

**SISTEM KENDALI KECEPATAN MOTOR *BRUSHLESS DC* (BLDC) DENGAN
PENGENDALI PI**



*Disusun Dalam Rangka Memenuhi Salah Satu Persyaratan Untuk
Menyelesaikan Program Strata-1 Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin*

DISUSUN OLEH:

ANDI FAUZAN ALIM

D41116315

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2020

HALAMAN JUDUL

**SISTEM KENDALI KECEPATAN MOTOR *BRUSHLESS DC* (BLDC) DENGAN
PENGENDALI PI**

DISUSUN OLEH:

ANDI FAUZAN ALIM

D41116315

TUGAS AKHIR

*Disusun Dalam Rangka Memenuhi Salah Satu Persyaratan Untuk
Menyelesaikan Program Strata-1 Departemen Teknik Elektro*

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2020

LEMBAR PENGESAHAN

**SISTEM KENDALI KECEPATAN MOTOR *BRUSHLESS DC* (BLDC)
DENGAN PENGENDALI PI**

Disusun oleh:

Andi Fauzan Alim

D41116315

Disusun dalam rangka memenuhi salah satu persyaratan untuk menyelesaikan
Program Strata-1 pada Sub-Program Teknik Kendali
Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin

Makassar, 30 November 2020

Disahkan oleh:

Pembimbing I

Pembimbing II



Dr. Ir. H. Rhiza S. Sadjad, MSEE.
NIP. 19570906 198203 1 004



Dr. A. Ejah Umraeni Salam, S.T., M.T.
NIP. 197209081997022001

Mengetahui,

Ketua Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin




Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T.
NIP. 19691026 199412 2 001

PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan dibawah ini, nama Firda Zhafirah, dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang berjudul “SISTEM KENDALI KECEPATAN MOTOR *BRUSHLESS DC (BLDC)* DENGAN PENGENDALI PI”, adalah karya ilmiah penulis sendiri, dan belum pernah digunakan untuk mendapatkan gelar apapun dan dimanapun. Karya ilmiah ini sepenuhnya milik penulis dan semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain yang telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggung jawabkan segala risiko.

Makassar, 20 November 2020

Yang membuat pernyataan,



Andi Fauzan Alim
NIM : D411 16 315

ABSTRAK

Motor BLDC banyak digunakan di berbagai bidang seperti bidang otomasi industri, otomotif, komputer, penerbangan, dan peralatan rumah tangga karena memiliki efisiensi yang tinggi, kepadatan daya yang tinggi, umur operasi yang panjang, dan biaya perawatan yang rendah. Motor BLDC bekerja tanpa menggunakan sikat sebagai alat komutasinya, tetapi menggunakan komutasi elektronik. Hal ini mengakibatkan motor BLDC membutuhkan sistem pengendalian yang lebih kompleks. Pada penelitian ini dilakukan pemodelan sistem kendali motor BLDC dengan pengendali PI pada *Simulink/MATLAB*. Struktur pengendali PI yang digunakan mengadopsi struktur sistem PLL, dimana sinyal *feedback* dan sinyal referensi yang digunakan berupa sinyal pulsa. Metode komutasi yang digunakan yaitu metode *six step commutation*. Pencarian nilai K_p dan K_i terbaik dilakukan dengan menggunakan metode nilai optimal fungsi tujuan dimana nilai K_p dan K_i terbaik adalah nilai K_p dan K_i yang menghasilkan nilai optimal fungsi tujuan J . Dari hasil simulasi pengujian yang telah dilakukan, didapatkan nilai K_p dan K_i terbaik yaitu $K_p = 1,1$ dan $K_i = 0,2$ dengan nilai $J = 0,412679$. Berdasarkan hasil simulasi, dengan nilai K_i dan K_p tersebut performa sistem dengan pengendali PI lebih baik dibandingkan dengan sistem tanpa pengendali PI.

Kata kunci: motor BLDC, pengendali PI, six step commutation, fungsi tujuan.

