

**PERANCANGAN *SELF TUNING* DUA DERAJAT KEBEBASAN
PI-P DENGAN METODE *FUZZY LOGIC* PADA PENGENDALIAN
KECEPATAN MOTOR SINKRON MAGNET PERMANEN
MENGUNAKAN METODE *VECTOR CONTROL***

(Tesis)

Oleh

**NADIA JULIAN PUTRI
NPM 1925031005**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

ABSTRACT

DESIGN SELF TUNING PI-P TWO DEGREES OF FREEDOM USING FUZZY LOGIC METHOD FOR SPEED CONTROL OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR USING VECTOR CONTROL METHOD

By

NADIA JULIAN PUTRI

This paper proposes self tuning Proportional-Integral/Proportional gain controller parameter in a Two Degree of Freedom (2DoF) using fuzzy logic method for speed control of permanent magnet synchronous motor. The self tuning method can automatically determine the PI-P parameters using a fuzzy logic control system. Speed control of the 3-phase permanent magnet synchronous motor is carried out by changing the 3-phase system (a-b-c) to a 2-phase system (direct-quadrature) using the vector control method. SVPWM method is used to modulate six switches on a 3 phase inverter. The results obtained using MATLAB Simulink show that by using a self-tuning fuzzy logic control system, high motor performance results are obtained, where the speed response of the permanent magnet synchronous motor shows that the step response and disturbance response are close to the ideal response.

Keywords : Permanent Magnet Synchronous Motor, Self Tuning, Two Degrees of Freedom, Fuzzy Logic, Vector Control.

ABSTRAK

PERANCANGAN *SELF TUNING* DUA DERAJAT KEBEBASAN PI-P DENGAN METODE *FUZZY LOGIC* PADA PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR SINKRON MAGNET PERMANEN MENGGUNAKAN METODE *VECTOR CONTROL*

Oleh

NADIA JULIAN PUTRI

Penelitian ini merancang sistem kendali dua derajat kebebasan Proportional Integral - Proportional (PI-P) menggunakan metode *self tuning fuzzy logic* untuk mengendalikan kecepatan motor sinkron magnet permanen. Metode *self tuning* dapat menentukan parameter PI-P secara otomatis dengan menggunakan sistem kendali *fuzzy logic*. Pengendalian kecepatan motor sinkron magnet permanen 3 fasa ini dilakukan dengan mengubah sistem 3 fasa (a-b-c) menjadi sistem 2 fasa (*direct-quadrature*) menggunakan metode *vector control*. Metode SVPWM digunakan untuk memodulasi enam saklar pada inverter 3 fasa. Hasil yang diperoleh dengan menggunakan MATLAB Simulink menunjukkan bahwa dengan menggunakan sistem kendali *self tuning fuzzy logic* dapat menghasilkan performa motor yang baik, dimana respon kecepatan dari motor sinkron magnet permanen menunjukkan bahwa, *step respon* dan *disturbance respon* mendekati respon idealnya.

Kata kunci: Motor Sinkron Magnet Permanen, Self Tuning, Dua Derajat Kebebasan, Fuzzy Logic, Vector Control.

**PERANCANGAN *SELF TUNING* DUA DERAJAT KEBEBASAN
PI-P DENGAN METODE *FUZZY LOGIC* PADA PENGENDALIAN
KECEPATAN MOTOR SINKRON MAGNET PERMANEN
MENGUNAKAN METODE *VECTOR CONTROL***

Oleh

Nadia Julian Putri

Tesis

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
MAGISTER TEKNIK**

Pada

**Program Studi Magister Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

Judul Tesis : **PERANCANGAN *SELF TUNING* DUA
DERAJAT KEBEBASAN PI-P DENGAN
METODE *FUZZY LOGIC* PADA
PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR
SINKRON MAGNET PERMANEN
MENGUNAKAN METODE *VECTOR
CONTROL***

Nama Mahasiswa : **Nadia Julian Putri**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1925031005

Program Studi : Magister Teknik Elektro

Fakultas : Teknik



Dr. Eng. Charles Ronald H, S.T., M.T.
NIP. 196912111999031001

Dr. Eng., Endah Komalasari, S.T., M.T.
NIP. 197302151999032003

2. Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro

Misfa Susanto, S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP. 197105251999031001

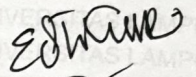
MENGESAHKAN

1. Komisi Penguji

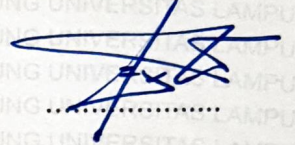
Ketua : **Dr. Eng. Charles Ronald H, S.T., M.T.**



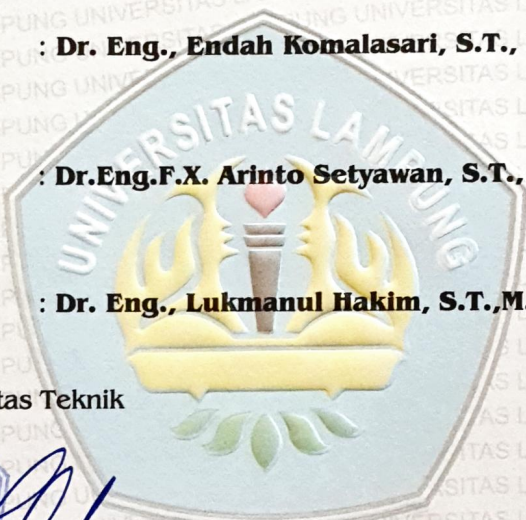

Sekretaris : **Dr. Eng., Endah Komalasari, S.T., M.T.**




Penguji : **Dr.Eng.F.X. Arinto Setyawan, S.T., M.T.**



Anggota : **Dr. Eng., Lukmanul Hakim, S.T.,M.Sc.**




2. Dekan Fakultas Teknik

Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T.,M.Sc. 
NIP. 19750928/200112 1 002



3. Direktur Program Pascasarjana

Prof. Dr. Ir. Murchadi, M.Si. 
NIP. 19640526 198902 1 001



Tanggal Lulus Ujian Tesis : **26 Mei 2023**

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam tesis yang saya buat tidak terdapat karya orang lain dan diterbitkan orang lain kecuali secara tertulis diacu dalam naskah sebagaimana telah dituliskan dalam daftar pustaka. Selain dari itu saya menyatakan bahwa skripsi ini saya buat sendiri.

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

Bandar Lampung, 26 Mei 2023



Nadia Julian Putri
1925031005

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Bukittinggi pada tanggal 04 Juli 1996, anak dari bapak Zulkifli dan ibu Titin Dyatinah, anak ke dua dari 3 bersaudara. Pendidikan sekolah dasar, diselesaikan pada tahun 2008 di SDN 08 Durian, sekolah menengah pertama diselesaikan di SMP N 11 Bandar Lampung pada tahun 2011, kemudian penulis melanjutkan pendidikan sekolah menengah akhir di SMA N 06 Bandar Lampung.

Pada tahun 2014 penulis melanjutkan pendidikan di Universitas Lampung jurusan Teknik Elektro dengan jalur masuk SNMPTN(Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri). Penulis menyelesaikan studi S1 nya pada tanggal 13 Desember 2018 dengan judul skripsi “Analisis Pemodelan Motor Brushless DC 1500 Rpm untuk Aplikasi UAV (Unmanned Aerial Vehicle)”.

Pada tahun 2019 penulis melanjutkan pendidikan Magister di Universitas Lampung dengan Jurusan Teknik Elektro, Program Studi Magister Teknik Elektro Penulis menyelesaikan studinya pada tanggal 26 Mei 2023 dengan judul tesis “Perancangan Self Tuning Dua Derajat Kebebasan PI-P dengan Metode Fuzzy Logic pada Pengendalian Kecepatan Motor Sinkron Magnet Permanen Menggunakan Metode Vector Control”.

**Karya Sederhana Ini Saya Persembahkan Kepada
Orang Tua Saya**

Zulkifli & Titin Dyatinah

Yang telah membesarkan saya dengan penuh cinta, dan tidak hentinya selalu berjuang dan berdoa, memberikan dukungan demi kesuksesan anaknya.

Taklupa Kepada Saudara Ku Tersayang

Reisa Dyasvaro Zulanda Putri

Agillean Pangestu Putra

Yang selalu menyemangati, berdoa, memberikan masukan setiap saat.



MOTTO

“Tiada daya dan upaya serta kekuatan kecuali dengan pertolongan Allah”

Rasulullah shallallahu ‘alaihi wa sallam bersabda, “Semangatlah dalam hal yang bermanfaat untukmu, minta tolonglah pada Allah dan jangan malas (patah semangat)”

(HR. Muslim no. 2664)

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya”

(Surat Al-Baqoroh : 286)



SANWACANA

Assalamu'alaikum Warahmatullahiwabarokatuh

Puji syukur kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan innayah-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Doa serta salam senantiasa dilimpahkan kepada sahabat dan umat islam sampai akhir zaman.

Selama proses pengerjaan tesis ini, penulis menyampaikan terimakasih kepada semua pihak yang telah membantu penulis untuk menyelesaikan skripsi dengan baik dan tepat pada waktu khususnya kepada:

1. Bapak Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lmapung.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si. selaku Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung.
3. Ibu Herlinawati, S.T., M.T., dan Bapak Meizano Ardhi Muhammad, S.T.,M.T., selaku Ketua dan Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.
4. Bapak Misfa Susanto, S.T.,M.Sc.,Ph.D., selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro Universitas Lampung.
5. Bapak Dr. Eng. Charles Ronald H, S.T., M.T., selaku Pembimbing Utama Tesis, yang telah membimbing dari awal penelitian hingga dinyatakan Lulus.

6. Ibu Dr. Eng., Endah Komalasari, S.T., M.T., selaku Pembimbing Pendamping Tesis, yang telah membimbing dari awal penelitian hingga dinyatakan Lulus.
7. Bapak Dr.Eng.F.X. Arinto Setyawan, S.T., M.T., selaku Penguji Utama Tesis, yang telah memberikan masukan dan saran untuk perbaikan dan laporan.
8. Bapak Dr. Eng., Lukmanul Hakim, S.T.,M.Sc., selaku Penguji Pendamping Tesis, yang telah memberikan masukan dan saran untuk perbaikan dan laporan.
9. Mbak Nurul dan jajaran staff administrasi Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.
10. Teman-Teman CCS Aqilatur Rohmah, Meri Kusumawati, Oka Ayulestari, Rahma Ferika Shaumi, Rikawati Safitri, Suci Prischayani Pertiwi,Widiastuti Ariana, Yuliana Fistriani Hayon, terimakasih atas doa, dukungan dan semangatnya.
11. Teman-Teman Tim MKG-OAIL, Fifi, Rima, Mbak Suci, Adhit, Mas Dirya, Mas Bayu, Mas Adit, Hendry, terimakasih atas doa dan dukungannya, maaf jadi sering izin kerja, buat Fifi dan Adhit terimakasih atas mahkotanya.

Semoga Allah senantiasa membalas kebaikan kita menjadi nilai ibadah. Aamiin

Semoga tesis ini berguna dan bermanfaat bagi kita semua.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahiwabarokatuh

Bandar Lampung, 26 Mei 2023

Penulis

Nadia Julian Putri

Daftar Isi

ABSTRAK	i
LEMBAR JUDUL.....	iii
LEMBAR PENGESAHAN	v
SANWACANA	x
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR TABEL.....	xviii

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Tujuan Penelitian.....	3
1.3. Manfaat Penelitian.....	3
1.4. Rumusan Masalah.....	4
1.5. Batasan Masalah	4
1.6. Hipotesis	4
1.7. Sistematika Penulisan	5

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Motor Sinkron Magnet Permanen	6
2.1.1. Konstruksi Motor Sinkron Magnet Permanen	6
2.1.2. Prinsip Kerja Motor Sinkron Magnet Permanen	11
2.1.3. Model Matematis Motor Sinkron Magnet Permanen	11
2.1.3.1. Persamaan Transformasi Clarke.....	14
2.1.3.2. Persamaan Transformasi Park	14
2.1.3.3. Persamaan Transformasi Invers Park	15
2.1.3.4. Persamaan Transformasi Invers Clarke.....	16
2.2. Teknik Pengendalian Motor Sinkron Magnet Permanen.....	17

2.2.1. Scalar Control	18
2.2.2. Vector Control	19
2.3. Sistem Kendali Fuzzy Logic	21
2.4. Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM).....	22

BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	26
3.2. Alat dan Bahan.....	26
3.3. Spesifikasi Alat	26
3.4. Metode Penelitian	26
3.4.1. Studi Literatur	26
3.4.2. Perancangan Simulasi	27
3.4.3. Pengujian.....	37
3.5. Analisa Data Hasil Pengujian	38
3.6. Diagram Alir Penelitian	38

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Perancangan Sistem Kendali	39
4.1.1. Sistem Kendali Fuzzy Logic	41
4.1.2. Pengujian Sistem Kendali SVPWM	44
4.1.3. Hasil Pengujian Sistem Kendali Vector Control	50
4.2. Hasil Simulasi Respon Kecepatan, Respon Torsi, dan Respon Arus	54
4.2.1. Hasil Simulasi pada Kondisi Tanpa Beban	54
4.2.2. Hasil Simulasi pada Kondisi dengan Beban	59

BAB V KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan	71
5.1. Saran	71

DAFTAR PUSTAKA

Daftar Gambar

Gambar 2.1. Konstruksi Motor Sinkron Magnet Permanen	7
Gambar 2.2. Konstruksi Motor Listrik Salient Pole Dan Non-Salient Pole	7
Gambar 2.3. Jenis Motor Sinkron Berdasarkan Letak Permanen	8
Gambar 2.4. Jenis Motor Sinkron Berdasarkan Penempatan Rotor	9
Gambar 2.5. Jenis Stator berdasarkan Belitannya.....	10
Gambar 2.6. Winding Circuit.....	10
Gambar 2.7. Prinsip Kerja Motor Sinkron Magnet Permanen.....	11
Gambar 2.8. Model Matematis Motor Sinkron Magnet Permanen.....	12
Gambar 2.9. Koordinat Transformasi Clarke.....	14
Gambar 2.10. Koordinat Transformasi Park	15
Gambar 2.11. Sistem Koordinat Transformasi Invers Park	16
Gambar 2.12. Sistem Koordinat Transformasi Invers Clarke	16
Gambar 2.13. Klasifikasi Berbagai Teknik Kendali	17
Gambar 2.14. Sistem Kendali Scalar Control	18
Gambar 2.15. Blok Diagram Vector Control	19
Gambar 2.16. Blok Diagram DTC	20
Gambar 2.17. Blok Diagram FOC	20
Gambar 2.18. Sistem Transformasi pada Metode FOC	21
Gambar 2.19. Struktur Fuzzy Logic.....	22
Gambar 2.20. Vector Dasar SVPWM.....	23
Gambar 3.1. Tampilan MATLAB Simulink	28
Gambar 3.2. Struktur Fuzzy Logic.....	28
Gambar 3.3. Tampilan Sistem Kendali Fuzzy Logic	29

