



TUGAS AKHIR - TF 141581

**RANCANG BANGUN KONTROLER MOTOR
BRUSHLESS DIRECT CURRENT (BLDC)
MENGUNAKAN *DIRECT TORQUE CONTROL*
DENGAN METODE PI**

**RIZKI DWI ARNANTO
NRP 02311340000042**

**Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc.**

**DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2018**



FINAL PROJECT - TF 141581

**IMPLEMENTATION OF BRUSHLESS DIRECT
CURRENT (BLDC) CONTROLLER USING
DIRECT TORQUE CONTROL WITH PI
CONTROLLER**

**RIZKI DWI ARNANTO
NRP. 02311340000042**

**Supervisor:
Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc.**

**ENGINEERING PHYSICS DEPARTEMENT
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya, 2018**

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

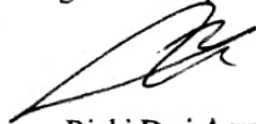
Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Rizki Dwi Arnanto
NRP : 02311340000042
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "Rancang Bangun Kontroler Motor *Brushless Direct Current* Menggunakan *Direct Torque Control* dengan Metode PI" adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, Juli 2018
Yang membuat pernyataan,



Rizki Dwi Arnanto
NRP. 02311340000042

LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR
"RANCANG BANGUN KONTROLER MOTOR
BRUSHLESS DC MENGGUNAKAN DIRECT TORQUE
CONTROL DENGAN METODE PI"

Oleh:

Rizki Dwi Arnanto
NRP. 02311340000042

Surabaya, 2018
Menyetujui

Dosen Pembimbing



Dr. Purwadi Agus Darwito, S.T., M.T.
NIP: 19620822 198803 1 001

Kepala Departemen
Teknik Fisika FISIKA-ITS



Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si, Ph.D
NIP. 19780902 200512 1 002
TEKNIK FISIKA

**"RANCANG BANGUN KONTROLER MOTOR
BRUSHLESS DC MENGGUNAKAN *DIRECT TORQUE*
CONTROL DENGAN METODE PI"**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Program Studi S1 Teknik Fisika
Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

RIZKI DWI ARNANTO
NRP. 02311340000042

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir

1. Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc. (Pembimbing I)
2. Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA. (Ketua Penguji)
3. Andi Rahmadiansah, ST, MT (Penguji I)
4. Dr. Katherin Indriawati S.T, M.T (Penguji II)
5. Lizda Johar Mawarani, S.T,M.T..... (Penguji III)

**SURABAYA
JULI 2018**

**RANCANG BANGUN KONTROLER MOTOR
BRUSHLESS DIRECT CURRENT MENGGUNAKAN
DIRECT TORQUE CONTROL DENGAN METODE PI**

Nama : RIZKI DWI ARNANTO
NRP : 02311340000042
Departemen : Teknik Fisika, ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc.

ABSTRAK

Motor BLDC merupakan jenis motor sinkron atau *Permanent Magnet Synchronous Motor* (PMSM), yang berarti medan magnet yang dihasilkan oleh belitan pada stator dan medan magnet dari magnet permanen pada rotor berotasi pada frekuensi yang sama. Untuk dapat menggunakan motor BLDC perlu adanya kontroler untuk melakukan komutasi. *Direct Torque Control* (DTC) merupakan suatu metode kontrol yang digunakan dalam pengendalian motor untuk kecepatan dan juga torsi secara *vector control*. Kontrol PI merupakan regulator kecepatan yang digunakan agar kecepatan putar motor stabil. Penggunaan DTC dan regulator kecepatan PI adalah untuk mendapatkan kontroler yang dapat menghasilkan kecepatan yang stabil dan respon torsi yang cepat. Hasil kontroler motor BLDC dengan DTC dan kontrol PI menunjukkan nilai optimal untuk parameter PI adalah K_c sebesar 22.7273 dan T_i sebesar 0.00083, dimana didapatkan waktu *steady state* selama 1.3438 sekon. Namun pada percobaan menggunakan kontroler motor BLDC secara langsung, didapatkan hasil yang memiliki banyak *ripple*, hal tersebut kemungkinan dikarenakan adanya gangguan torsi dari luar yang diakibatkan oleh kecepatan putar motor yang relative rendah ketika dilakukan uji coba.

Kata Kunci : Motor BLDC, PMSM, DTC, PI, kecepatan

**IMPLEMENTATION OF BRUSHLESS DIRECT CURRENT
(BLDC) CONTROLLER USING DIRECT TORQUE
CONTROL WITH PI CONTROLLER**

Name : RIZKI DWI ARNANTO
Student ID : 02311340000042
Departement : Teknik Fisika, ITS
Supervisors : Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc.