ABSTRACT

BLDC motors are widely used in various fields such as industrial automation, automotive, computers, aviation and household appliances due to their high efficiency, high power density, long operating life and low maintenance costs. A BLDC motor works without using a brush as a means of commutation, but using electronic commutation. This resulted in BLDC motors requiring a more complex control system. In this research, a speed control system of BLDC motors modeled in Simulink/MATLAB. The PI controller structure adopts the PLL system structure, where the feedback signal and reference signal used are pulse signals. The commutation method used is six step commutation. Method that we used in searching the best value of K_p and K_i is the optimal objective function value method where the value best of K_p and K_i is the value that produces the optimal value of objective function. From the results of the simulation tests that have been carried out, the best values for K_p and K_i are $K_p = 1.1$ and $K_i = 0.2$ with a value of $J = 0.412679$. Based on the simulation results, with the K_i and K_p , the system performance with PI controller is better than the system without PI controller.

Keywords: BLDC motor, PI controller, six step commutation, objective function.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kehadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan kasih sayang-Nya kepada kami sehingga tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik dan lancar. Penyusunan tugas akhir ini dilakukan dalam rangka pemenuhan salah satu syarat menutup Program Strata-1 Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Tak lupa pula kami mengucapkan banyak terima kasih kepada pihak-pihak yang telah meluangkan waktunya untuk membantu selama masa perkuliahan hingga pada proses penyelesaian tugas akhir ini.

Kami selaku pelaku penulis menyadari sepenuhnya bahwa tugas akhir ini masih memiliki banyak kesalahan dan kekurangan serta masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, kami membuka kesempatan kepada pembaca untuk memberikan kritik dan saran yang membangun untuk perkembangan penelitian ini dan perkembangan diri penulis sendiri. Semoga kesalahan dan kekurangan tersebut dapat menjadi pelajaran bagi kita semua.

Akhir kata, melalui tugas akhir ini kami berharap dapat turut serta dalam perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi serta dapat dimanfaatkan untuk kemaslahatan umat. Semoga apa yang telah kita usahakan dapat bernilai ibadah dan mendapatkan berkah dari-Nya.

Makassar, 10 November 2020

Andi Fauzan Alim

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH.....	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT.....	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1. 1 Latar Belakang	1
1. 2 Rumusan Masalah	2
1. 3 Tujuan Penelitian	3
1. 4 Batasan Masalah.....	3
1. 5 Manfaat Penelitian	3
1. 6 Metode Penelitian.....	4
1. 7 Sistematika Penulisan.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	6
2. 1 Motor BLDC	6
2. 2 Inverter Tiga Fasa	9

2.3	Pengendali PI	10
2.4	<i>Phase Locked Loop</i>	12
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN DAN PERANCANGAN.....		14
3.1	Gambaran Umum.....	14
3.2	Perancangan Sistem	15
3.2.1	Perancangan Sistem Penggerak Motor BLDC	16
3.2.2	Perancangan Sistem Kendali Kecepatan Motor BLDC.....	17
3.2.3	Spesifikasi Motor BLDC.....	19
3.3	Pemodelan Sistem	20
3.3.1	Sistem Penggerak Motor BLDC.....	20
3.3.2	<i>Frekuensi Generator</i>	36
3.3.3	<i>Phase Detector</i>	37
3.3.4	<i>Loop Filter</i>	38
3.3.5	<i>PI Controller</i>	38
3.4	Pencarian Nilai Parameter Pengendali PI	39
3.5	Skenario Pengujian.....	41
3.5.1	Pengujian Karakteristik Pembebanan.....	41
3.5.2	Pengujian Kondisi Transien	42
3.5.3	Pengujian dengan Gangguan	42
3.5.4	Pengujian Variasi Kecepatan.....	42

BAB 4	HASIL SIMULASI PENGUJIAN.....	44
4.1	Hasil Pencarian Nilai Parameter Pengendali PI.....	44
4.2	Hasil Pengujian Karakteristik Pembebanan	47
4.3	Hasil Pengujian Kondisi Transien.....	48
4.4	Hasil Pengujian dengan Gangguan	50
4.5	Hasil Pengujian Variasi Kecepatan.....	51
BAB 5	KESIMPULAN DAN SARAN.....	54
5.1	Kesimpulan	54
5.2	Saran.....	55
DAFTAR PUSTAKA	56
LAMPIRAN	58