Gambar 3.4. Sistem Kendali Fuzzy Logic pada Simulink	30
Gambar 3.5. Input Membership Function	31
Gambar 3.6. Output Membership Function	31
Gambar 3.7. Diagram Blok Self Tuning Dua Derajat Kebebasan	33
Gambar 3.8. Blok Diagram SVPWM pada Simulink	33
Gambar 3.9. Blok Diagram Transformasi Invers Clarke	34
Gambar 3.10. Blok Diagram Pengaturan Switch	34
Gambar 3.11. Blok Diagram PWM.....	35
Gambar 3.12. Rangkaian Vector Kendali	36
Gambar 3.13. Blok Diagram Transformasi Clarke	36
Gambar 3.14. Blok Diagram Transformasi Park	37
Gambar 3.15. Blok Diagram Transformasi Invers Park	37
Gambar 3.16. Diagram Alir Penelitian	38
Gambar 4.1. Blok Diagram Sistem <i>Selftuning</i> Dua Derajat Kebebasan dengan Metode <i>Fuzzy Logic</i> pada kendali Kecepatan Motor Sinkron Magnet Permanen menggunakan Metode <i>Vector Control</i>	40
Gambar 4.2. Sistem Kendali Fuzzy untuk Menentukan Nilai K_p , K_i dan K_p	41
Gambar 4.3. Membership Function Sistem Kendali PI-P.....	42
Gambar 4.4. Surface Viewer K_p dan K_i	43
Gambar 4.5. Blok diagram SVPWM	43
Gambar 4.6. Tegangan $\alpha\beta$ dan Sudut α untuk Tegangan Referensi	45
Gambar 4.7. Switches States untuk (a) Sector 1 dan (b) Sector 2	47
Gambar 4.8. Gelombang Sinyal SVPWM	47
Gambar 4.9. Sinyal Modulasi PWM.....	49
Gambar 4.10. Tegangan Keluaran Inverter Line to Line UAB, UBC dan UCA	50

Gambar 4.11. 1 Gelombang Arus abc , Gelombang Arus $\alpha\beta$, dan Gelombang Arus dq	52
Gambar 4.12. Hasil Gelombang Tegangan dq , Gelombang Tegangan $\alpha\beta$	54
Gambar 4.13. Respon Kecepatan dan Torsi pada Kecepatan referensi 500 rpm...55	55
Gambar 4.14. Hasil Respon Gabungan Kecepatan dan Respon Torsi pada Kecepatan Referensi 500 rpm pada Kondisi Tanpa Beban	56
Gambar 4.15. Respon Kecepatan dan Torsi pada Kecepatan referensi 1000 rpm.57	57
Gambar 4.16. Hasil Respon Gabungan Kecepatan, dan Respon Torsi pada Kecepatan Referensi 1000 rpm pada Kondisi Tanpa Beban	57
Gambar 4.17. Respon Kecepatan dan Torsi pada Kecepatan referensi 1500 rpm.58	58
Gambar 4.18. Hasil Respon Gabungan Kecepatan, dan Respon Torsi pada Kecepatan Referensi 1500 rpm pada Kondisi Tanpa Beban	58
Gambar 4.19. Respon Kecepatan dan Torsi pada Kecepatan referensi 500 rpm dengan Beban 5 N.m.....	60
Gambar 4.20. Respon Kecepatan dan Torsi pada Kecepatan referensi 500 rpm dengan Beban 10 N.m.....	61
Gambar 4.21. Respon Kecepatan dan Torsi pada Kecepatan referensi 500 rpm dengan Beban 15 N.m.....	61
Gambar 4.22. Kurva Respon Kecepatan dan Torsi dengan Beban pada Kecepatan 500 rpm, (a). Beban 5 Nm, (b). Beban 10 Nm (c). Beban 15 Nm ...	62
Gambar 4.23. Respon Kecepatan dan Torsi pada Kecepatan referensi 1000 rpm dengan Beban 5 N.m.....	63
Gambar 4.24. Respon Kecepatan dan Torsi pada Kecepatan referensi 1000 rpm dengan Beban 10 N.m.....	64
Gambar 4.25. Respon Kecepatan dan Torsi pada Kecepatan referensi 1000 rpm dengan Beban 15 N.m.....	65
Gambar 4.26. Kurva Respon Kecepatan dan Torsi dengan Beban pada Kecepatan 1000 rpm, (a). Beban 5 Nm, (b). Beban 10 Nm (c). Beban 15 Nm..	66

Gambar 4.27. Respon Kecepatan dan Torsi pada Kecepatan referensi 1500 rpm dengan Beban 5 N.m.....	67
Gambar 4.28. Respon Kecepatan dan Torsi pada Kecepatan referensi 1500 rpm dengan Beban 10 N.m.....	67
Gambar 4.29. Respon Kecepatan dan Torsi pada Kecepatan referensi 1500 rpm dengan Beban 15 N.m.....	68
Gambar 4.30. Kurva Respon Kecepatan dan Torsi dengan Beban pada Kecepatan 1500 rpm, (a). Beban 5 Nm, (b). Beban 10 Nm (c). Beban 15 Nm..	69

Daftar Tabel

Tabel 1. Aturan Switching Vector 0 sampai Vector 7	23
Tabel 2. Switching time duration pada setiap sektor	24
Tabel 3. Spesifikasi Motor Sinkron Magnet Permanen	40
Tabel 4. Membership Function	42
Tabel 5. Ketentuan Fuzzy Rules untuk Nilai K_p	43
Tabel 6. Ketentuan Fuzzy Rules untuk Nilai K_i	43
Tabel 7. Nilai K_{p1} , K_i dan K_{p2}	44
Tabel 8. Karakteristik Kecepatan Referensi 500, 1000 dan 1500 rpm Tanpa Beban	59
Tabel 9. Karakteristik Kecepatan Referensi 500, 1000 dan 1500 rpm dengan Beban	70

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perkembangan penggunaan motor sinkron magnet permanen sangat pesat untuk keperluan industri maupun kendaraan listrik. Motor sinkron magnet permanen atau lebih dikenal dengan PMSM (*Permanent Magnet Synchronous Motor*) adalah salah satu motor AC dimana statornya merupakan kumparan seperti pada motor induksi, sedangkan rotornya berupa magnet permanen. Keunggulan dari motor sinkron magnet permanen yaitu strukturnya sederhana, ukurannya yang kecil dan ringan, efisiensi dan faktor daya keluaran yang tinggi, dan torsi keluaran yang tinggi terutama saat kecepatan rendah. Dibandingkan dengan motor listrik yang lain, motor sinkron magnet permanen memiliki performa dinamis yang lebih baik, karena ukurannya yang lebih kecil dengan efisiensi yang tinggi [1].

Untuk mendapatkan performa motor sinkron magnet permanen yang baik, maka kecepatan motor harus dikendalikan. Dalam mengendalikan kecepatan motor sinkron magnet permanen terdapat beberapa metode kendali yaitu sistem kendali skalar, sistem kendali *direct torque*, sistem kendali vector, mengendalikan frekuensi dengan menggunakan konverter dan sistem kendali arus hysteresis[2]. Mengatur kecepatan motor sinkron magnet permanen menggunakan sistem kendali frekuensi masih banyak kelemahan pada kestabilan motor[3]. Pada sistem kendali motor sinkron magnet permanen menggunakan sistem kendali skalar memiliki kekurangan yaitu performansi yang tidak baik namun dalam implementasinya membutuhkan waktu yang cepat.

Oleh karena itu pada penelitian ini digunakan vector control untuk mengendalikan kecepatan motor sinkron magnet permanen. Tujuan dari *vector control* yaitu mengendalikan motor sinkron magnet permanen 3 fasa seperti motor DC. Untuk mengendalikan motor DC arus jangkar dan arus medan akan dikendalikan. Motor sinkron magnet sinkron permanen 3 fasa akan diubah menjadi 2 fasa menggunakan sistem kendali SVPWM (*Space Vector Pulse Width Modulation*). Pengendalian SVPWM merupakan metode pengendalian berdasarkan teori transformasi koordinat. Metode ini menggunakan transformasi clarke dan park untuk mengkonversi arus AC 3-fasa ke dalam dua arus DC, sehingga motor sinkron magnet permaen 3 fasa dapat dikendalikan seperti motor DC.

Kestabilan sistem dalam pengendalian kecepatan motor sangat diperlukan. Dalam penelitian ini untuk mendapatkan kecepatan motor sinkron magnet permanen yang stabil digunakan sistem kendali *self tuning* dua derajat kebebasan PI-P dengan metode *fuzzy logic*. Metode pengendalian yang biasa digunakan yaitu PID (*Proportional, Integral Derivative*), namun dalam pengaplikasiannya untuk menentukan nilai Kp, Ki, dan Kd masih menggunakan cara *trial* dan *error* sehingga membutuhkan waktu lama sehingga tidak efektif dan efisien. Beberapa penelitian telah dilakukan pada sistem pengendalian motor sinkron magnet permanen yaitu dengan metode *artificial intelligence* dengan *fuzzy* PID [4] dan *self tuning fuzzy* [5]. Penggabungan pengendalian *fuzzy logic* dengan pengendalian PI dan PID untuk mengatur kecepatan motor sinkron magnet permanen telah dibahas sebelumnya dengan hasil pengendalian dengan PI memiliki nilai *settling time* yang lebih cepat dibandingkan dengan pengendalian PID[6]. Pada penelitian [7] metode *self tuning fuzzy* menghasilkan performansi motor yang lebih baik dibandingkan dengan metode *fuzzy* konvensional. Berdasarkan pada penelitian yang telah dilakukan sebelumnya sehingga pada penelitian ini digunakan pengendalian *self tuning* dua derajat kebebasan PI-P dengan sistem kendali *fuzzy logic* untuk mendapatkan nilai *overshoot* yang rendah dan *settling time* yang cepat. *Fuzzy logic* digunakan karena proses pengendalian yang mudah dan fleksibel. Dalam penelitian

ini untuk menentukan nilai K_{p1} , K_i , dan K_{p2} pada sistem kendali PI-P digunakan *self tuning* dengan bantuan metode *fuzzy logic* yang didapatkan secara otomatis. *Self tuning* dua derajat kebebasan dipilih karena merupakan sistem pengendalian yang lebih baik dibandingkan dengan sistem pengendalian PID konvensional, karena dengan sistem pengendalian *self tuning* dua derajat kebebasan kecepatan motor dapat mengikuti kecepatan referensi yang diberikan. Penggabungan sistem kendali *fuzzy logic* dan *self tuning* dua derajat kebebasan merupakan solusi pengendalian adaptif. Tujuan dari penelitian ini mengatur kecepatan motor sinkron magnet permanen dengan metode *fuzzy logic* yang dapat melakukan *self tuning*. Pada penelitian ini digunakan Simulink MATLAB untuk mensimulasikan perancangan *self tuning* dua derajat kebebasan PI-P dengan metode *fuzzy logic* untuk mengendalikan kecepatan motor sinkron magnet permanen menggunakan metode SVPWM.

1.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Merancang *self tuning* dua derajat kebebasan PI-P dengan metode *fuzzy logic* pada pengendalian kecepatan motor sinkron magnet permanen menggunakan metode *vector control*.
2. Menganalisis hasil unjuk kerja motor sinkron magnet permanen, berupa respon kecepatan dan torsi.

1.3. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Mendapatkan nilai K_{p1} , K_i , K_{p2} sebagai parameter pengendalian.
2. Memperoleh pengendalian kecepatan motor sinkron magnet permanen yang stabil.
3. Memahami respon kecepatan, dan torsi.

1.4. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Bagaimana merancang sistem *self tuning* dua derajat kebebasan PI-P dengan metode *fuzzy logic* pada pengendalian kecepatan motor sinkron magnet permanen menggunakan metode *vector control* ?
2. Bagaimana membuat simulasi sistem *self tuning* dua derajat kebebasan PI-P dengan metode *fuzzy logic* menggunakan Matlab Simulink?
3. Bagaimana menganalisa respon kecepatan motor sinkron magnet permanen dan torsi?

1.5. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Penelitian ini membahas perancangan *self tuning* dua derajat kebebasan PI-P dengan metode *fuzzy logic* pada pengendalian kecepatan motor sinkron magnet permanen menggunakan metode *vector control*.
2. Penelitian ini menggunakan *software* MATLAB Simulink untuk mensimulasikan perancangan *self tuning* dua derajat kebebasan PI-P dengan metode *fuzzy logic* pada pengendalian kecepatan motor sinkron magnet permanen menggunakan metode *vector control*.

1.6. Hipotesis

Perancangan *self tuning* dua derajat kebebasan PI-P menggunakan metode *fuzzy logic* . Metode *fuzzy logic* dipilih karena merupakan sistem pengendalian yang mudah dan fleksibel, karena kecepatan motor tidak dapat didefinisikan nilai untuk kecepatan lambat sampai kencang, sehingga dibutuhkan sistem *fuzzy logic* untuk memetakan kecepatan motor tersebut. Dengan metode *self tuning* PI-P dipilih untuk mendapatkan nilai tegas dari nilai kecepatan motor, dan nilai K_{p1} , K_i , dan K_{p2} dituning dengan otomatis. *Self tuning* dengan dua derajat kebebasan dipilih dan diharapkan kecepatan motor yang dihasilkan sesuai dengan kecepatan motor referensinya. Metode SVPWM digunakan pada penelitian ini, metode pengendalian ini didasarkan pada teori transformasi koordinat. Motor 3 fasa diubah menjadi 2 fasa dengan menggunakan transformasi

Clarke ($\alpha\beta$) dan kemudian diubah menjadi dq menggunakan transformasi Park. Sistem perancangan *self tuning* dua derajat kebebasan dengan menggunakan metode *fuzzy logic* pada pengendalian kecepatan motor sinkron magnet permanen ini disimulasikan menggunakan *software* MATLAB Simulink. Hasil akhir diharapkan kecepatan motor yang dihasilkan sesuai dengan kecepatan motor referensinya, tidak memiliki *overshoot* dan memiliki *rise time* yang cepat.