ABSTRACT

BLDC motor is one of kind synchronous motor or Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM), that means magnetic flux from stator coil and permanent magnet from rotor rotate at same frequency. Motor BLDC need comutation control to commutate the rotor. Direct Torque Control is one of kind commutation control. PI control is speed regulator to make the motor speed stable especially at steady-state. DTC and speed regulator PI is used to make controller that have stable speed and have fast torque response. The optimal PI parameter obtained is at $K_c = 22.7273$ and $T_I = 0.00083$, that have time to reach stedy state at 1.348 seconds. But when tried with controller, the output give a lot of ripple. That maybe caused torque disturbance and motor is drive at low speed, that need high torque.

Keywords: BLDC Motor, PMSM, DTC, PI, speed

KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan laporan penelitian Tugas Akhir yang berjudul **“RANCANG BANGUN KONTROLER MOTOR BRUSHLESS DC MENGGUNAKAN DIRECT TORQUE CONTROL DENGAN METODE PI”** dengan tepat waktu. Laporan ini dapat terselesaikan tepat waktu karena dukungan dan peran serta dari berbagai pihak. Sehubungan dengan adanya hal tersebut, maka dalam kesempatan kali ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Bapak dan Ibu beserta seluruh keluarga tercinta, terima kasih untuk dukungan tiada henti dan doa yang terus dipanjatkan hingga laporan Tugas Akhir ini dapat terselesaikan.
2. Bapak Agus Muhamad Hatta, ST, MSi, Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Fisika FTI-ITS.
3. Bapak Dr. Purwadi Agus Darwito, S.T., M.T. selaku pembimbing Tugas Akhir yang telah membina dan membimbing dengan baik.
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Sekartedjo selaku Dosen Wali penulis.
5. Teman-teman dari Laboratorium Simulasi dan Komputasi.
6. Teman-teman dari ITS Formula Electric.
7. Teman-teman S1 Teknik Fisika 2013 FTI-ITS.
8. Dosen dan teman-teman di PUI-SKO yang telah membantu dalam Tugas Akhir ini.
9. Serta semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa laporan ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis menerima segala masukan baik berupa saran, kritik, dan segala bentuk tegur sapa demi kesempurnaan laporan Tugas Akhir ini.

Demikian laporan Tugas Akhir ini penulis persembahkan dengan harapan dapat bermanfaat dalam akademik baik bagi penulis sendiri maupun bagi pembaca.

Surabaya, 28 Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI.....	v
LEMBAR PENGESAHAN.....	vii
LEMBAR PENGESAHAN II.....	ix
ABSTRAK.....	xi
ABSTRACT	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xix
DAFTAR TABEL.....	xxiii

BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Permasalahan.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan	3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Motor <i>Brushless Direct Current</i>	5
2.1.1 Motor BLDC	5
2.1.2 Cara Kerja Motor BLDC.....	6
2.1.3 Motor Sinkron.....	7
2.1.4 Model Matematika Motor BLDC.....	8
2.2 <i>Direct Torque Control</i> (DTC).....	11
2.3 Kontrol PI.....	17
2.3.1 Kontroller PI Diskrit.....	17
2.3.2 <i>Anti-Reset Windup</i>	17
2.4 Metode <i>Tunning</i> Parameter Kontrol PI	18

BAB III METODOLOGI	19
3.1 Studi Literatur	21
3.2 Skema DTC pada Motor BLDC.....	21
3.3 Simulasi Kontroler Motor BLDC dengan DTC Menggunakan Kontrol PI.....	22

3.3.1 Pembacaan Sektor pada Motor BLDC	24
3.3.2 Estimasi Torsi Elektromagnetik	25
3.3.3 Kontroler Histerisis Torsi Elektromagnetik	25
3.3.4 Pensaklaran Inverter Berdasarkan Pembacaan Sektor	26
3.4 Penentuan Parameter Proporsional dan Integral	27
3.5 Desain Kontroler Motor BLDC	27
3.6 Pemrograman Kontroler Motor BLDC	28
3.7 Pengambilan Data Kontroler Motor	29
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	31
4.1 Hasil Keluaran Simulasi Sistem <i>Direct Torque Control</i>	31
4.1.1 Keluaran Tegangan <i>Back-EMF</i> α dan β serta Arus Stator α dan β	31
4.1.2 Pembacaan Sektor Posisi Rotor pada Motor BLDC	33
4.1.3 Hasil Keluaran Kontroler Histerisis Torsi Elektromagnetik	34
4.1.3 Hasil Keluaran Pensaklaran Inverter	35
4.2 Hasil Keluaran Simulasi Kontroler Motor BLDC dengan DTC dan Regulator Kecepatan PI	47
4.3 Pembahasan	48
BAB V PENUTUP	51
5.1 Kesimpulan	51
5.2 Saran	51
DAFTAR PUSTAKA	53
LAMPIRAN	55