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Konstruksi motor BLDC	7
Gambar 2.2 Skema pengoperasian motor BLDC [3]	8
Gambar 2.3 Rangkaian inverter tiga fasa	9
Gambar 2.4 Diagram blok pengendali PI [8]	11
Gambar 2.5 Diagram blok PLL	12
Gambar 3.1 Diagram alir tahapan penelitian	15
Gambar 3.2 Diagram blok sistem penggerak motor BLDC	16
Gambar 3.3 Struktur pengendali kecepatan motor BLDC dengan pengendali PI	18
Gambar 3.4 Model sistem kendali kecepatan motor BLDC dengan pengendali PI	20
Gambar 3.5 Model sistem penggerak motor BLDC	21
Gambar 3.6 Model blok motor BLDC	22
Gambar 3.7 Rangkaian ekuivalen motor BLDC	22
Gambar 3.8 Model blok <i>armature</i>	24
Gambar 3.9 Model blok <i>back emf</i>	26
Gambar 3.10 Model blok <i>electrical</i>	26
Gambar 3.11 Putaran rotor pada motor BLDC	27
Gambar 3.12 Model blok <i>mechanical</i>	29
Gambar 3.13 Model blok <i>rotor angle</i>	29
Gambar 3.14 Model blok inverter	30
Gambar 3.15 Model blok <i>L-L to L-N</i>	31
Gambar 3.16 Sinyal keluaran <i>hall sensor</i>	32

Gambar 3.17 Model blok <i>hall sensor</i>	33
Gambar 3.18 Model blok <i>switching control</i>	34
Gambar 3.19 Model blok <i>PWM Generator</i>	34
Gambar 3.20 Model blok <i>commutation logic</i>	35
Gambar 3.21 Model blok <i>frequency generator</i>	37
Gambar 3.22 Model blok <i>phase detector</i>	38
Gambar 3.23 Model blok <i>loop filter</i>	38
Gambar 3.24 Model blok <i>PI controller</i>	39
Gambar 3.25 Blok diagram perhitungan nilai fungsi tujuan.....	40
Gambar 4.1 Grafik hasil pencarian nilai K_p terbaik.....	45
Gambar 4.2 Grafik hasil pencarian nilai K_i terbaik.....	46
Gambar 4.3 Karakteristik pembebanan motor BLDC tanpa pengendali PI.....	47
Gambar 4.4 Karakteristik pembebanan motor BLDC dengan pengendali PI.....	48
Gambar 4.5 Hasil simulasi pengujian kondisi transien tanpa pengendali PI.....	49
Gambar 4.6 Hasil simulasi pengujian kondisi transien dengan pengendali PI	49
Gambar 4.7 Hasil simulasi pengujian gangguan tanpa pengendali PI.....	50
Gambar 4.8 Hasil simulasi pengujian gangguan dengan pengendali PI	51
Gambar 4.9 Hasil simulasi pengujian variasi kecepatan tanpa pengendali PI.....	52
Gambar 4.10 Hasil simulasi pengujian variasi kecepatan dengan pengendali PI .	52

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Sinyal kontrol inverter [7].....	10
Tabel 3.1 Spesifikasi motor BLDC.....	19
Tabel 3.2 Fungsi sudut rotor motor BLDC [10]	25
Tabel 3.3 Keluaran <i>hall sensor</i> berdasarkan sudut rotor [10].....	32
Tabel 3.4 Pola komutasi motor BLDC.....	35
Tabel 4.1 Hasil pencarian nilai K_p terbaik.....	44
Tabel 4.2 Hasil pencarian nilai K_i terbaik.....	45