1.7. Sistematika Penulisan

Sistematika pada penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

BAB I. PENDAHULUAN

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

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

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

BAB III. METODE PENELITIAN

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

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

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

BAB V. SIMPULAN DAN SARAN

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

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

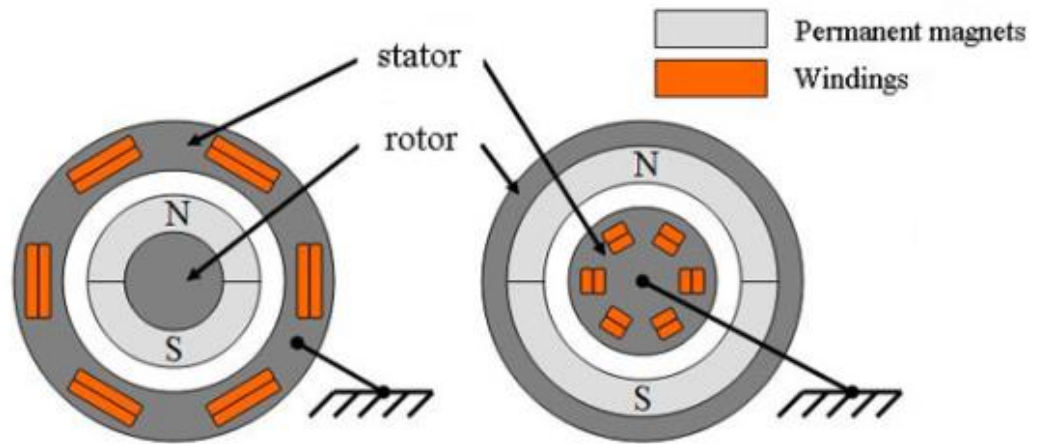
2.1. Motor Sinkron Magnet Permanen

Motor sinkron magnet merupakan jenis motor AC tiga fasa dimana statornya merupakan belitan sedangkan pada rotornya merupakan magnet permanen yang menghasilkan fluks magnet konstan pada motor. Dikarenakan rotor pada motor sinkron magnet permanen merupakan magnet permanen sehingga sistem magnetisasinya berkurang yang menyebabkan motor sinkron magnet permanen memiliki keuntungan yaitu lebih efisien dibandingkan dengan jenis motor yang lainnya [1].

Motor sinkron magnet permanen dibagi menjadi dua jenis berdasarkan dengan distribusi belitan *armature* yaitu motor *Brushless* DC (BLDC) dan motor AC magnet permanen. Motor AC magnet permanen memiliki belitan *armature* terpisah 180° , dimana menghasilkan back emf berbentuk sinusoidal. Motor BLDC memiliki belitan *armature* yang terpisah dengan sudut yang kecil, back emf pada motor BLDC berbentuk trapezoidal.

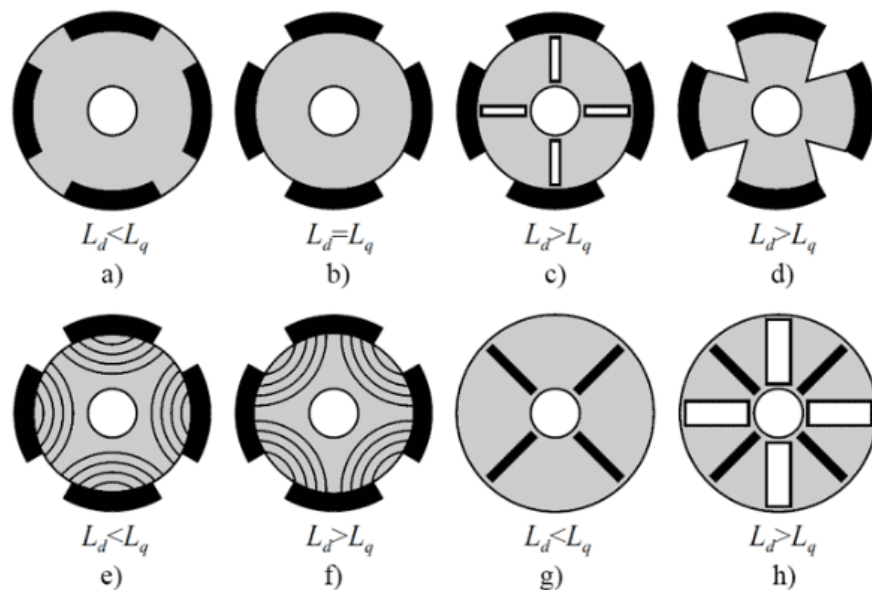
2.1.1. Konstruksi Motor Sinkron Magnet Permanen

Motor sinkron magnet permanen yaitu motor yang sama seperti motor listrik yang lain, dimana motor ini memiliki rotor dan stator. Bagian stator merupakan bagian yang tetap dan tidak bergerak sedangkan bagian rotor merupakan bagian yang bergerak, konstruksi motor sinkron magnet permanen dapat dilihat pada gambar 2.1.



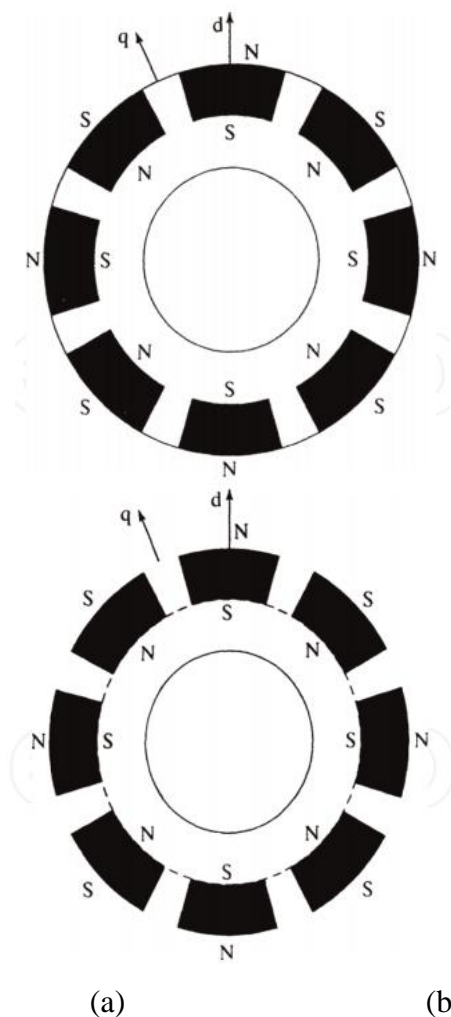
Gambar 2.1. Konstruksi Motor Sinkron Magnet Permanen[8]

Bagian rotor terdapat magnet permanen dimana berdasarkan jenis rotornya, motor sinkron dibagi menjadi motor listrik dengan *salient pole rotor* dan motor listrik dengan *non-salient pole rotor*. Motor listrik dengan *non-salient pole rotor* memiliki induktansi *direct* sama dengan induktansi *quadrature* ($L_d = L_q$), sedangkan jenis motor listrik *salient pole* induktansi *direct* tidak sama dengan induktansi *quadrature* ($L_d \neq L_q$). Konstruksi motor listrik *salient pole* rotor dan *non-salient pole rotor* dapat dilihat pada gambar 2.2.



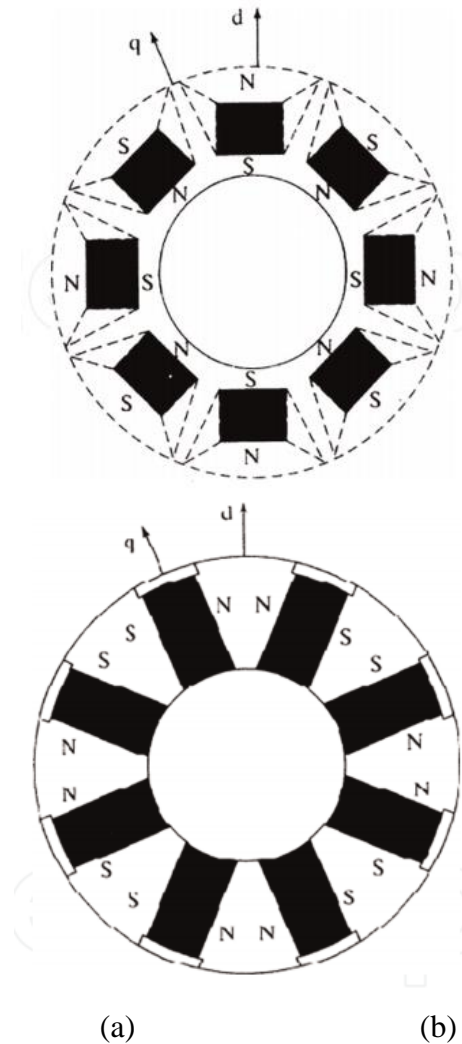
Gambar 2.2. Konstruksi motor listrik *salient pole* dan *non-salient pole*

Pada motor sinkron magnet permanen jenis rotornya dibagi menjadi dua yaitu *surface permanent magnet synchronous motor* dan *interior permanent magnet synchronous motor*. Pada gambar 2.2 bagian a dan b yang menunjukkan jenis motor sinkron yang penempatannya dipasang pada permukaan pinggiran luar laminasi rotor. Jenis ini menghasilkan kerapatan fluks celah udara tertinggi, tetapi struktur dan sistem mekanisnya rendah. Motor sinkron jenis ini disebut dengan *surface mounted*[9].



(a) *Surface permanent magnet* (b) *surface inset permanent magnet*
 Gambar 2.3. Jenis Motor Sinkron Berdasarkan Letak Magnet Permanen[1]

Jenis motor sinkron berdasarkan penempatan rotor yang lain yaitu menanamkan magnet permanen di dalam laminasi rotor, yang biasanya disebut dengan jenis *Interior* motor sinkron magnet permanen yang dapat dilihat pada gambar 2.4 (a) dan (b).



(a) *Interior permanent magnet* (b) *circumferential orientation*
 Gambar 2.4. Jenis Motor Sinkron Berdasarkan Penempatan Rotor[1]

Susunan jenis *interior* ini pemasangannya lebih sulit dibandingkan jenis *surface mounted*, tetapi memiliki keunggulan mengenai ketahanan struktur dan sistem mekanis yang kokoh.

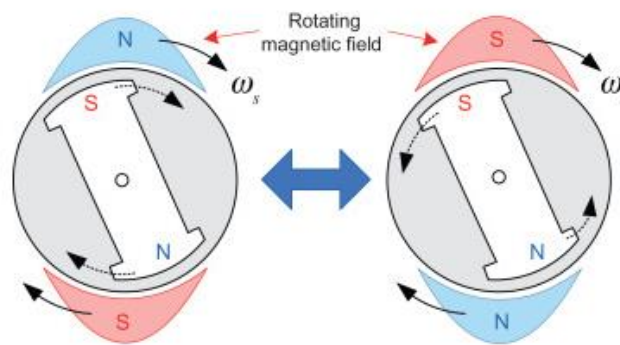
Motor sinkron jenis *surface mounted* magnet permanen dengan *radial flux* biasanya diterapkan untuk aplikasi yang memerlukan operasi dengan kecepatan rendah. Jenis ini memiliki kelebihan

Bentuk kurva back emf pada motor listrik yaitu trapezoidal dan sinusoidal, bentuk kurva ini ditentukan oleh distribusi induksi magnet.

2.1.2. Prinsip Kerja Motor Sinkron Magnet Permanen

Prinsip kerja dari motor sinkron magnet permanen yaitu berdasarkan interaksi antara medan magnet bergerak pada stator dan medan magnet konstan pada rotor. Medan magnet rotor berinteraksi dengan arus bolak-balik sinkron dari belitan stator. Menurut hukum Ampere interaksi ini akan menghasilkan torsi yang akan membuat rotor berputar.

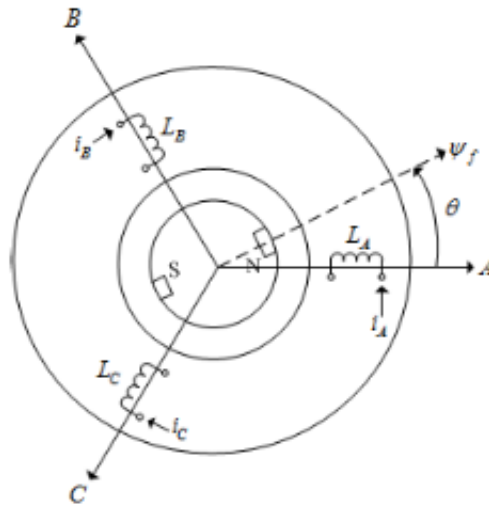
Magnet permanen yang terletak di rotor akan menghasilkan medan magnet konstan. Pada kecepatan sinkron rotasi rotor dengan medan stator, kutub rotor saling mengunci dengan medan stator yang berputar. Dalam kasus ini, motor magnet permanen tidak dapat beroperasi sendiri ketika dihubungkan secara langsung ke arus 3-fasa.