DAFTAR GAMBAR

Gambar	2.1	Skema motor BLDC	5
Gambar	2.2	Posisi sensor hall-effect pada motor BLDC	6
Gambar	2.3	Skema driver motor BLDC	7
Gambar	2.4	Sinyal sensor <i>hall-effect</i> , arus dan back-EMF motor BLDC pada setiap fasa	8
Gambar	2.5	Pembagian sektor dan posisi sensor <i>hall-effect</i> pada koordinat bidang $\alpha - \beta$	14
Gambar	2.6	Skema DTC secara keseluruhan pada motor BLDC	16
Gambar	3.1	Diagram alir proses pengerjaan kontroler motor BLDC	20
Gambar	3.2	Blok motor BLDC dengan sistem kontrol komutasi menggunakan DTC	22
Gambar	3.3	Blok diagram kontrol kecepatan pada motor BLDC meggunakan DTC dan regulator kecepatan PI	23
Gambar	3.4	Skema pembacaan sektor berdasarkan pembacaan sensor <i>hall-effect</i>	24
Gambar	3.5	Blok perhitungan nilai estimasi torsi elektromagnetik	25
Gambar	3.6	Kontrol histerisis torsi elektromagnetik dengan keluaran <i>TRUE</i> dan <i>FALSE</i>	26
Gambar	3.7	Blok Pensaklaran Inverter	26

Gambar	4.1	Keluaran (a) tegangan <i>back-emf</i> dan (b) arus stator pada bidang $\alpha - \beta$	32
Gambar	4.2	Keluaran hasil simulasi pembacaan sektor posisi rotor pada motor BLDC	33
Gambar	4.3	Keluaran kontroler histerisis elektromagnetik	34
Gambar	4.4	Keluaran dari pensaklaran inverter, yang berada pada <i>gate</i> 1(a), <i>gate</i> 2(b), <i>gate</i> 3(c), <i>gate</i> 4(d), <i>gate</i> 5(e), <i>gate</i> 6(f)	35
Gambar	4.5	DTC pada motor BLDC	39
Gambar	4.6	Respon Kecepatan Putar Motor dengan DTC	39
Gambar	4.7	Kontrol kecepatan putar motor menggunakan regulator kecepatan PI	40
Gambar	4.8	Respon sistem dengan umpan balik kecepatan putar motor	41
Gambar	4.9	Respon sistem dengan nilai K_u sebesar 50	42
Gambar	4.10	Respon sistem dengan $K_c = 22.7273$ dan $T_I = 0.00083$	43
Gambar	4.11	Perbandingan respon kontrol <i>closeloop</i> dan kontrol PI dengan parameter $K_c = 22.7273$ dan $T_I = 0.00083$	44
Gambar	4.12	Pertumbuhan <i>Integral Absolut Error</i> (IAE) pada kontrol DTC dengan regulator kecepatan PI (a), kontrol tanpa regulator kecepatan	46

		PI(b), dan perbandingan pertumbuhan <i>error</i> (c)	
Gambar	4.13	Respon torsi elektromagnetik terukur.	47
Gambar	4.14	Respon kecepatan putar motor pada kontroler motor BLDC	48

DAFTAR TABEL

Tabel	2.1	Pembagian Sektor dengan Pembacaan Hall Sensor	12
Tabel	2.2	Pensaklaran pada Inverter bedasarkan pembacaan fluks dan torsi elektromagnetik	13
Tabel	2.3	Tabel untuk menentukan parameter kontrol PI	18
Tabel	3.1	Tabel Parameter Motor BLDC	23

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sejak abad 19 konsep mengenai motor listrik terus berkembang. Motor listrik digunakan untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Penggunaan motor listrik sekarang ini telah digunakan secara luas, antara lain banyak digunakan pada peralatan instrumentasi dan otomasi industri, *automotive*, kedirgantaraan, dunia medis dan lain sebagainya[1][2].