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring perkembangan zaman, kebutuhan akan motor listrik yang andal dan memiliki efisiensi yang tinggi serta perawatan yang rendah semakin meningkat. Motor BLDC merupakan motor yang mampu memenuhi kebutuhan tersebut melampaui motor DC dengan sikat dan motor induksi yang banyak digunakan saat ini. Motor DC dengan sikat memiliki masalah pada sikatnya yang mudah aus dan menyebabkan percikan api pada saat motor beroperasi sehingga meningkatkan biaya perawatan pada motor. Motor induksi dapat menjawab masalah perawatan tersebut tetapi terkendala pada efisiensinya. Motor induksi cenderung memiliki efisiensi yang rendah karena adanya disipasi daya pada kumparan rotornya. Hal ini menyebabkan motor cepat panas [1].

Dibandingkan dengan motor DC dengan sikat dan motor induksi, motor BLDC memiliki beberapa keunggulan seperti karakteristik kecepatan terhadap torsi yang lebih baik, respon dinamik yang tinggi, lebih efisien dan lebih andal, umur operasi yang panjang (karena tidak menggunakan sikat), operasi senyap, rentang kecepatan yang lebih luas serta biaya perawatan yang rendah [2] [3]. Karena keunggulan tersebut, motor BLDC banyak digunakan di berbagai bidang seperti pada bidang otomasi industri, komputer, otomotif, penerbangan, peralatan militer, dan peralatan rumah tangga [2] [4].

Motor BLDC merupakan motor yang bekerja tanpa alat komutasi mekanik seperti sikat pada motor DC dengan sikat, tetapi menggunakan sistem komutasi

elektronik. Untuk mengoperasikan motor BLDC dibutuhkan sistem pengendalian yang lebih kompleks dari motor DC dengan sikat [5] [6] karena dibutuhkan sebuah pengendali dan inverter tiga fasa untuk mengatur pola komutasi motor. Kompleksitas dari pengendali ini akan meningkat berdasarkan pengaplikasian dari motor BLDC. Contohnya pada pengaplikasian motor BLDC dengan kondisi beban yang bervariasi seperti pada mesin cuci, pendingin dan pemanas ruangan, dan alat bantu pada sistem otomotif dan penerbangan. Akurasi kecepatan yang tinggi dan respon dinamik yang baik menjadi hal yang sangat penting untuk diperhatikan. Sehingga, untuk memenuhi performa tersebut dibutuhkan sebuah umpan balik kecepatan agar sistem dapat dikendalikan secara daur tertutup menggunakan algoritma pengendalian yang lebih maju [2].

Berdasarkan permasalahan tersebut maka dilakukanlah penelitian tugas akhir dengan judul **“SISTEM KENDALI KECEPATAN MOTOR BLDC DENGAN PENGENDALI PI”**.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut di atas, maka permasalahan yang menjadi objek penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana model sistem kendali kecepatan motor BLDC dengan pengendali PI?
2. Bagaimana nilai parameter K_p dan K_i terbaik untuk sistem kendali kecepatan motor BLDC dengan poengendali PI?

3. Bagaimana pengaruh pengendali PI pada sistem kendali kecepatan motor BLDC dengan pengendali PI?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian yang hendak dicapai pada penelitian ini antara lain:

1. Menghasilkan model sistem kendali kecepatan motor BLDC dengan pengendali PI.
2. Mengetahui nilai parameter K_p dan K_i terbaik pada sistem kendali kecepatan motor BLDC dengan pengendali PI.
3. Mengetahui pengaruh pengendali PI pada sistem kendali kecepatan motor BLDC dengan pengendali PI.

