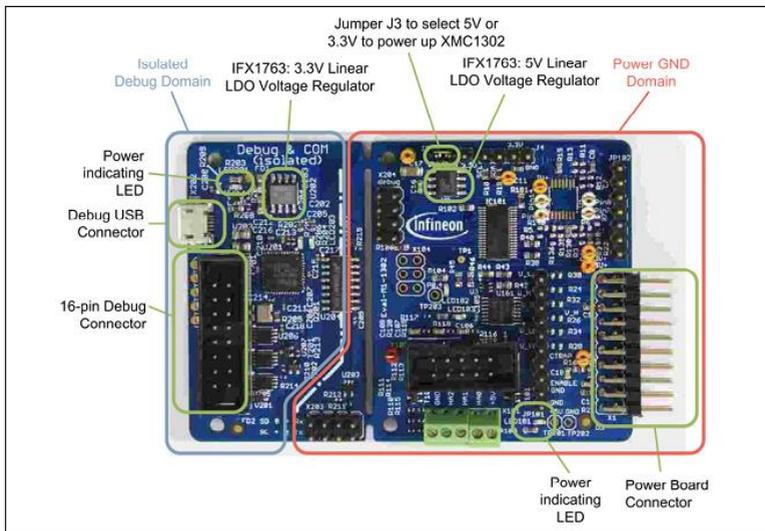


Figure 3 The two isolated power supply domains of Eval-M1-1302

2.3.2 8-pin Debug Connector

The Eval-M1-1302 supports debugging via SWD and SPD with the OBD as described in section 2.3.1. Please refer to Figure 6 for details on pin assignment.

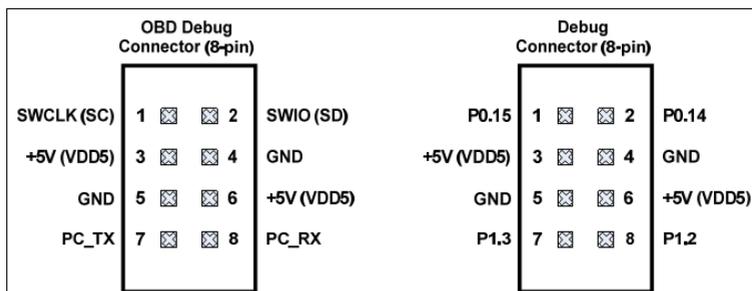


Figure 6 Pin assignment of the 8-pin debug connector

The default connections used in the Eval-M1_1302 are:

- Serial Wire Debug (SWD)
 - SWIO/SPD P0.14 (SWD0)
 - SWCLK P0.15 (SWD0)
- Full Duplex UART communication via a virtual COM port
 - PC_RXD P1.2 USIC0CH1.DOUT0
 - PC_TXD P1.3 USIC0CH1.DX0A

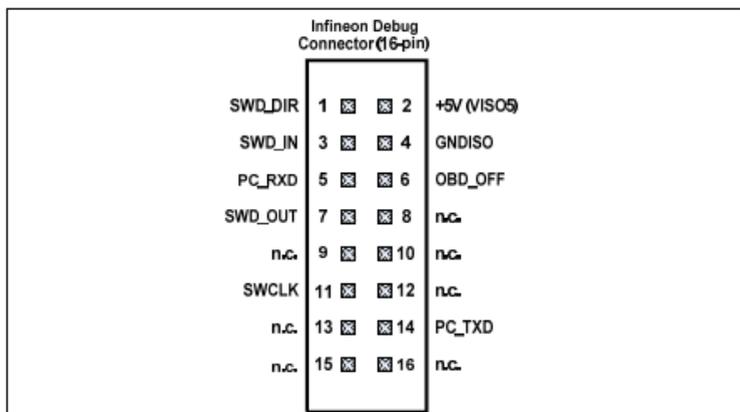


Figure 7 16-pin Debug Connector

Table 2 Pin out description of the Infineon Debug Connector, X201

Pin No.	Signal Name	I/O	Serial Wire Debug
1	SWD_DIR	O	Defines the direction of SWIO
2	+5V (VIS05)	-	+5V supply of isolated debug domain
3	SWD_IN	I	Input signal of SWIO
4	GNDISO	-	Ground of the isolated debug domain
5	PC_RXD	I	UART Receive signal (P1.3, DOUT0 USIC0, channel1)
6	OBD_OFF#	I	Disable on-board debug device (Low active)
7	SWD_OUT	O	Output signal of SWIO
8	n.c.	-	Not connected
9	n.c.	-	Not connected
10	n.c.	-	Not connected
11	SWCLK	O	SWD clock signal
12	n.c.	-	Not connected
13	n.c.	-	Not connected
14	PC_TXD	I	UART Transmit signal (P1.2, DX0A, USIC0, channel1)
15	n.c.	-	Not connected
16	n.c.	-	Not connected