Pada motor listrik DC konvensional, sistem transmisi daya listrik yang digunakan menggunakan cincin komutator berupa sikat (*brushed*) yang terbuat dari karbon[7]. Sikat tersebut memerlukan pergantian berkala untuk pemakaian tertentu, dikarenakan gesekan antara rotor dan sikat. Gesekan antara rotor dan sikat juga menyebabkan *power to weight* berkurang, selain itu gesekan tersebut berpengaruh terhadap efisiensi.

Dalam perkembangannya motor listrik DC konvensional telah banyak digantikan oleh *Brushless DC Motor* (motor BLDC). Pada motor BLDC, terdapat banyak keuntungan yang dimiliki. Pertama adalah efisiensi, dimana motor tersebut dapat dikontrol sampai pada torsi maksimum. Kedua adalah *controllability*, dimana motor BLDC dapat dikontrol dengan menggunakan *feedback* mekanik sehingga dapat dicapai kecepatan dan torsi seperti yang diinginkan. Kemudian adalah ketahanan yang tinggi dikarenakan tidak terdapat gesekan pada rotor dan komutator, selain itu juga ukurannya yang relatif kecil karena rasio *power to weight* yang tinggi[5][7]. Namun untuk mendapatkan segala keuntungan tersebut secara maksimal dibutuhkan adanya metode kontrol yang tepat.

Untuk dapat melakukan kontrol terhadap motor BLDC, diperlukan adanya pengetahuan mengenai cara kerja dari motor tersebut untuk dapat berputar atau untuk dapat menghasilkan kecepatan putaran tertentu. Terdapat banyak metode kontrol dari motor BLDC. Salah satu metode kontrol dari motor BLDC adalah *Direct Torque Control* (DTC). Metode tersebut secara langsung

melakukan pensaklaran pada vektor posisi yang dituju berdasarkan perbedaan antara nilai referensi dan aktual dari torsi elektromagnetik dan juga fluks[9]. Metode DTC memungkinkan untuk motor memiliki respon torsi yang cepat berdasarkan cara kerja kontrol tersebut[9]. Selain respon torsi yang cepat, juga dibutuhkan adanya kestabilan dari putaran motor, kontrol konvensional yang seringkali digunakan untuk kestabilan kecepatan putaran motor adalah menggunakan kontrol PI[3]. Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Malarvizhi dan Dr. Prabha, masih didapatkan *ripple* ketika motor pada *steady-state*. Kontrol PI memungkinkan mereduksi *steady-state error* sehingga sistem lebih stabil pada saat *steady-state*. Penggunaan kedua kontrol tersebut pada kontrol kecepatan motor BLDC memungkinkan untuk mendapatkan sistem dengan performa yang baik.

Oleh sebab itu, pada penelitian ini dilakukan penelitian mengenai kontroler motor BLDC dengan DTC dan regulator kecepatan menggunakan PI. Sehingga didapatkan kontroler motor BLDC yang dapat memiliki respon torsi yang cepat dan juga memiliki kestabilan, terutama pada saat *steady-state*.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan diatas, maka rumusan masalah dari tugas akhir ini antara lain:

- a. Bagaimana membuat kontroler motor BLDC yang dapat memutar rotor sehingga memiliki respon torsi yang cepat dan memiliki kecepatan stabil?
- b. Berapa parameter *Propositional* dan *Integral* yang tepat sehingga didapatkan respon kecepatan putar motor yang stabil?

1.3. Tujuan

Berdasarkan perumusan masalah yang telah diuraikan diatas, maka didapatkan tujuan dari tugas akhir ini antara lain :

- a. Membuat kontroler motor BLDC yang dapat mencapai kecepatan putar set point dengan cepat.

- b. Menentukan parameter *Propositional* dan *Integral* yang tepat sehingga didapatkan respon kecepatan putar motor yang stabil.

1.4. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam tugas akhir ini antara lain:

- A. *Direct Torque Control* beroperasi pada motor BLDC dengan menggunakan sensor *hall-effect*.
- B. Kontrol motor yang digunakan adalah DTC dengan kontrol kecepatan menggunakan PI.
- C. *Direct Torque Control* menggunakan kontrol histerisis torsi elektromagnetik.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

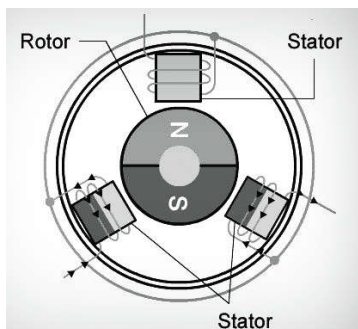
TNJAUAN PUSTAKA

2.1. Motor *Brushless Direct Current*

Motor BLDC banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, hal tersebut dikarenakan motor BLDC memiliki kinerja yang baik dan torsi yang besar, serta keandalan dan efisiensi yang tinggi. Dalam sebuah studi dinyatakan bahwa motor BLDC memiliki efisiensi yang paling tinggi dibandingkan dengan jenis motor lainnya[8].