1.4 Batasan Masalah

Dalam melaksanakan penelitian ini, permasalahan yang akan dibahas dibatasi dengan ketentuan berikut:

1. Sistem dibuat dalam model simulasi yang dimodelkan pada aplikasi *Simulink/Matlab*.
2. Metode komutasi motor BLDC menggunakan metode *six step commutation*.
3. Pendeteksi posisi rotor menggunakan *hall sensor*.
4. Pencarian nilai parameter K_p dan K_i terbaik difokuskan pada simulasi gangguan beban.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa manfaat yakni antara lain:

1. Bagi masyarakat, penelitian ini dapat dijadikan sebagai model acuan dalam implementasi pengendali kecepatan motor BLDC.
2. Bagi Universitas, penelitian ini bermanfaat sebagai referensi ilmiah pada bidang perancangan sistem kendali secara umum dan pengembangan teknologi pengendalian kecepatan motor BLDC secara khusus.
3. Bagi peneliti, penelitian ini bermanfaat untuk menambah wawasan dan menambah skill dalam perancangan sistem kendali.

1. 6 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Studi literatur merupakan kajian yang dilakukan untuk mendapatkan literatur terkait sehingga dihasilkan landasan teori yang tepat sebelum melakukan perancangan.

2. Pemodelan dan simulasi

Pemodelan dan simulasi merupakan proses perancangan sistem dalam bentuk bagan kotak sehingga dapat dihasilkan respon dinamik sistem.

3. Analisis Data

Melakukan evaluasi terhadap respon dinamik sistem yang diperoleh dari hasil simulasi.

1. 7 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat, metode penelitian, dan sistematika penulisan pada penelitian ini.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi landasan teori berdasarkan literatur terkait yang menunjang penelitian ini.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN DAN PERANCANGAN

Bab ini berisi penjelasan mengenai tahapan penelitian ini secara garis besar dan proses perancangan sistem yang akan dibangun.

BAB 4 HASIL

Bab ini menampilkan data dan analisis hasil simulasi sistem yang telah dibuat.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan penelitian ini dan saran untuk pengembangan penelitian kedepan.

BAB 2

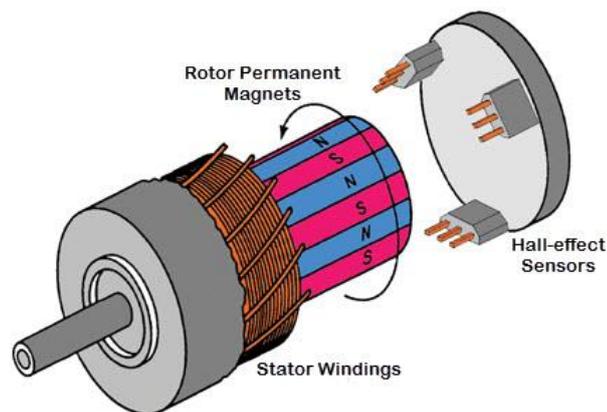
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Motor BLDC

Motor *brushless DC* (BLDC) atau dapat disebut juga dengan motor BLAC merupakan motor yang termasuk dalam jenis *permanent magnet synchronous motor* (PMSM). Perbedaan pemberian nama ini terjadi karena motor BLDC memiliki *back electromotive force* (*back EMF*) yang berbentuk trapezoid sedangkan motor BLAC memiliki *back EMF* yang berbentuk sinusoidal. Walaupun demikian, keduanya memiliki struktur yang sama dan dapat dikendalikan dengan metode *six step*. Dibandingkan dengan motor DC biasa, motor BLDC memiliki biaya perawatan yang lebih rendah dan kecepatan yang tinggi akibat tidak digunakannya sikat sebagai alat komutasi. Dibandingkan dengan motor induksi, motor BLDC memiliki efisiensi yang lebih tinggi karena rotor dan torsi awal yang lebih tinggi karena rotor terbuat dari magnet permanen. Walaupun memiliki kelebihan dibandingkan dengan motor DC dan motor induksi, pengendalian motor BLDC jauh lebih kompleks untuk mengendalikan kecepatan dan torsi yang konstan karena tidak adanya sikat yang menunjang proses komutasi dan harga motor BLDC yang lebih mahal [1].