Gambar 2.7. Prinsip Kerja Motor Sinkron Magnet Permanen

2.1.3. Model Matematis Motor Sinkron Magnet Permanen

Model matematis motor sinkron magnet permanen diperlukan untuk pengembangan sistem kendali. Persamaan dinamis belitan tiga fasa yang menghubungkan tegangan terminal ke fluks linkage dan arus fasa yaitu



Gambar 2.8. Model matematis motor sinkron magnet permanen[10]
 Persamaan matematis tegangan tiga fasa motor sinkron magnet permanen yaitu :

$$V_a = R_s \cdot I_a + p \cdot \lambda_a \quad (1)$$

$$V_b = R_s \cdot I_b + p \cdot \lambda_b \quad (2)$$

$$V_c = R_s \cdot I_c + p \cdot \lambda_c \quad (3)$$

Berdasarkan grafik model matematis motor sinkron magnet permanen pada gambar 2.8 diatas persamaan torka yaitu,

$$T_e = \frac{1}{2} n_p [I_{ABC}]^T \frac{\partial [L_{ABC}]}{\partial \theta} I_{ABC} \quad (4)$$

Dengan fluks *linkage* adalah

$$\lambda_a = L_{aa} \cdot I_a + L_{ab} \cdot I_b + L_{ac} \cdot I_c + \lambda_{ma} \quad (5)$$

$$\lambda_b = L_{ab} \cdot I_a + L_{bb} \cdot I_b + L_{bc} \cdot I_c + \lambda_{mb} \quad (6)$$

$$\lambda_c = L_{ac} \cdot I_a + L_{bc} \cdot I_b + L_{cc} \cdot I_c + \lambda_{mc} \quad (7)$$

V_a , V_b , V_c merupakan tegangan stator fasa a, b, dan c, R_s merupakan resistansi stator, p merupakan jumlah kutub, λ_a , λ_b , λ_c merupakan fluks *linkage* untuk fasa a-b-c, I_a , I_b , I_c merupakan arus stator untuk fasa a-b-c, L merupakan induktansi timbal balik dan λ_{ma} , λ_{mb} , λ_{mc} merupakan fluks *linkage* puncak dari magnet permanen.

Karena fase stator dipindahkan 120° , dan $\cos(120) = -(1/2)$. Sehingga hubungan fluks pada belitan stator akibat adanya magnet permanen adalah

$$\lambda_{ma} = \lambda_m \cdot \cos \theta \quad (8)$$

$$\lambda_{mb} = \lambda_m \cdot \cos(\theta - 120^\circ) \quad (9)$$

$$\lambda_{mc} = \lambda_m \cdot \cos(\theta + 120^\circ) \quad (10)$$

P merupakan jumlah pasangan kutub magnetic. $L_a = L_b = L_c = L$, $L_{ab} = L_{ca} = L_{cb} = M$, $i_a + i_b + i_c = 0$, sehingga persamaan dalam bentuk matrik menjadi :

$$\lambda_{abc} = \begin{bmatrix} L_a & L_{ba} & L_{ca} \\ L_{ba} & L_b & L_{cb} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_c \end{bmatrix} \cdot i_{abc} + \begin{bmatrix} \lambda_m \cos \theta \\ \lambda_m \cos(\theta - 120^\circ) \\ \lambda_m \cos(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\lambda_{abc} = \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \cdot i_{abc} + \begin{bmatrix} \lambda_m \cos \theta \\ \lambda_m \cos(\theta - 120^\circ) \\ \lambda_m \cos(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (12)$$

Persamaan tegangan dalam bentuk matrik menjadi :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \left(\begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \cdot i_{abc} + \begin{bmatrix} \lambda_m \cos \theta \\ \lambda_m \cos(\theta - 120^\circ) \\ \lambda_m \cos(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \right) \cdot p \quad (13)$$

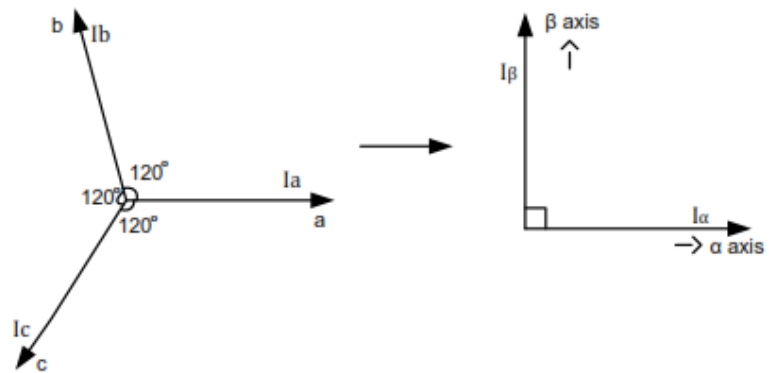
Dimana $p = \frac{d}{dt}$, sehingga

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_b}{dt} \\ \frac{di_c}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\lambda_m \sin \theta \\ -\lambda_m \sin(\theta - 120^\circ) \\ -\lambda_m \sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (14)$$

Untuk mengendalikan kecepatan motor sinkron magnet permanen pada penelitian ini motor sinkron magnet permanen akan dikendalikan seperti motor DC, dimana sistem tiga fasa akan diubah menjadi sistem dua fasa dengan transformasi Clarke dan Park dan transformasi invers Clarke dan Park untuk mengubah kembali sistem tiga fasa sebagai masukan untuk inverter yang akan mengendalikan kecepatan motor.

2.1.3.1. Persamaan Transformasi Clarke

Transformasi Clarke merupakan transformasi yang berfungsi mengubah sistem tiga fasa a, b dan c menjadi sistem dua fasa yaitu α dan β . Sistem koordinat transformasi park dapat dilihat pada gambarr 2.9.



Gambar 2.9. Koordinat transformasi Clarke[10]

Persamaan matematis transformasi Clarke pada motor sinkron magnet permanen yaitu

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ \sin \theta & \sin(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta + 120^\circ) \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (16)$$

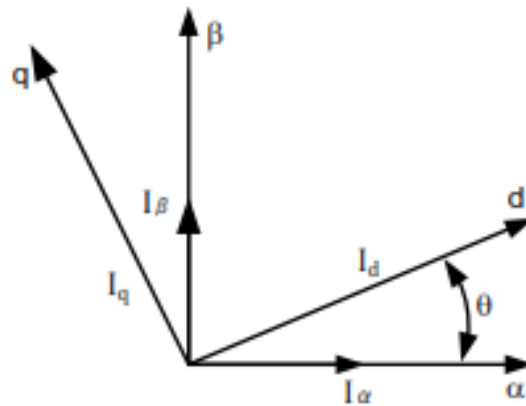
Sehingga persamaan arus α dan β adalah,

$$i_{\alpha} = i_a \quad (17)$$

$$i_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} i_a + \frac{2}{\sqrt{3}} i_b \quad (18)$$

2.1.3.2. Persamaan Transformasi Park

Transformasi park merupakan transformasi koordinat yang mengubah sistem dua fasa α dan β tidak bergerak menjadi sistem d dan q bergerak dimana sistem koordinatnya dapat dilihatpada gambar 2.10, dengan persamaan sebagai berikut



Gambar 2.10. Koordinat transformasi park[10]

Persamaan tegangan d dan q pada motor sinkron magnet permanen adalah

$$V_q = R_s \cdot i_q + \omega_r \cdot \lambda_d + p \cdot \lambda_q \quad (19)$$

$$V_d = R_s \cdot i_d - \omega_r \cdot \lambda_q + p \cdot \lambda_d \quad (20)$$

Dimana $\lambda_q = L_q \cdot i_q$ dan $\lambda_d = L_d \cdot i_d + \lambda_f$, sehingga

$$\begin{bmatrix} v_q \\ v_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + p \cdot L_q & \omega_r \cdot L_d \\ -\omega_r \cdot L_q & R_s + p \cdot L_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_r \cdot \lambda_f \\ p \cdot \lambda_f \end{bmatrix} \quad (21)$$

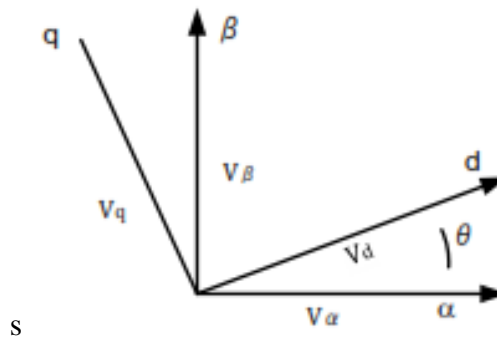
$$\begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} \quad (22)$$

Transformasi koordinat hanyalah cara untuk menyederhanakan kontrol torka motor sinkron magnet permanen. Dengan transformasi koordinat, model kendali motor sinkron magnet permanen diubah dari koordinat a-b-c menjadi koordinat d-q. Rumus kontrol torka juga diubah menjadi koordinat d-q, sehingga persamaannya adalah:

$$T_e = \frac{3}{2} n_p \psi_d I_q \quad (23)$$

2.1.3.3. Persamaan Transformasi Invers Park

Transformasi invers park digunakan pada sistem kendali untuk mengubah kembali sistem dua fasa bergerak dq menjadi sistem statis $\alpha\beta$ yang akan digunakan sebagai masukan inverter. Sistem koordinat transformasi invers park dapat dilihat pada gambar 2.11.



Gambar 2.11. Sistem Koordinat Transformasi Invers
Park[10]

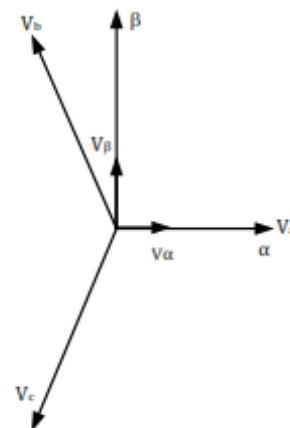
Persamaan yang digunakan untuk mengubah sistem dua fasa statis $\alpha\beta$ dapat dilihat pada persamaan (24) dan (25).

$$v_{\alpha} = v_d \cdot \cos(\theta) - v_q \cdot \sin(\theta) \quad (24)$$

$$v_{\beta} = v_q \cdot \cos(\theta) + v_d \cdot \sin(\theta) \quad (25)$$

2.1.3.4. Persamaan Transformasi Invers Clarke

Transformasi invers clarke digunakan pada sistem kendali untuk mengubah kembali sistem dua fasa statis $\alpha\beta$ menjadi sistem tiga fasa abc yang akan digunakan sebagai masukan inverter yang akan mengendalikan kecepatan motor sinkron magnet permanen. Sistem koordinat transformasi invers Clarke dapat dilihat pada gambar 2.12.



Gambar 2.12. Sistem Koordinat Transformasi Invers
Clarke[10]

Persamaan yang digunakan untuk mengubah sistem dua fasa statis $\alpha\beta$ dapat dilihat pada persamaan (25) (26) dan (27).

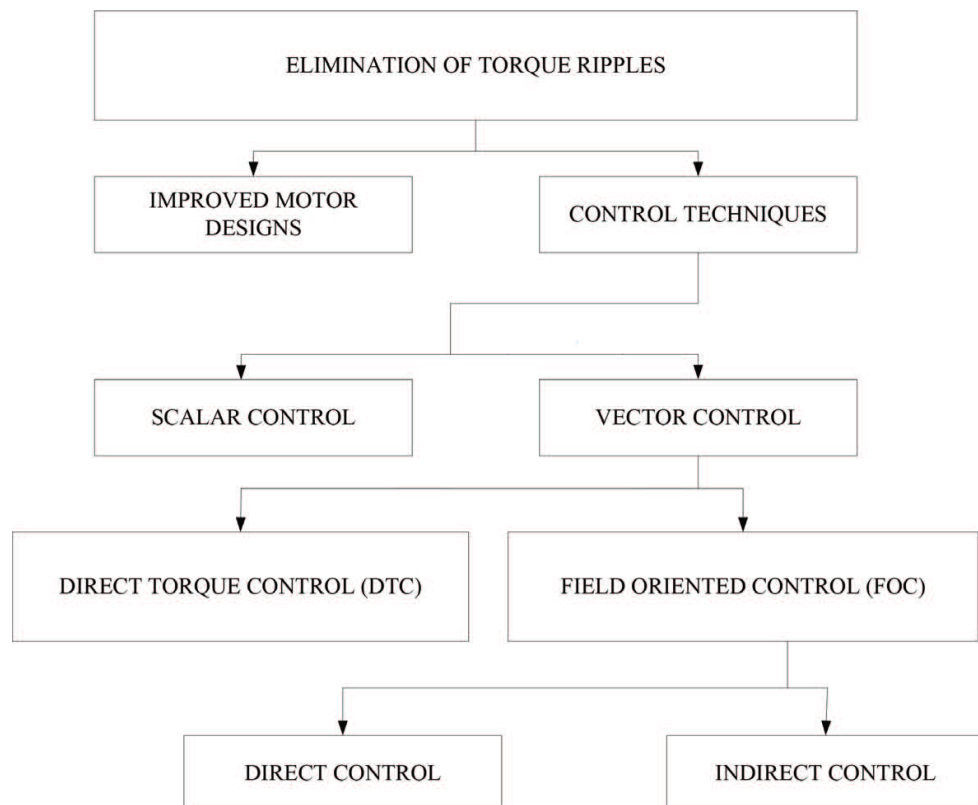
$$v_a = v_\alpha \quad (25)$$

$$v_b = \frac{-v_\alpha + \sqrt{3} \cdot v_\beta}{2} \quad (26)$$

$$v_c = \frac{-v_\alpha - \sqrt{3} \cdot v_\beta}{2} \quad (27)$$

2.2. Teknik Pengendalian Motor Sinkron Magnet Permanen

Banyak teknik berdasarkan desain motor dan teknik kendali yang telah diusulkan dalam literatur untuk mengurangi riak torsi di motor sinkron magnet permanen.



Gambar 2.13. Klasifikasi berbagai teknik kendali[1]

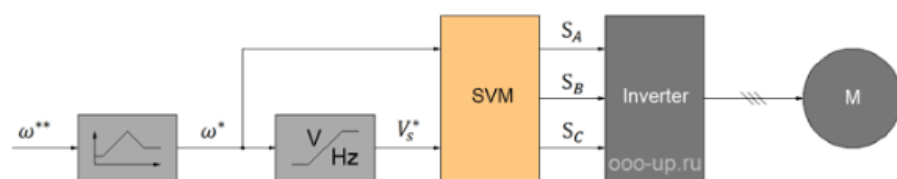
2.2.1. Scalar Control

Scalar control atau disebut juga frequency control yaitu teknik pengendalian yang biasanya digunakan pada motor *brushless AC*, dimana sistem kendali ini menjaga rasio tegangan atau frekuensi

(V/Hz) konstan sepanjang pengoperasian motor pada rentang kecepatan pengoperasian dengan hanya mengendalikan magnitude dan frekuensi pada tegangan suplai.