2.1.1. Motor BLDC

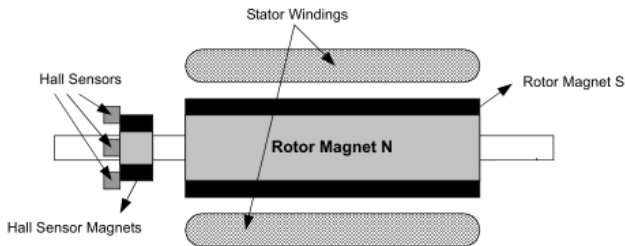
Seperti namanya motor BLDC adalah motor yang tidak memiliki sikat (*brush*), hal tersebut dikarenakan belitan pada motor BLDC tidak berotasi seperti pada motor DC yang memiliki sikat (motor *brushed DC*), melainkan magnet permanen yang merupakan rotor pada motor BLDC. Karena rotor pada motor BLDC merupakan magnet permanen maka tidak diperlukan adanya pemberian daya dari luar sehingga tidak diperlukan adanya koneksi elektrik, komutator dan juga sikat. Hal tersebut juga yang menyebabkan motor BLDC memiliki efisiensi yang tinggi dan kendalan yang tinggi sebab tidak gesekan pada sikat. Konstruksi utama dari motor BLDC terbagi kedalam dua bagian utama yaitu adalah stator (*stationary part*) dan rotor (*rotating part*). Pada stator merupakan belitan amartur dan rotor adalah magnet permanen. Skema dari motor BLDC dapat dilihat pada gambar 2.1



Gambar 2.1 Skema motor BLDC

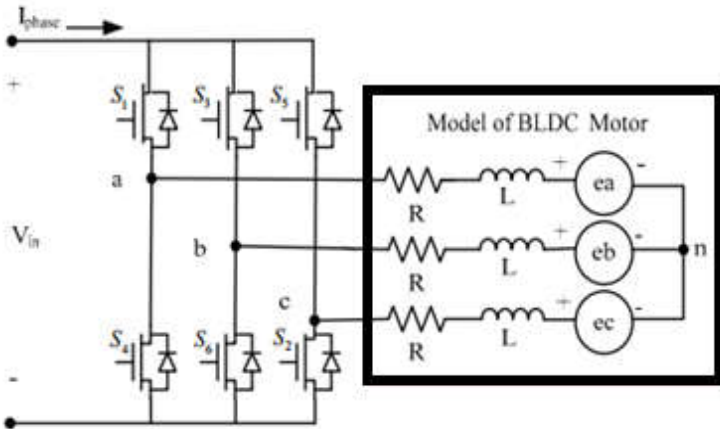
2.1.2. Cara Kerja Motor BLDC

Rotasi yang terjadi pada rotor dikarenakan perubahan arah medan magnet oleh belitan pada stator yang mengakibatkan gaya tarik-menarik dan gaya tolak-menolak antara magnet permanen dan juga electromagnet pada belitan stator. Torsi yang dihasilkan dari motor BLDC disebabkan adanya interaksi medan magnet antara belitan stator dan magnet permanen. Untuk melakukan komutasi dari motor BLDC dibutuhkan adanya *encoder* dari posisi rotor sehingga dapat ditentukan komutasi yang tepat untuk dapat memutar rotor. Posisi dari rotor dapat dideteksi dengan adanya sensor posisi berupa *hall-effect*. Posisi sensor berada pada *shaft*; gambar 2.2. Sinyal dari sensor posisi digunakan motor BLDC untuk memberikan energi pada belitan stator sesuai urutan. Posisi sensor biasanya terpisah sejauh 60° atau 120° .