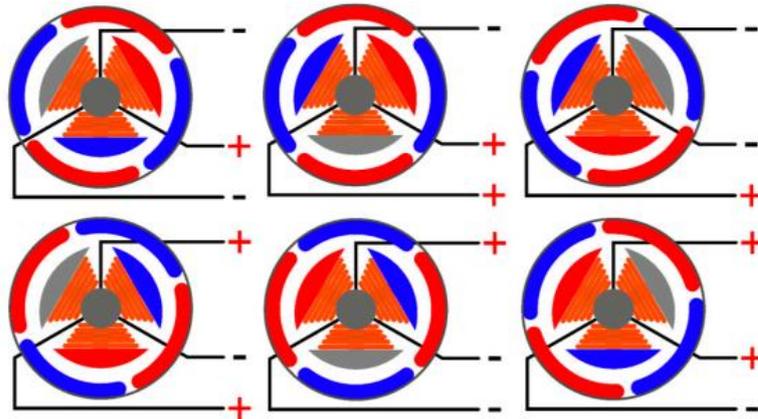
Terdapat dua komponen utama yang menyusun motor BLDC, yaitu rotor dan stator, seperti yang terlihat pada Gambar 2.1. Stator merupakan komponen motor yang tidak bergerak atau statis dan rotor adalah komponen motor yang bergerak. Rotor terdiri atas magnet permanen sedangkan stator terdiri dari kumparan jangkar tiga fasa. Pada umumnya, tiap fasa pada kumparan tersebut

saling terpisah 120° [3]. Oleh karena tidak adanya sikat pada motor BLDC untuk menentukan waktu komutasi yang tepat sehingga dihasilkan kecepatan yang konstan, diperlukan tiga buah *hall sensor*. Pada *hall sensor*, waktu komutasi ditentukan dengan cara mendeteksi medan magnet rotor dengan menggunakan tiga buah *hall sensor* untuk mendapatkan enam kombinasi *timing* yang berbeda [1].



Gambar 2.1 Konstruksi motor BLDC

Motor BLDC dapat bekerja ketika kumparan stator diberikan arus tiga fasa. Akibat adanya arus yang melewati kumparan, maka timbul medan magnet pada inti besi. Agar rotor dapat berputar, polaritas dari kumparan harus diubah setiap saat sehingga menghasilkan medan putar. Medan putar inilah yang akan mengakibatkan rotor yang terdiri dari magnet permanen dapat berputar. Berikut ini adalah skema perputaran rotor pada motor BLDC.



Gambar 2.2 Skema pengoperasian motor BLDC [3]

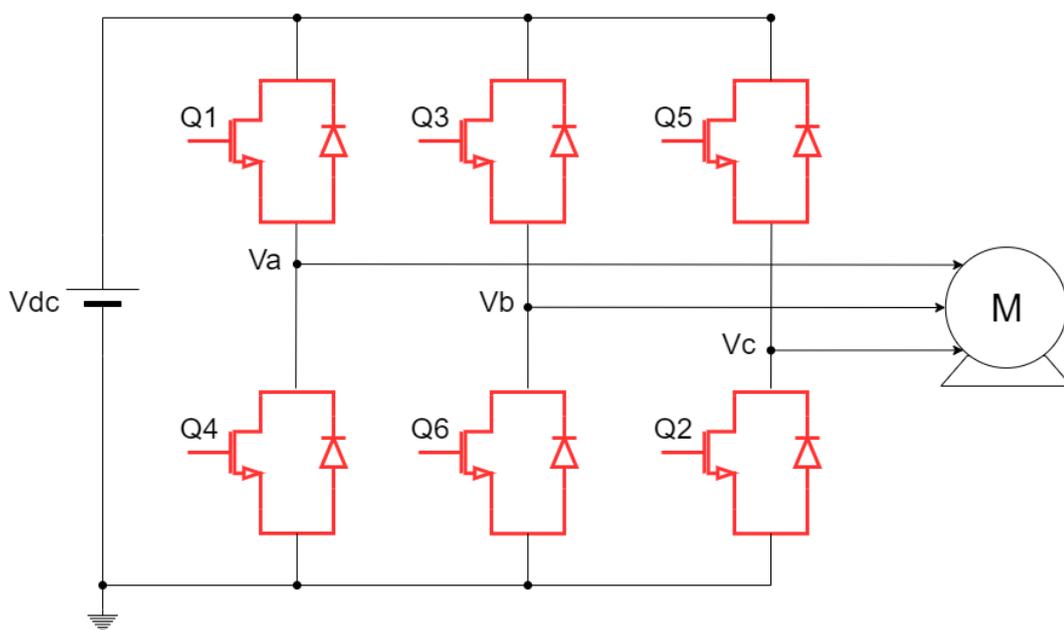
Pada Gambar 2.2 dibawah ini menunjukkan skema perputaran rotor pada motor dengan arah searah jarum jam. Dapat dilihat pada gambar tersebut polaritas kumparan pada tiap fasa berubah-ubah. Skema pengoperasian ini disebut skema *six step commutation* kerana perubahan polaritas kumparan berubah dalam enam tahap sehingga menghasilkan satu putaran penuh. Ketika kumparan stator diberi tegangan positif, inti besi akan menghasilkan kutub utara sehingga mengakibatkan kutub selatan magnet permanen pada rotor bergerak. Begitu pula sebaliknya, ketika kumparan stator diberi tegangan negatif, inti besi akan menghasilkan kutub selatan sehingga mengakibatkan kutub utara magnet permanen pada rotor bergerak. Pola ini akan terus berulang hingga menyebabkan motor berputar. Untuk memutar rotor pada kecepatan konstan, polaritas kumparan tiap fasa diubah dengan frekuensi yang konstan pula [3].