Rasio tegangan atau frekuensi dihitung berdasarkan nilai pengenalan dari motor AC yang dikendalikan. Dengan menjaga nilai rasio tegangan atau frekuensi tetap konstan maka kita dapat mempertahankan fluks magnet yang relative konstan di celah motor. Jika rasio tegangan atau frekuensi meningkat, maka motor menjadi overexcited sedangkan jika rasio tegangan atau frekuensi menurun maka motor dalam keadaan unexcited. Teknik kendali ini banyak digunakan untuk mengendalikan motor listrik induksi.

Pada metode kontrol skalar, kecepatan motor induksi dikendalikan dengan mengatur tegangan dan frekuensi stator, sehingga medan magnet pada celah dipertahankan pada nilai yang diinginkan. Untuk mempertahankan medan magnet konstan di celah, rasio tegangan atau frekuensi harus konstan pada kecepatan yang berbeda. Pada gambar 2.14 menunjukkan sistem kendali menggunakan *scalar control*.



Gambar 2.14. Sistem Kendali *Scalar Control*[8]

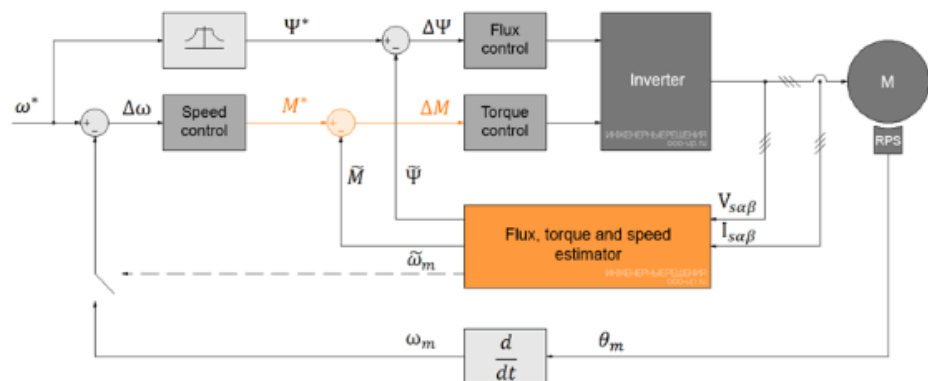
Scalar control motor AC adalah alternatif yang baik untuk aplikasi di mana tidak ada beban variabel dan tidak diperlukan dinamika yang baik controlnya pada kipas dan pompa. *Scalar control* tidak memerlukan sensor posisi rotor, dan kecepatan rotor dapat diperkirakan dari frekuensi tegangan suplai.

Dengan sistem kendali *scalar*, arus stator tidak dikontrol secara langsung, sehingga jika motor sinkron magnet permanen dikendalikan menggunakan sistem *scalar* dapat menjadi tidak

terkendali (keluar dari keadaan sinkron) terutama ketika torsi beban melebihi nilai batas torsi penggerak. Metode *scalar* tidak cocok untuk sistem kendali motor sinkron magnet permanen pada kecepatan rendah untuk aplikasi yang membutuhkan dinamika tinggi.

2.2.2. Vector Control

Vector control merupakan sistem kendali yang mengubah koordinat 3-fasa menjadi 2-fasa. Sistem kendali *vector control* mengendalikan torsi dan kecepatan motor secara langsung berdasarkan elektromagnetik motor, sistem kendali *vector* adalah sistem kendali yang mengendalikan motor AC seperti motor DC. Dengan pemisahan antara komponen arus stator (fluks magnetisasi dan torsi), komponen penghasil torsi dari fluks stator dapat dikendalikan secara independen[11]. *Decoupled control*, pada kecepatan rendah, keadaan magnetisasi motor dapat dipertahankan pada tingkat yang sesuai, dan torsi dapat dikendalikan untuk mengatur kecepatan. Blok diagram *vector control* dapat dilihat pada gambar 2.15.



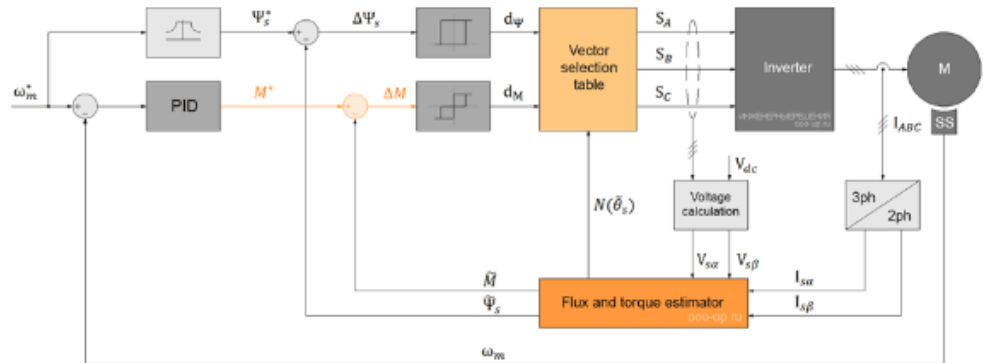
Gambar 2.15. Blok Diagram *Vector Control*[8]

Diagram blok umum dari sistem kendali *vector control* ditunjukkan pada gambar di atas. Rangkaian ini didasarkan pada loop kontrol fluks dan torsi, bersama dengan unit estimator. Sistem kendali *vector* terdiri dari beberapa metode diantaranya :

a. *Direct Torque Control* (DTC)

Prinsip metode kendali DTC dapat diaplikasikan pada motor listrik dengan kecepatan rendah dan sedang. Prinsip metode DTC yaitu

berdasarkan pemilihan *vector* tegangan yang digunakan untuk mengendalikan torsi dan fluks *linkage* pada stator. Arus stator dan tegangan inverter yang terukur digunakan untuk memperkirakan fluks dan torsi[12]. Skema kendali kecepatan motor dengan DTC dapat dilihat pada gambar 2.16.

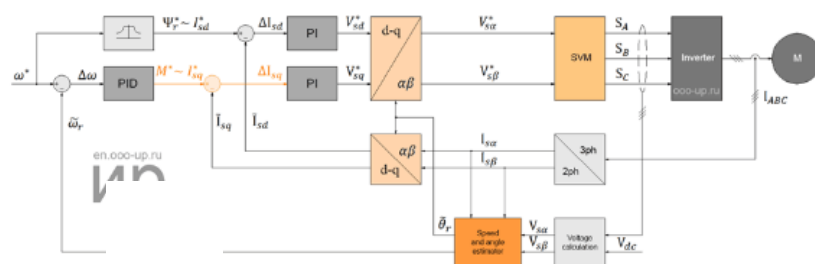


Gambar 2.16. Blok Diagram DTC[8]

Pada sistem kendali ini fluks dan torsi dikendalikan kemudian parameter ini akan digunakan pada sistem kendali untuk diubah menjadi sistem tiga fasa yang akan digunakan sebagai masukan pada inverter yang akan mengendalikan kecepatan motor.

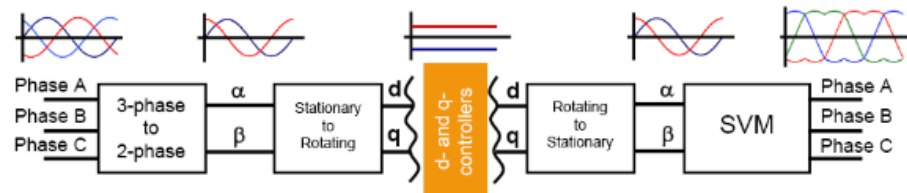
b. *Field Oriented Control (FOC)*

Teknik pengendalian FOC digunakan untuk pada motor sinkron tiga fasa yang dikendalikan seperti motor DC. Metode pengendalian ini ditemukan pada awal tahun 1970-an[13]. Agar motor dapat dikendalikan seperti motor DC, diperlukan transformasi yang akan mengubah sistem tiga fasa menjadi dua fasa, sistem transformasi ini telah dijelaskan sebelumnya.



Gambar 2.17. Blok Diagram FOC[8]

Pada metode ini digunakan transformasi Clarke yang akan mengubah sistem 3 fasa i_a, i_b , dan i_c menjadi sistem dua fasa statis yaitu i_α dan i_β , selanjutnya untuk menggerakkan motor maka diubah menjadi sistem bergerak i_d dan i_q menggunakan transformasi park. Kemudian untuk mengendalikan inverter dibutuhkan tegangan tiga fasa, oleh karena itu dibutuhkan sistem transformasi invers park dan transformasi invers Clarke. Nilai arus i_d dan i_q diubah menjadi tegangan d dan q dengan sistem kendali PI menjadi tegangan d dan q , kemudian diubah menjadi tegangan α dan tegangan β dengan transformasi invers park. Untuk mengendalikan inverter tegangan α dan tegangan β digunakan untuk masukan dan diubah menjadi gelombang sinyal fasa a, b dan c yang kemudian dibandingkan dengan sinyal segitiga untuk menghasilkan pwm. Sistem transformasi ini dapat dilihat pada gambar 2.18.



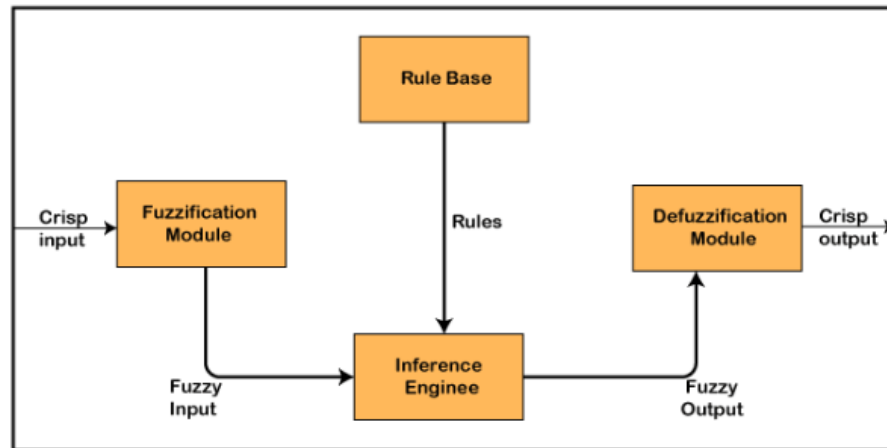
Gambar 2.18. Sistem Transformasi pada Metode FOC

Untuk mengendalikan kecepatan motor agar tetap stabil dibutuhkan sistem kendali PID. Sistem kendali PID ini merupakan pengendalian untuk menentukan presisi suatu sistem dengan karakteristik adanya umpan balik pada sistem tersebut. Untuk menentukan nilai K_p , K_i dan K_d pada sistem kendali PID pada penelitian tesis ini digunakan sistem kendali fuzzy logic yang akan mentuning secara otomatis nilai K_p , K_i dan K_d .

2.3. Sistem Kendali Fuzzy Logic

Fuzzy artinya tidak pasti atau tidak jelas, logika fuzzy merupakan salah satu teknik komputasi yang didasarkan pada derajat

kebenaran[14]. Langkah-langkah pada sistem kendali fuzzy logic dapat dilihat pada gambar 2.19.



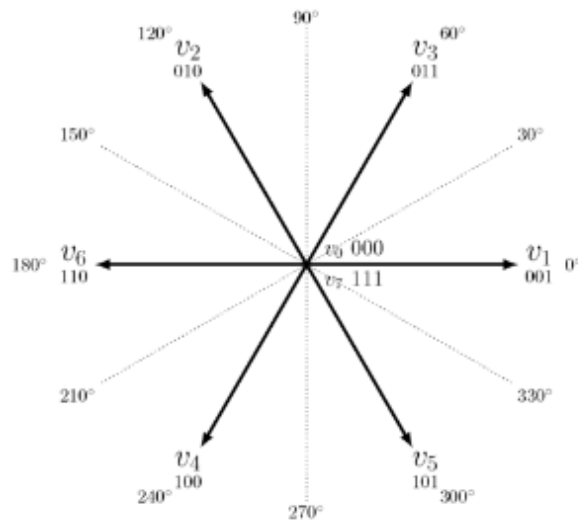
Gambar 2.19. Struktur Fuzzy Logic

Struktur fuzzy logic terdiri dari *rule base*, dimana *rule base* berisi aturan dan fungsi keanggotaan yang mengatur atau mengendalikan pengambilan keputusan dalam sistem logika fuzzy. Ini juga berisi kondisi IF-THEN yang digunakan untuk pemrograman bersyarat dan mengendalikan sistem. Komponen *fuzzifier* yaitu komponen yang mengubah input mentah menjadi himpunan fuzzy. Himpunan fuzzy melanjutkan ke sistem kontrol, di mana mereka menjalani pemrosesan lebih lanjut. *Inference engine* adalah alat yang menetapkan aturan ideal untuk input tertentu. Kemudian menerapkan aturan-aturan ini ke data input untuk menghasilkan output fuzzy. Komponen *defuzzifier* mengubah himpunan fuzzy menjadi output eksplisit (dalam bentuk input tajam). Defuzzifikasi adalah tahap akhir dari sistem logika fuzzy.

2.4. Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM)

Untuk mengendalikan inverter pada penelitian ini dibutuhkan sistem kendali SVPWM yang akan mengatur *switching* pada inverter. metode SVPWM ini memiliki enam *vector* dasar dan dua *vector* null, dengan waktu kerja yang berbeda. SVPWM merupakan rangkaian pemacu saklar khusus dan kombinasi lebar pulsa dari inverter sumber tegangan tiga fasa pada motor sinkron magnet permanen yang akan

menghasilkan tiga bentuk gelombang sinusoidal dengan sudut 120° yang berbeda satu sama lain.