Gambar 2.2 Posisi sensor *hall-effect* pada motor BLDC[14]

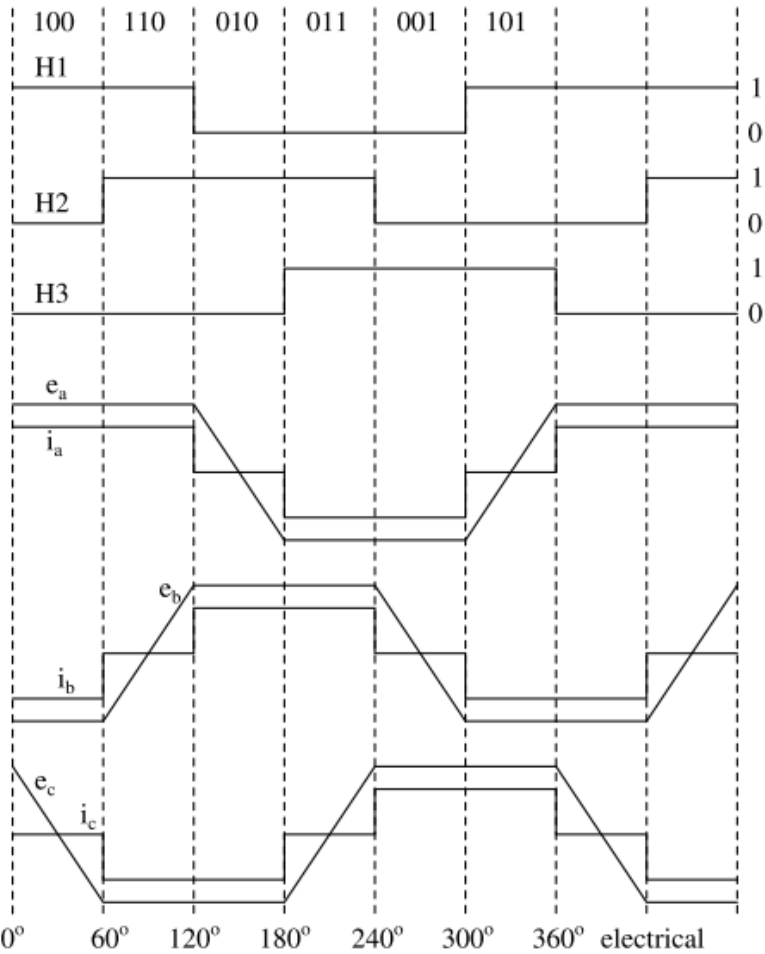
Dibutuhkan adanya kontroler untuk memberikan sinyal untuk dapat menggerakkan rotor pada motor BLDC. Sinyal tersebut adalah sinyal AC. Sinyal keluaran dari kontroler biasanya tidak sesuai dengan daya yang dibutuhkan untuk dapat memutar rotor. Maka dibutuhkan adanya driver dengan MOSFET atau IGBT yang dapat melakukan proses *switching* dan adanya IC (*Integrated Circuit*) driver yang dapat memberikan sinyal balik. Skema dari driver motor BLDC dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Skema driver motor BLDC

2.1.3. Motor Sinkron

Motor BLDC merupakan jenis motor sinkron atau *Permanent Magnet Synchronous Motor* (PMSM), yang berarti medan magnet yang dihasilkan oleh belitan pada stator dan medan magnet dari magnet permanen pada rotor berotasi pada frekuensi yang sama. Motor sinkron secara umum dibagi menjadi dua berdasarkan bentuk dari tegangan back-EMF nya, yaitu *PMSM with sinusoidal back-EMF* (BLAC) dan *PMSM with non-sinusoidal back-EMF* (BLDC). Bentuk back-EMF dari motor BLDC adalah berbentuk trapezoidal. Nilai dari tegangan back-EMF pada setiap fasa ditentukan berdasarkan posisi rotor; dapat dilihat pada gambar 2.4. Pada gambar tersebut perbedaan fasa adalah sebesar 120° dan komutasi terjadi pada setiap 60° .



Gambar 2.4 Sinyal sensor *hall-effect*, arus dan back-EMF motor BLDC pada setiap fasa[10]

2.1.4. Model Matematika Motor BLDC

Pada motor BLDC, terdapat tiga fasa lilitan pada stator seperti pada gambar 2.1. Motor BLDC dapat dideskripsikan dengan persamaan dibawah[10]:

$$v_{ab} = R(i_a - i_b) + L \frac{d(i_a - i_b)}{dt} + e_a - e_b \quad (2.1)$$

$$v_{bc} = R(i_b - i_c) + L \frac{d(i_b - i_c)}{dt} + e_b - e_c \quad (2.2)$$

$$v_{ca} = R(i_c - i_a) + L \frac{d(i_c - i_a)}{dt} + e_c - e_a \quad (2.3)$$

$$T_{em} = J \frac{d\omega_m}{dt} + k_f \omega_m + T_L \quad (2.4)$$

Simbol v , i dan e masing-masing menunjukkan tegangan antar fasa, arus fasa dan tegangan *back-emf* pada masing-masing fasa a , b , dan c . Nilai dari R dan L masing-masing adalah resistansi dan induktansi per fasa, dan T_{em} dan T_L masing-masing adalah torsi elektrik dan beban torsi. J adalah inersia dari rotor, k_f adalah friksi konstan dan ω_m adalah kecepatan putar dari rotor. Nilai tegangan *back-emf* dari masing-masing fasa dapat dituliskan dengan persamaan 2.5 sampai dengan 2.8.