Jika diperhatikan secara seksama, terlihat bahwa satu putaran elektrik menghasilkan setengah putaran mekanik. Hal ini ditentukan berdasarkan jumlah pasang kutub pada rotor sehingga menghasilkan hubungan sebagai berikut.

$$\text{putaran mekanik} = \frac{2}{\text{jumlah pasang kutub}} \times \text{putaran elektrik} \quad (2.1)$$

2.2 Inverter Tiga Fasa

Motor BLDC merupakan jenis motor sinkron tiga fasa yang membutuhkan tegangan tiga fasa agar dapat bekerja. Oleh karena itu digunakan inverter tiga fasa untuk membangkitkan sinyal tiga fasa. Sinyal tiga fasa yang dibangkitkan oleh inverter ini berupa *quasi square wave* dimana sinyal AC yang dihasilkan berasal dari sinyal DC yang dimanipulasi sehingga menghasilkan sinyal yang menyerupai sinyal AC. Berikut ini adalah skema umum inverter tiga fasa yang digunakan.



Gambar 2.3 Rangkaian inverter tiga fasa

Inverter tiga fasa ini tersusun dari enam buah *power MOSFET* yang dirangkai secara berpasangan. Agar dapat menghasilkan tegangan tiga fasa, masing-masing *MOSFET* harus diberikan sinyal kontrol yang sesuai. Berikut ini merupakan skema kontrol inverter yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 2.1 Sinyal kontrol inverter [7]

Keadaan	Sinyal Kontrol					
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
1	1	0	0	0	0	1
2	1	1	0	0	0	0
3	0	1	1	0	0	0
4	0	0	1	1	0	0
5	0	0	0	1	1	0
6	0	0	0	0	1	1

Pengontrolan inverter yang digunakan ini menggunakan skema 180° dimana setiap *MOSFET* diaktifkan selama 180° . Pada skema ini tiga *MOSFET* diaktifkan secara bersamaan, dimana dua diantaranya berada pada rangkaian yang sama (rangkaiannya atas dan rangkaian bawah) dan satu *MOSFET* lainnya berada pada rangkaian lain. Setiap 60° , salah satu *MOSFET* akan OFF dan *MOSFET* lainnya akan ON [7].