Gambar 2.20. *Vector Dasar SVPWM*[15]

Gambar 2.20 diatas merupakan *vector* dasar dari sistem kendali SVPWM Enam dari konfigurasi ini merupakan *vector* aktif yang akan mengatur *switching* dari inverter yaitu $V_1 \{001\}$, $V_2 \{010\}$, $V_3 \{011\}$, $V_4 \{100\}$, $V_5 \{101\}$, dan $V_6 \{110\}$. Dua yang terakhir disebut sebagai vektor nol karena mewakili nol volt pada terminal yaitu $V_0 \{000\}$ dan $V_7 \{111\}$. Aturan *switching* pada *vector* ini dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Aturan *Switching Vector* 0 sampai *Vector* 7

<i>Vector</i>	A ⁺	B ⁺	C ⁺	A ⁻	B ⁻	C ⁻	V _{AB}	V _{BC}	V _{CA}
$V_0=\{000\}$	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON	0	0	0
$V_1=\{001\}$	OFF	OFF	ON	ON	ON	OFF	0	-V _{dc}	+V _{dc}
$V_2=\{010\}$	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	-V _{dc}	+V _{dc}	0
$V_3=\{011\}$	OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF	-V _{dc}	0	+V _{dc}
$V_4=\{100\}$	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON	+V _{dc}	0	+V _{dc}
$V_5=\{101\}$	ON	OFF	ON	OFF	OM	OFF	+V _{dc}	-V _{dc}	0
$V_6=\{110\}$	ON	ON	OFF	OFF	OFF	ON	0	+V _{dc}	-V _{dc}
$V_7=\{111\}$	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	0	0	0

Model matematis *switching* time duration pada sector 1 dapat dilihat pada persamaan dibawah ini

$$\int_0^{T_z} \bar{V}_{ref} = \int_0^{T_1} \bar{V}_1 dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} \bar{V}_2 dt + \int_{T_1+T_2}^{T_z} \bar{V}_0 \quad (28)$$

$$T_z \cdot \bar{V}_{ref} = (T_1 \cdot \bar{V}_1 + T_2 \cdot \bar{V}_2) \quad (29)$$

$$T_z \cdot |\bar{V}_{ref}| \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix} = T_1 \cdot \frac{2}{3} \cdot V_{dc} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + T_2 \cdot \frac{2}{3} \cdot V_{dc} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\frac{\pi}{3}) \\ \sin(\frac{\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

(30)

Dimana, $0 \leq \alpha \leq 60^\circ$

$$T_1 = T_z \cdot a \cdot \frac{\sin(\frac{\pi}{3} - \alpha)}{\sin(\frac{\pi}{3})} \quad (31)$$

$$T_2 = T_z \cdot a \cdot \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\frac{\pi}{3})} \quad (32)$$

$$T_0 = T_z - (T_1 + T_2) \quad (33)$$

Dimana, $T_z = \frac{1}{f_z}$ dan $a = \frac{|\bar{V}_{ref}|}{\frac{2}{3} \cdot V_{dc}}$

Model matematis untuk tiap sector dapat dilihat pada persamaan dibawah ini

Tabel 2. *Switching* time duration pada setiap sektor

Sektor	Upper Switches (S ₁ , S ₃ , S ₅)	Lower Switches (S ₄ , S ₆ , S ₂)
1.	$S_1 = T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$ $S_3 = T_2 + \frac{T_0}{2}$ $S_5 = \frac{T_0}{2}$	$S_4 = \frac{T_0}{2}$ $S_6 = T_1 + \frac{T_0}{2}$ $S_2 = T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$
2.	$S_1 = T_1 + \frac{T_0}{2}$ $S_3 = T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$ $S_5 = \frac{T_0}{2}$	$S_4 = T_2 + \frac{T_0}{2}$ $S_6 = \frac{T_0}{2}$ $S_2 = T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$
3.	$S_1 = \frac{T_0}{2}$ $S_3 = T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$ $S_5 = T_2 + \frac{T_0}{2}$	$S_4 = T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$ $S_6 = \frac{T_0}{2}$ $S_2 = T_1 + \frac{T_0}{2}$
4.	$S_1 = \frac{T_0}{2}$ $S_3 = T_1 + \frac{T_0}{2}$ $S_5 = T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$	$S_4 = T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$ $S_6 = T_2 + \frac{T_0}{2}$ $S_2 = \frac{T_0}{2}$
5.	$S_1 = T_2 + \frac{T_0}{2}$	$S_4 = T_1 + \frac{T_0}{2}$

	$S_3 = \frac{T_0}{2}$ $S_5 = T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$	$S_6 = T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$ $S_2 = \frac{T_0}{2}$
6.	$S_1 = T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$ $S_3 = \frac{T_0}{2}$ $S_5 = T_1 + \frac{T_0}{2}$	$S_4 = \frac{T_0}{2}$ $S_6 = T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$ $S_2 = T_2 + \frac{T_0}{2}$

$$\begin{aligned}
T_1 &= \frac{\sqrt{3} \cdot T_z \cdot |\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(\text{Sin} \left(\frac{\pi}{3} - \alpha + \frac{n-1}{3} \pi \right) \right) \\
&= \frac{\sqrt{3} \cdot T_z \cdot |\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(\text{Sin} \frac{n}{3} \pi - \alpha \right) \\
&= \frac{\sqrt{3} \cdot T_z \cdot |\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(\text{Sin} \frac{n}{3} \pi \cos \alpha - \cos \frac{n}{3} \pi \cdot \sin \alpha \right) \quad (34)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T_2 &= \frac{\sqrt{3} \cdot T_z \cdot |\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(\text{Sin} \left(\alpha - \frac{n-1}{3} \pi \right) \right) \\
&= \frac{\sqrt{3} \cdot T_z \cdot |\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(-\cos \alpha \cdot \sin \frac{n-1}{3} \pi - \sin \alpha \cdot \cos \frac{n-1}{3} \pi \right) \\
&(35)
\end{aligned}$$

$$T_0 = T_z - T_1 - T_2 \quad (36)$$

Dimana, n=1 sampai 6 (sector 1 sampai 6), $0 \leq \alpha \leq 60^\circ$

BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Waktu Penelitian

Penelitian tesis ini dimulai pada bulan Mei 2021 sampai bulan November 2022. Penelitian ini dilakukan dengan simulasi menggunakan *software* Matlab.

3.2. Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan pada tesis ini adalah :

1. Satu unit laptop
2. *Software* MATLAB Simulink 2022
3. Microsoft Office 2019

3.3. Spesifikasi Alat

Adapun spesifikasi alat yang digunakan pada tesis ini adalah :

1. Menggunakan laptop merk asus untuk mensimulasikan pengendalian kecepatan motor sinkron magnet permanen, dan untuk mengerjakan laporan.
2. Menggunakan *software* MATLAB Simulink yang digunakan untuk mensimulasikan pengendalian kecepatan motor sinkron magnet permanen, dan untuk menganalisa hasil simulasi.
3. Menggunakan microsoft office tahun 2017 untuk membuat laporan penelitian dan microsoft power point untuk membuat presentasi.

3.4. Metode Penelitian

Pembuatan tesis ini dilakukan dalam beberapa tahapan, diantaranya :

3.4.1. Studi Literatur

Studi literatur dalam pembuatan tesis ini yaitu mencari referensi berupa buku maupun jurnal, untuk mendapatkan gambaran yang berkaitan dengan tesis ini. Tujuan dari studi literatur ini adalah untuk

memahami dan mengerti bagaimana cara mengerjakan tesis ini, dan mengetahui penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya yang sesuai dengan tesis ini, sehingga nantinya dihasilkan tesis yang sesuai dengan yang diharapkan.

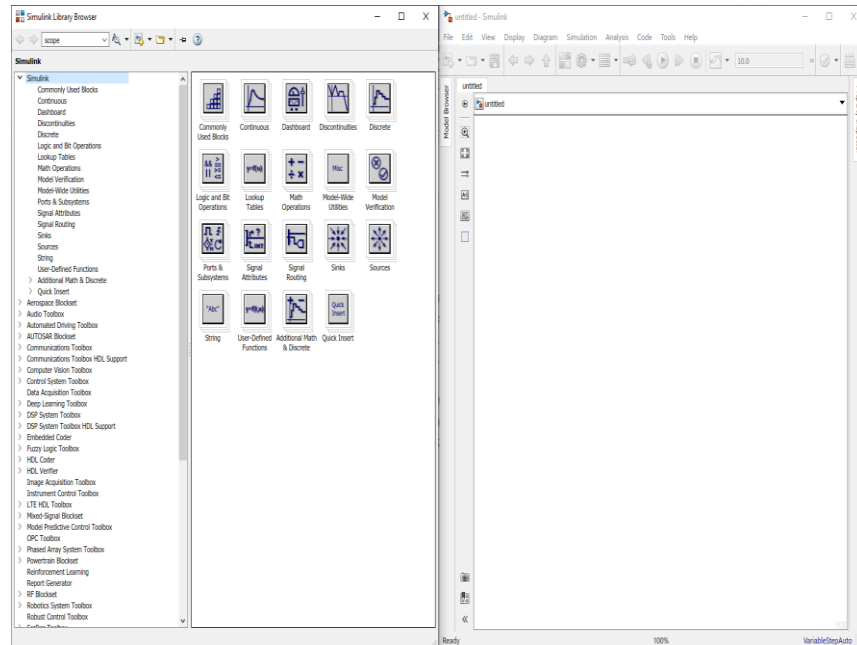
3.4.2. Perancangan Simulasi

Pada tahap ini perancangan *self tuning* dua derajat kebebasan menggunakan metode *fuzzy logic* pada pengendalian kecepatan motor sinkron magnet permanen disimulasikan menggunakan *software* MATLAB Simulink. Perancangan ini dibuat berdasarkan acuan dasar yang didapatkan dari tahapan studi literatur. Tahapan yang dilakukan pada perancangan simulasi ini yaitu, membuat desain sistem kendali *fuzzy logic*, menggabungkan sistem kendali *fuzzy logic* dengan sistem *self tuning* dua derajat kebebasan, dan membuat sistem rangkaian SVPWM. Perancangan ini disimulasikan menggunakan *software* MATLAB Simulink. MATLAB merupakan *software* program untuk analisis dan komputasi numerik yang merupakan bahasa pemrograman matematika lanjutan dengan dasar pemikiran menggunakan sifat dan bentuk matrik. Perancangan ini menggunakan beberapa macam komponen yang ada di Simulink yang kemudian dimodelkan untuk menghasilkan sistem yang sesuai dengan keinginan. Tampilan MATLAB Simulink dapat dilihat pada gambar 3.1. dibawah ini.

Adapun tahapan perancangan simulasi pengendalian kecepatan motor sinkron magnet permanen yaitu :

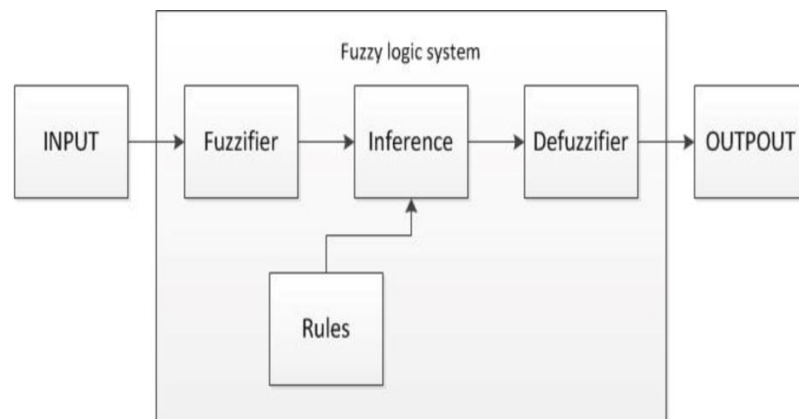
1. Membuat Sistem Kendali *Fuzzy Logic*

Fuzzy logic adalah salah satu sistem kendali yang paling sering digunakan dalam bidang kendali otomatis maupun bidang industry. Sistem kendali *fuzzy* adalah sistem yang relatif mudah dan fleksibel, sistem ini dirancang tidak banyak melibatkan model matematis yang sulit.



Gambar 3.1. Tampilan MATLAB simulink

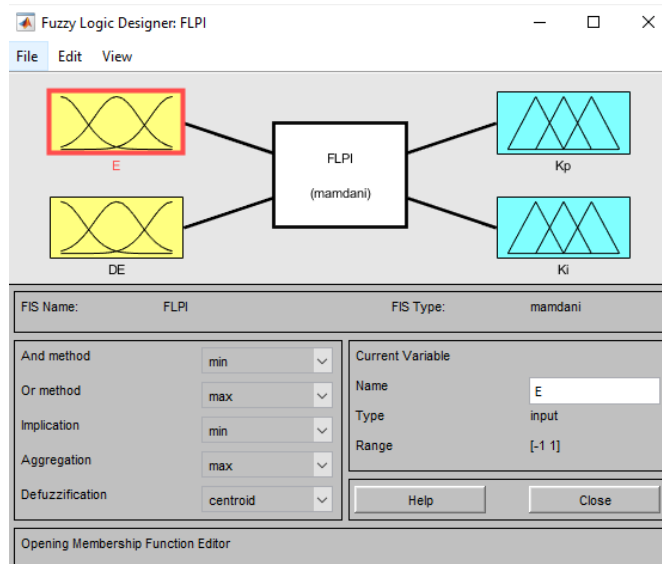
Fuzzy logic merupakan sistem kendali yang tepat untuk memetakan suatu ruang masukan ke dalam ruang keluaran. Penggunaan *fuzzy logic* dapat mengatasi sistem yang rumit untuk dipecahkan. Pada sistem kendali tradisional umumnya dirancang untuk mengendalikan keluaran tunggal yang berasal dari beberapa masukan yang tidak saling berhubungan, dan jika terdapat masukan yang baru akan mempersulit proses kendali dan membutuhkan proses perhitungan kembali dari semua fungsi. Sedangkan pada sistem kendali *fuzzy logic*, sistem akan bekerja berdasarkan prinsip *fuzzy logic*.