$$e_a = \frac{k_e}{2} \omega_m F(\theta_e) \quad (2.5)$$

$$e_b = \frac{k_e}{2} \omega_m F\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.6)$$

$$e_c = \frac{k_e}{2} \omega_m F\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (2.7)$$

$$T_e = \frac{k_t}{2} \left[F(\theta_e) i_a + F\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) i_b + F\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) i_c \right] \quad (2.8)$$

Nilai dari k_e dan k_t masing-masing adalah konstanta *back-emf* dan konstanta torsi. Sudut elektrik adalah hasil kali sudut dari rotor dengan jumlah pasangan *pole* ($\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m$). Fungsi dari $F(\theta_e)$ menyatakan gelombang berbentuk trapezoid dari tegangan *back-emf*. Satu kali periode dari fungsi tersebut dapat dituliskan dengan

$$F(\theta_e) = \begin{cases} 1 & 0 \leq \theta_e \leq \frac{2\pi}{3} \\ 1 - \frac{6}{\pi} \left(\theta_e - \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{2\pi}{3} \leq \theta_e \leq \pi \\ -1 & \pi \leq \theta_e \leq \frac{5\pi}{3} \\ -1 + \frac{6}{\pi} \left(\theta_e - \frac{5\pi}{3} \right) & \frac{5\pi}{3} \leq \theta_e \leq 2\pi \end{cases} \quad (2.9)$$

Persamaan tegangan merupakan kombinasi linear dari dua persamaan tegangan lainnya. Dengan menghilangkan satu persamaan dan mengeliminasi satu variabel dengan hubungan arus seperti pada persamaan berikut.

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2.10)$$

maka persamaan tegangan menjadi

$$v_{ab} = R(i_a - i_b) + L \frac{d(i_a - i_b)}{dt} + e_a - e_b \quad (2.11)$$

$$v_{bc} = R(i_b + 2i_c) + L \frac{d(i_b + 2i_c)}{dt} + e_b - e_c \quad (2.12)$$

dan persamaan motor BLDC dapat dituliskan dengan

$$\begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ \omega_m \\ \theta_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ \omega_m \\ \theta_m \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{ab} - e_{ab} \\ v_{bc} - e_{bc} \\ T_e - T_L \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

$$\begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ \omega_m \\ \theta_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ \omega_m \\ \theta_m \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

2.2. *Direct Torque Control (DTC)*

Terdapat banyak cara untuk dapat menggerakkan motor BLDC. Perbedaan antara tiap metode kontrol dapat langsung berpengaruh terhadap performa dari motor. Secara garis besar metode kontrol yang digunakan pada motor BLDC dikategorikan menjadi dua, yaitu *scalar control* dan *vector control*. Pada *scalar control*, sistem tersebut didasarkan pada relasi antara variabel yang dikontrol pada keadaan *steady state*. Dengan mengubah nilai tegangan atau nilai *duty cycle* pada PWM yang diberikan kepada motor, maka didapatkan respon yang berbeda dari motor. Kontrol ini adalah sistem yang sederhana dan mudah untuk diimplementasikan pada kontroler motor, akan tetapi pada *scalar control* tidak memiliki akurasi yang baik pada respon kecepatan dan juga torsi, sehingga kurang cocok untuk digunakan pada kontroler dengan perubahan variabel yang dinamis. Sedangkan pada *vector control*, fluks dan torsi diidentifikasi dan divisualisasikan kedalam vektor orthogonal. Pada *vector control* persamaan motor dituliskan kedalam sistem koordinat dan sinkron dengan vektor dari flux rotor.

Direct Torque Control (DTC) merupakan suatu metode kontrol yang digunakan dalam pengendalian motor untuk kecepatan dan juga torsi secara *vector control*. Prinsip dari metode DTC (*Direct Torque Control*) adalah menentukan vektor tegangan stator sesuai dengan perbedaan nilai antara nilai referensi dan juga nilai aktual dari torsi dan juga fluks stator.