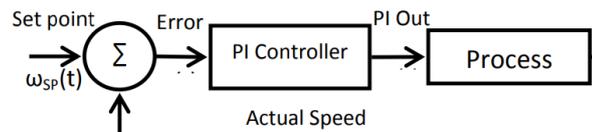
2.3 Pengendali PI

Pengendali PI merupakan pengendali yang sudah digunakan secara luas diberbagai bidang khususnya pada bidang industri. Pengendali PI bertugas untuk mengurangi eror antara suatu variabel proses dengan nilai *set point* yang diberikan dengan mengkalkulasi sinyal eror tersebut lalu memberikan suatu sinyal usaha yang

dapat mengurangi eror. Pada pengendali PI, terdapat dua komponen pengendali yang digunakan yaitu komponen *proportional* dan komponen *integral*. Komponen *proporsional* mempengaruhi keluaran pengendali berdasarkan nilai eror saat ini. Sedangkan komponen integral mempengaruhi keluaran pengendali berdasarkan nilai eror sebelumnya. Pengendali PI kemudian menjumlahkan hasil kalkulasi dari setiap komponen tersebut sehingga menghasilkan usaha [4]. Berikut ini adalah persamaan pengendali PI.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (2.2)$$

dimana $u(t)$ adalah keluaran pengendali PI, K_p adalah *proportional gain*, K_i adalah *integral gain*, dan $e(t)$ adalah eror. Blok diagram berikut ini menggambarkan proses kerja pengendali PI [8].



Gambar 2.4 Diagram blok pengendali PI [8]

Secara umum, terdapat empat parameter utama yang digunakan untuk mengukur performa suatu sistem kendali yaitu sebagai berikut:

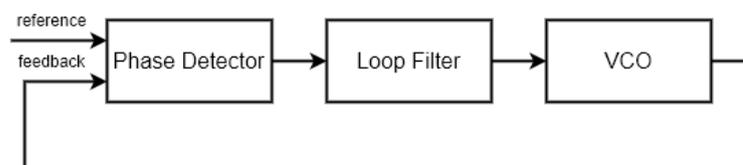
1. *Raise time* (T_r): didefinisikan sebagai waktu yang dibutuhkan suatu sistem untuk mencapai rentang nilai 10% sampai 90% dari nilai *set point*.
2. *Setling time* (T_s): yaitu waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai kondisi *steady state*.

3. *Steady state error*: didefinisikan sebagai perbedaan keluaran sistem pada kondisi *steady state* dengan *set point*.
4. *Overshoot*: yaitu nilai maksimum dari respon suatu sistem yang diukur dari nilai yang seharusnya atau nilai *set point* yang dapat dihitung dengan rumus berikut

$$\text{Overshoot} = \frac{\text{respon kecepatan maksimum} - \text{set point}}{\text{set point}} \quad (2.3)$$

2.4 Phase Locked Loop

Phase locked loop (PLL) merupakan salah satu teknik dalam pengendalian suatu sistem yang telah berkontribusi secara signifikan pada perkembangan teknologi dibidang komunikasi dan sistem kendali motor servo. Secara konseptual, PLL merupakan model *feedback loop* dimana *voltage controlled oscillator* (VCO) dapat sinkron secara otomatis dengan sinyal input yang diberikan. Struktur dasar PLL terdiri dari tiga komponen yang terhubung membentuk *feedback loop* seperti yang terlihat pada gambar dibawah ini [9].



Gambar 2.5 Diagram blok PLL

VCO merupakan osilator dimana frekuensi keluaran sebanding dengan tegangan input. Tegangan input VCO menentukan besar frekuensi sinyal yang akan dihasilkan. Keluaran VCO dan sinyal referensi dimasukkan pada blok *phase*

detector. Ketika *loop* dalam kondisi *locked* terhadap sinyal input, frekuensi sinyal keluaran VCO akan sama dengan frekuensi sinyal referensi. Blok *phase detector* menghasilkan sinyal berdasarkan perbedaan fasa antara sinyal referensi dengan sinyal keluaran VCO. Keluaran *phase detector* kemudian diubah oleh blok *loop filter*. *Loop* kemudian ditutup dengan menghubungkan keluaran *loop filter* dengan input VCO. Tegangan keluaran *loop filter* digunakan sebagai sinyal kontrol frekuensi VCO [9].