Gambar 3.2. Struktur *fuzzy logic*

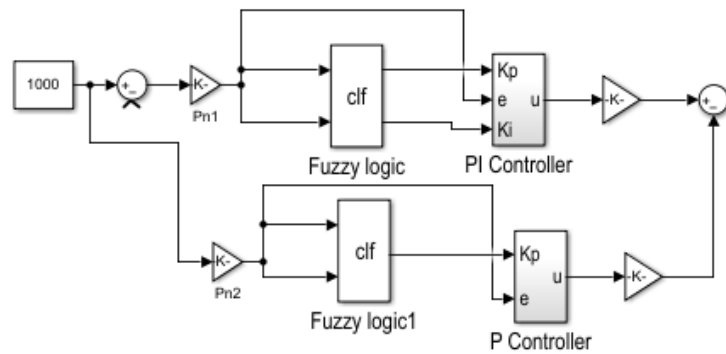
Fuzifikasi merupakan proses mengubah himpunan *crisp* menjadi himpunan *fuzzy* atau proses perubahan variable numeric atau bilangan nyata menjadi *variable linguistic* atau bilangan *fuzzy*, sedangkan defuzifikasi merupakan kebalikan dari fuzifikasi yaitu proses reduksi himpunan *fuzzy* ke himpunan *crisp*. Blok inferensi merupakan pproses merumuskan pemetaan dari masukan ke keluaran menggunakan logika *fuzzy*.

Dengan menggunakan sistem kendali *fuzzy logic* dengan bantuan kontroler *self tuning* dua derajat kebebasan, kecepatan motor akan dikendalikan agar hasil keluarannya sesuai dengan kecepatan referensi yang diberikan. Penggabungan sistem kendali *fuzzy logic* dan *self tuning* merupakan solusi kontroler adaptif. Algoritma *fuzzy logic* akan menentukan nilai K_{p1} , K_{p2} dan K_i . Tampilan sistem kendali *fuzzy logic* pada MATLAB yang dapat dilihat pada gambar 3.3 terlihat bahwa terdapat komponen masukan, metode untuk merepresentasikan hasil logika *fuzzy* yang dapat dipilih diantaranya metode tsukamoto, sugeno, dan Mamdani, kemudian terakhir terdapat komponen keluaran.

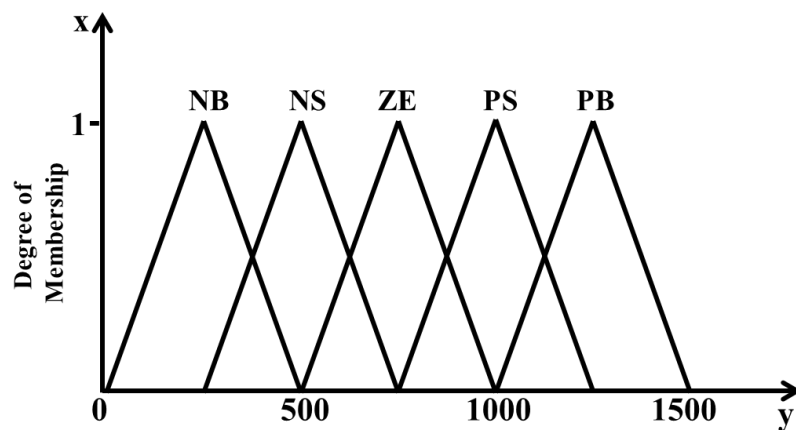


Gambar 3.3. Tampilan sistem kendali *fuzzy logic*

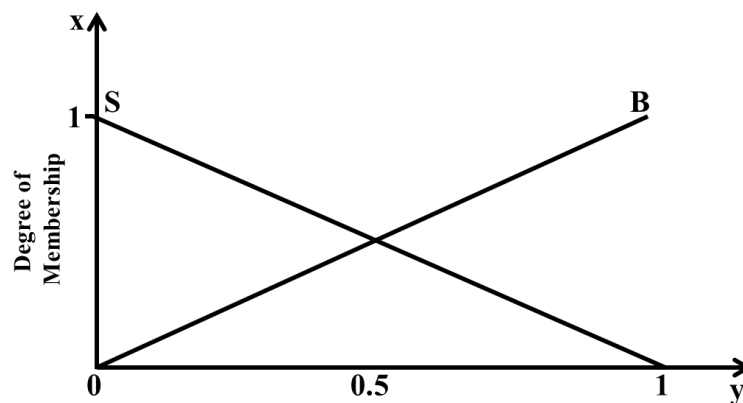
Pada pengendalian ini digunakan dua buah sistem kendali *fuzzy logic* yaitu *fuzzy logic* PI dan *fuzzy logic* P yang dapat dilihat pada gambar 3.4.



Gambar 3.4. Sistem Kendali *Fuzzy Logic* pada Simulink
 Pada penelitian ini menggunakan *fuzzy rules* dengan metode mamdani dimana *membership function* pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.5. dan 3.6, dimana masukannya merupakan nilai error dan delta error dan keluarannya merupakan nilai K_{p1} , K_i , dan K_{p2} .



Gambar 3.5. *Input Membership Function*



Gambar 3.6. *Output Membership Function*

Pada grafik *input membership function* NB merupakan *Negatif Big*, NS merupakan *Negatif Small*, ZE merupakan *Zero Error*, PS merupakan *Positif Small* dan PB merupakan *Positif Big*, sedangkan pada *output membership function* S merupakan *Small* dan B merupakan *Big*.

Pada *fuzzy rules* dengan metode mamdani menggunakan *If and then*, dimana ketentuan *fuzzy rules* untuk sistem kendali PI pada penelitian ini yaitu:

If (E is NB) and (DE is NB) then (Kp is B) (Ki is S)

If (E is NB) and (DE is NS) then (Kp is B) (Ki is S)

If (E is NB) and (DE is ZE) then (Kp is B) (Ki is S)

If (E is NB) and (DE is PS) then (Kp is B) (Ki is S)

If (E is NB) and (DE is PB) then (Kp is B) (Ki is S)

If (E is NS) and (DE is NB) then (Kp is S) (Ki is B)

If (E is NS) and (DE is NS) then (Kp is B) (Ki is S)

If (E is NS) and (DE is ZE) then (Kp is B) (Ki is S)

If (E is NS) and (DE is PS) then (Kp is B) (Ki is S)

If (E is NS) and (DE is PB) then (Kp is S) (Ki is B)

If (E is ZE) and (DE is NB) then (Kp is S) (Ki is B)

If (E is ZE) and (DE is NS) then (Kp is S) (Ki is B)

If (E is ZE) and (DE is ZE) then (Kp is B) (Ki is S)

If (E is ZE) and (DE is PS) then (Kp is S) (Ki is B)

If (E is ZE) and (DE is PB) then (Kp is S) (Ki is B)

If (E is PS) and (DE is NB) then (Kp is S) (Ki is B)

If (E is PS) and (DE is NS) then (Kp is B) (Ki is S)

If (E is PS) and (DE is ZE) then (Kp is B) (Ki is S)

If (E is PS) and (DE is PS) then (Kp is B) (Ki is S)

If (E is PS) and (DE is PB) then (Kp is S) (Ki is B)

If (E is PB) and (DE is NB) then (Kp is B) (Ki is S)

If (E is PB) and (DE is NS) then (Kp is B) (Ki is S)

If (E is PB) and (DE is ZE) then (Kp is B) (Ki is S)

If (E is PB) and (DE is PS) then (Kp is B) (Ki is S)

If (E is PB) and (DE is PB) then (Kp is B) (Ki is S)

Ketentuan *fuzzy rules* untuk sistem kendali P pada penelitian ini yaitu:

If (E is NB) and (DE is NB) then (Kp is B)

If (E is NB) and (DE is NS) then (Kp is B)

If (E is NB) and (DE is ZE) then (Kp is B)

If (E is NB) and (DE is PS) then (Kp is B)

If (E is NB) and (DE is PB) then (Kp is B)

If (E is NS) and (DE is NB) then (Kp is S)

If (E is NS) and (DE is NS) then (Kp is B)

If (E is NS) and (DE is ZE) then (Kp is B)

If (E is NS) and (DE is PS) then (Kp is B)

If (E is NS) and (DE is PB) then (Kp is S)

If (E is ZE) and (DE is NB) then (Kp is S)

If (E is ZE) and (DE is NS) then (Kp is S)

If (E is ZE) and (DE is ZE) then (Kp is B)

If (E is ZE) and (DE is PS) then (Kp is S)

If (E is ZE) and (DE is PB) then (Kp is S)

If (E is PS) and (DE is NB) then (Kp is S)

If (E is PS) and (DE is NS) then (Kp is B)

If (E is PS) and (DE is ZE) then (Kp is B)

If (E is PS) and (DE is PS) then (Kp is B)

If (E is PS) and (DE is PB) then (Kp is S)

If (E is PB) and (DE is NB) then (Kp is B)

If (E is PB) and (DE is NS) then (Kp is B)

If (E is PB) and (DE is ZE) then (Kp is B)

If (E is PB) and (DE is PS) then (Kp is B)

If (E is PB) and (DE is PB) then (Kp is B)

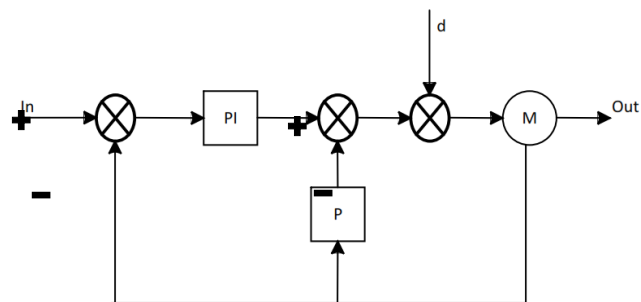
2. *Self Tuning* Dua Derajat Kebebasan

Pada gambar 3.8 dapat dilihat diagram blok dari sistem *self tuning* dua derajat kebebasan, dimana dapat dilihat pada gambar 3.7

bahwa sistem dua derajat kebebasan memiliki dua buah *closed loop*, *closed loop* pertama merupakan *closed loop step* dan *closed loop* kedua merupakan *closed loop disturbance*. Parameter in merupakan kecepatan referensi merupakan masukan yang diberikan pada sistem, sedangkan PI merupakan kendali yang akan mengendalikan nilai eror dari keluaran sistem. *Closed loop* kedua merupakan disturbance, untuk mengendalikan motor agar tetap stabil ketika terjadi gangguan maka dibutuhkan kendali P.

$$PI = K_{p1} \left(1 + \frac{K_i}{s} \right) \quad (37)$$

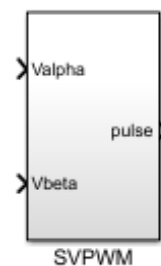
$$P = K_{p2} \quad (38)$$



Gambar 3.7. Diagram blok *self tuning* dua derajat kebebasan

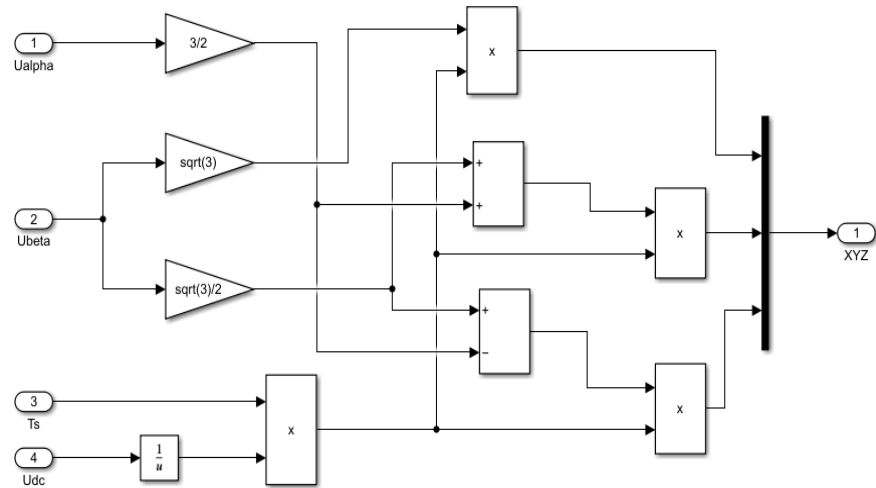
3. Rangkaian SVPWM

Ide utama dari SVPWM adalah untuk menghasilkan dan melacak fluks dari perspektif motor, dan kemudian seluruh sistem menggunakan pola biasa untuk mengganti dan membentuk gelombang PWM. SVPWM memiliki enam vector dasar, dengan waktu kerja yang berbeda, dua vector dasar yang berdekatan dapat disusun untuk setiap vector. Siklus kerja yang dihitung dari dua vector dasar yang berdekatan.



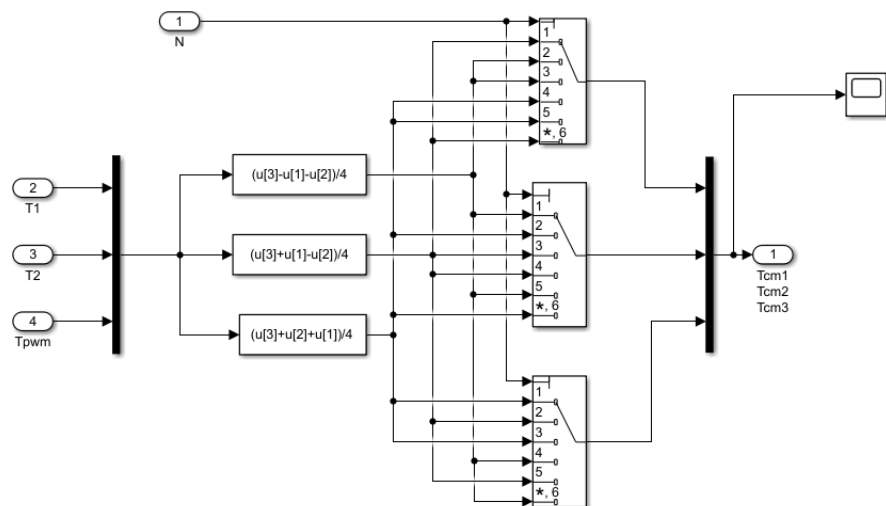
Gambar 3.8. Blok Diagram SVPWM pada Simulink

Pada gambar 3.8. pada blok diagram memiliki masukan v_α dan v_β , dimana tegangan $\alpha\beta$ ini nanti akan diubah menjadi sistem tiga fasa a b c dengan transformasi invers Clarke yang dapat dilihat pada gambar 3.9.