LAMPIRAN 4

Datasheet Eval M1-36-45A

Table 4 EVAL-M1-36-45A board specifications

Parameters	Value	Conditions
Input		
Voltage	165 - 265 V _{rms}	lower AC input, less motor power output
Input current	1 A	input 220 V _{AC} , T _a =25°C, IRSM836-045MA
Output		
Power(3phases)	85 W**	IRSM836-045MA
Current per leg	500 mA*	IRSM836-045MA
	*RMS, f _{sw} =6 kHz, T _a =25°C, T _c =100°C, **without heatsink	
DC Bus		
Maximum DC bus voltage	400 V	
Minimum DC bus voltage	110V	
Current feedback		
Current sensing device RS1,RS2,RS3	0.25 Ω	The default configuration uses three shunts in the emitter paths. To implement single shunt sensing, the board should be modified: 1) RS1 and RS3 have to be removed 2) IU+,IV+,IW+ have to be connected 3) R7 has to be changed to 3.48 kΩ
Protections		
Output current trip level	2.5A _{pk}	Configured by changing either shunt resistors RS1, RS2, RS3 or comparator threshold by resistor R7
On board power supply		
15V	15 V±5 %, Max 20 mA	Used for CIPOS™ gate driver power
3.3V	3.3 V±5 %, Max 50 mA	Used for interface signal with control board and alarm signals as I _{TRIP} , FLT/EN
PCB characteristics		
Material	FR4, 1.6 mm thickness, 2-layers. 35 μm Copper thickness	
Dimension	90 mm x 75 mm	
System environment		
Ambient temperature	From 0 to 70°C	95 % RH max. Non-condensing

Table 7 J4 –iMOTION™ M1 20 pin interface connector to connect Eval-M1-36-45A to controller board

Pin	Name	Connectors
1	PWMUH	3.3 V compatible logic input for high side gate driver-Phase1
2	GND	Ground
3	PWMUL	3.3 V compatible logic input for low side gate driver-Phase1
4	GND	Ground
5	PWMVH	3.3 V compatible logic input for high side gate driver-Phase2
6	+3.3V	On board 3.3 V supply
7	PWMVL	3.3 V compatible logic input for low side gate driver-Phase2
8	+3.3V	On board 3.3 V supply
9	PWMWH	3.3 V compatible logic input for high side gate driver-Phase3
10	IU+	Shunt voltage phase U
11	PWMWL	3.3 V compatible logic input for low side gate driver-Phase3
12	IU-	Ground
13	GK	Gate kill signal – active low when over current is detected
14	DCBSENSE	DC bus positive voltage, scaled in 0-3.3 V range by a voltage divider
15	VTH	Thermistor Output
16	IV+	Shunt voltage phase V
17	IV-	Ground
18	IW+	Shunt voltage phase W
19	IW-	Ground
20	VCC	15 V Supply

Input signals are active high. Pull-down resistors are not inserted on the EVAL-M1-36-45A board and need to be assembled on control cards. iMOTION™ MADK control cards are already equipped with pull-down resistors.

1. Gate Kill signal (GK) is pulled low during over current condition. Chapter 6.3 explains the details of this circuit.

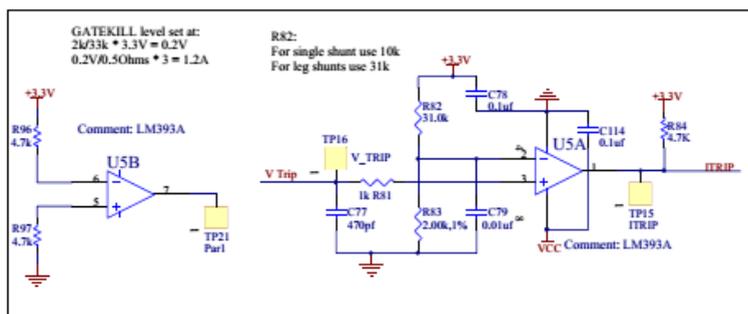


Figure 13 Over current protection circuit on the EVAL-M1-36-45A evaluation board

BIODATA PENULIS



Nama lengkap penulis Effran Rajagukguk dilahirkan di kota Pontianak pada tanggal 8 Oktober 1998 dari ayah bernama Arnold Rajagukguk dan ibu bernama Karyati Situmorang. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Saat ini penulis tinggal di Jalan Pahlawan No 47 Pasuruan. Penulis telah menyelesaikan studi di

SD Kristen Elkana pada tahun 2009, SMP Negeri 1 Pasuruan tahun 2012, SMA Negeri 1 Pasuruan tahun 2015. Pada tahun 2019 ini, penulis mampu menyelesaikan gelar sarjana Teknik di Program Studi S1 Teknik Fisika, Departemen Teknik Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis menyelesaikan tugas akhir dengan judul “Rancang Bangun Sistem Pengendalian Kecepatan Pada Motor AC Menggunakan Metode Field-Oriented Control Dengan Variasi Daya Motor”. Selama perkuliahan penulis pernah aktif di bidang akademis dan non akademis. Pada bidang akademis, penulis mengikuti kegiatan lomba karya tulis tingkat nasional serta program kewirausahaan. Kegiatan non-akademis, penulis pernah menjadi delegasi Institut Teknologi Sepuluh Nopember untuk Forum Komunikasi Mahasiswa Teknik Fisika se- Indonesia. Bagi pembaca yang memiliki kritik dan saran atau ingin berdiskusi mengenai tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email: effran.rajagukguk91@gmail.com.