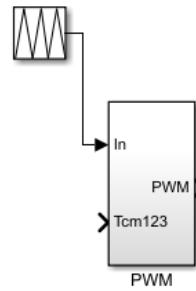
Gambar 3.9. Blok Diagram Transformasi Invers Clarke

Sistem SVPWM ini mengatur enam buah switching pada inverter dimana blok diagram untuk mengatur on dan off switch pada inverter dapat dilihat pada gambar 3.10.



Gambar 3.10. Blok Diagram Pengaturan Switch

Untuk menghasilkan pulsa maka dibandingkan dengan sinyal segitiga, dimana blok diagram dapat dilihat pada gambar 3.11.

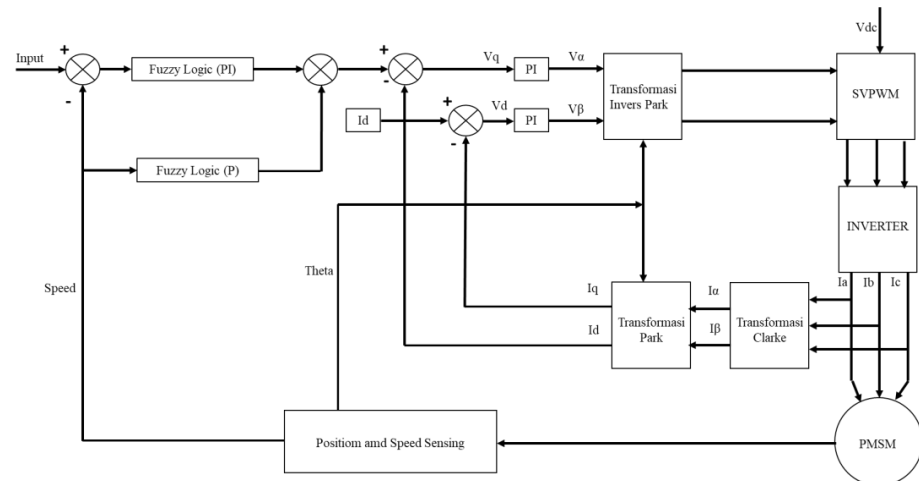


Gambar 3.11. Blok Diagram PWM

4. Rangkaian *Vector Kendali*

Metode *vector kendali* merupakan metode yang mengatur motor sinkron magnet permanen menjadi seperti motor DC. Pada metode *vector kendali* ini sistem *coupled* diubah menjadi sistem *decoupled*. Gambar 3.12 merupakan diagram blok dari sistem *vector kendali* dengan $i_d=0$ karena rotor pada motor sinkron magnet permanen merupakan magnet permanen sehingga arus medannya bernilai nol. Pada sistem kendali vector control yang dikendalikan merupakan arus jangkar yang digunakan untuk mengendalikan torsi. Sistem kendali vector control ini meliputi dua loop umpan balik, yaitu loop pertama kecepatan motor, dan loop kedua arus id. Dua loop dihubungkan secara seri. Loop arus adalah inner loop, yang secara langsung mengontrol torsi dan eksitasi motor sinkron magnet permanen.

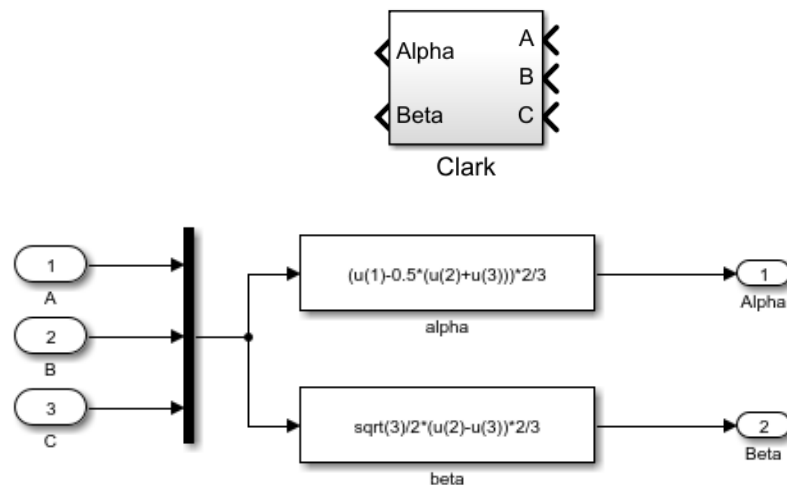
Rangkaian *vector control* berfungsi untuk mengendalikan kecepatan motor berupa arus dan torsi. Sistem *vector kendali* ini terdiri koordinasi transformasi Clarke dan park. Transformasi Clarke akan mengkonversi koordinat tiga fasa (i_a, i_b, i_c) menjadi koordinat stasioner dua fasa i_α dan i_β berdasarkan persamaan 15 sampai 18, dan kemudian transformasi park akan mengkonversi koordinat $\alpha\beta$ menjadi koordinat i_d dan i_q berdasarkan persamaan 22.



Gambar 3.12. Rangkaian *vector kendali*

Transformasi clarke mengubah arus dalam sistem koordinat abc menjadi sistem koordinat $\alpha\beta$ stasioner. Membuat belitan tiga fasa dari motor setara dengan belitan kuadratur dua fasa.

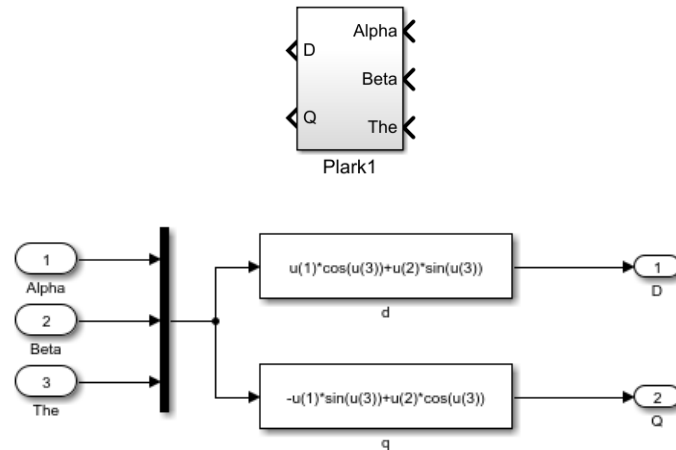
Blok diagram yang dirancang menggunakan Matlab Simulink dapat dilihat pada gambar 3.13.



Gambar 3.13. Blok Diagram Transformasi Clarke

Transformasi park merupakan proses transformasi sistem koordinat $\alpha\beta$ menjadi sistem koordinat d-q yang berputar. Ada parameter penting dalam transformasi ini - sudut listrik θ yang merupakan sudut antara sumbu α dan sumbu d.

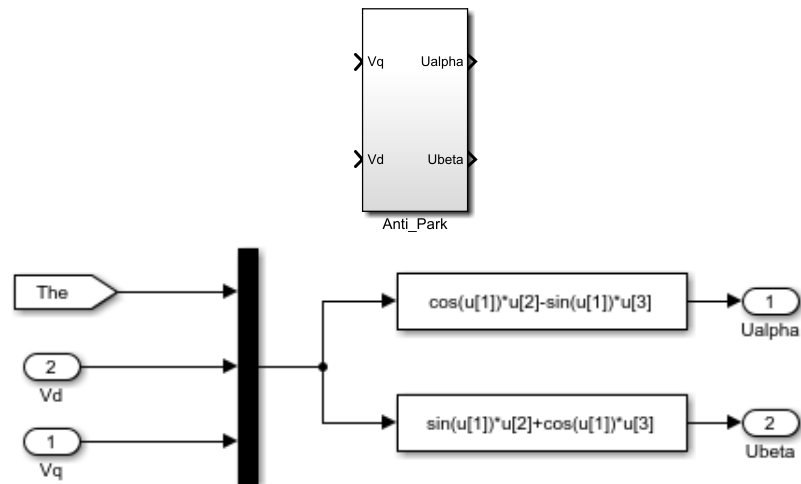
Blok diagram yang dirancang menggunakan Matlab Simulink dapat dilihat pada gambar 3.14.



Gambar 3.14. Blok Diagram Transformasi Park

Transformasi invers park mengubah komponen d-q kembali ke koordinat $\alpha\beta$ yang akan digunakan untuk masukan SVPWM, juga membutuhkan sudut listrik θ .

Blok diagram yang dirancang menggunakan Matlab Simulink dapat dilihat pada gambar 3.15.



Gambar 3.15. Blok Diagram Transformasi Invers Park

3.4.3 Pengujian

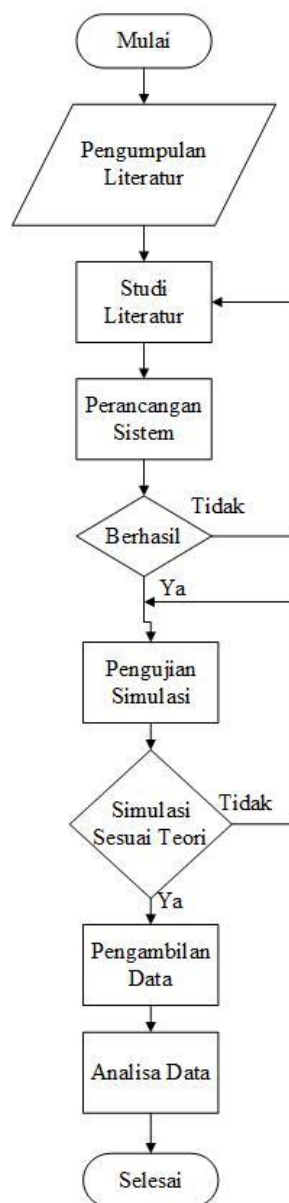
Pada tahap ini dilakukan pengujian terhadap sistem-sistem yang telah dirancang dengan menggunakan MATLAB Simulink. Tahap pengujian ini untuk melihat dan menganalisa apakah hasil kendali kecepatan motor sesuai dengan masukan kecepatan referensinya.

3.5. Analisa Data Hasil Pengujian

Setelah dilakukan simulasi pada MATLAB Simulink, dan diuji. Selanjutnya menganalisa data hasil dengan menguji rangkaian dengan memasukkan nilai kecepatan referensi yang diinginkan.

3.6. Diagram Alir Penelitian

Tahapan dari penelitian ini mulai dari studi literatur, perancangan sistem, pengujian sistem, pengambilan data, dan Analisa data yang dapat dilihat pada diagram alir penelitian pada gambar 3.16.



Gambar 3.16. Diagram Alir Penelitian

BAB V

KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang didapat pada penelitian ini diantaranya:

1. Nilai K_{p1} , K_i dan K_{p2} yang diperoleh dengan metode *self tuning* berdasarkan sistem kendali *fuzzy logic* yaitu 0.03, 3.5 dan 0.0303 dapat mengendalikan kecepatan motor sinkron magnet permanen sesuai dengan kecepatan referensinya.
2. Sistem pengendalian *self tuning* dua derajat kebebasan PI-P dengan menggunakan metode *fuzzy logic* dapat mengendalikan kecepatan motor dengan stabil, ketika motor tanpa beban maupun diberi beban.
3. Berdasarkan hasil pengujian dengan kecepatan referensi 500, 1000 dan 1500 rpm dengan memvariasikan beban 5, 10 dan 15 N.m nilai *rise time* rata-rata sebesar 0,016 detik, *settling time* rata-rata sebesar 0.027 detik dengan *overshoot* rata-rata sebesar 0,48%.

5.2. Saran

Adapun saran untuk penelitian ini kedepannya dapat dikembangkan untuk dilakukan penelitian lebih lanjut dengan memvariasikan sistem kendali PID atau membandingkan sistem kendali inverter.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Adhavan Balashanmugham, Mockaisamy Maheswaran. "*Permanent-Magnet Synchronous Machine Drives*." Intechopen, 2019.
- [2]. R. M. Pindoriya. "*Performance Analysis of Control Strategies of Permanent Magnet Synchronous Motor*". IEEE. 2016.
- [3]. Xiaodong Liu, Zhenbin Zhang. "*Fixed Switching Frequency Predictive Control for PMSM Drives With Guaranteed Control Dynamics*". IEEE. 2020
- [4]. Bo Li, Chen Wang. "*Comparative Analysis on PMSM Control System Based on SPWM and SVPWM*." (IEEE) 2016.
- [5]. Yuan Zhou, Wendong Shang, Mingshan Liu, Xiaokun Li, Yin Zeng. "*Simulation of PMSM Vector Control Based on a Self-tuning Fuzzy PI Controller*." (IEEE) 2015.
- [6]. Oyas Wahyunugroho, Nordin Saad. "*Development of Fuzzy-logic-based Self Tuning PI Controller for Servomotor*." (Intechopen) 2010.
- [7]. M. Umabharathi, S. Vijayabaskar. "*Speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Using Evolutionary Fuzzy PID Controller*." (International Journal of Electrical Engineering and Information Engineering) 9, no. 12 (2015).
- [8]. Lindegger, Markus. "*Economic viability, applications and limits of efficient permanent magnet motors*." (Swiss Federal Office of Energy) 2009.
- [9]. Kangping Xu, Wenjia Chen, Yushan Xu, Mingyu Gao, Zhiwei He. "*Vector Control for PMSM*." (IFSA Publishing) 170, no. 5 (2014).
- [10]. Fitzgerald, A. E. *Electric Machinery*. North America: McGraw-Hill, 2003.
- [11]. Oguz Tahmaz, Melih Nafi Ekim, Ali Bekir Yildiz. "*Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Motor by a Two-Level SPWM Inverter*." (IEEE) 2020.
- [12]. Kronberg, Anders. *Design and Simulation of Field Oriented Control and Direct Torque for a Permanent Magnet Synchronous Motor with Positive Saliency*. Upsala: UPPSALA Universitet, 2012.
- [13]. Xudong Wang, Risha Na. "*Simulation of PMSM Field-Oriented Control Based on SVPWM*." (IEEE) 2009.

[14]. Nana Sutarna, Bernadeta Siti Rahayu. "*Metode Tuning Operating Range Fuzzy Controller pada Sitem Orde Tiga.*" (Jurnal Teknik Elektro) 12 (2020).

[15]. Prasanta Sarkar, Sourav Bhunia. "*SVPWM Based Vector Control of PMSM Drive in Delta Domain.*" (ECCE) 2017.