Skema DTC pertama kali dikenalkan oleh Takahashi dan Depenbrock untuk motor induksi pada pertengahan tahun 1980-an. Kemudian pada akhir 1990-an, metode DTC pada PMSM dikembangkan. Sekarang ini pengaplikasian metode DTC telah berkembang pada motor BLDC, digunakan untuk dapat meminimalisasikan riak (*ripple*) pada torsi sehingga didapatkan respon torsi yang presisi dan mendapatkan respon torsi yang cepat. Metode DTC meliputi perhitungan estimasi pada komponen fluks dan juga torsi elektromagnetik. Nilai estimasi didapatkan berdasarkan nilai arus dan tegangan pada motor. Estimasi fluks didapatkan berdasarkan tegangan stator pada orthogonal, dan estimasi torsi elektromagnetik didapatkan berdasarkan vektor arus

stator dan vektor fluks pada orthogonal. Hasil estimasi dari kedua komponen digunakan untuk dibandingkan dengan nilai aktual dari masing-masing komponen, hasil tersebut kemudian menjadi masukan untuk histerisis yang nantinya menjadi keluaran dengan nilai 1,0,-1 untuk komponen fluks, dan keluaran 1 (torsi dinaikkan) dan -1 (torsi diturunkan) untuk komponen torsi elektromagnetik. Keseluruhan komparasi dan histerisis disebut dengan kontroler histerisis untuk masing-masing komponen. Hasil dari kontroler histerisis digunakan untuk menentukan pensaklaran (*on-off*) yang tepat pada inverter sesuai sektor daripada rotor. Agar pensaklaran dapat sesuai, maka dibutuhkan pembacaan sektor rotor dengan atau tanpa menggunakan sensor. Pembacaan dengan menggunakan sensor dilakukan menggunakan *hall-effect*. Hasil pembacaan sektor dari rotor dengan menggunakan *hall-effect* dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Pembagian Sektor dengan Pembacaan Hall Sensor

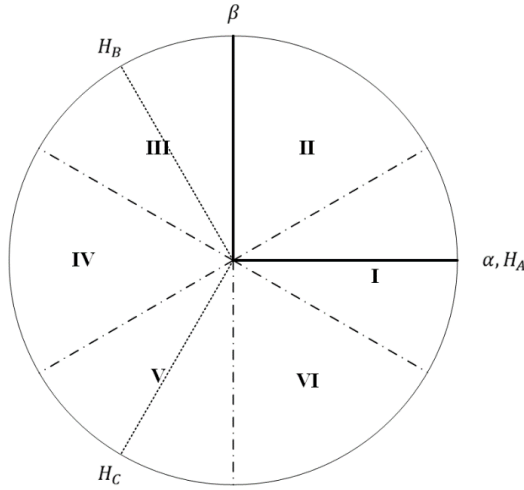
Sektor	I	II	III	IV	V	VI
(H_{ABC})	110	010	011	001	101	100

Pensaklaran inverter pada motor BLDC bertujuan agar kumparan pada stator memiliki gaya elektromagnetik sehingga rotor pada motor BLDC dapat berputar karena gaya magnet yang bekerja antara rotor dan stator. Pensaklaran yang tepat dibutuhkan agar rotor dapat berputar sesuai dengan keberadaan sektor rotor dan sektor yang akan dituju selanjutnya sesuai dengan keluaran kontroler histerisis pada komponen torsi elektromagnetik dan fluks. Perputaran secara terus-menerus dari rotor akan menyebabkan kecepatan pada motor BLDC. Pensaklaran inverter berdasarkan pembacaan fluks dan torsi elektromagnetik dapat dilihat pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 Pensaklaran pada Inverter berdasarkan pembacaan fluks dan torsi elektromagnetik[5]

φ	τ	Sektor					
		I	II	III	IV	V	VI
-1	1	V1 (100001)	V2 (001001)	V3 (011000)	V4 (010010)	V5 (000110)	V6 (100100)
	-1	V6 (100100)	V1 (100001)	V2 (001001)	V3 (011000)	V4 (010010)	V5 (000110)
0	1	V2 (001001)	V3 (011000)	V4 (010010)	V5 (000110)	V6 (100100)	V1 (100001)
	-1	V5 (000110)	V6 (100100)	V1 (100001)	V2 (001001)	V3 (011000)	V4 (010010)
1	1	V3 (011000)	V4 (010010)	V5 (000110)	V6 (100100)	V1 (100001)	V2 (001001)
	-1	V4 (010010)	V5 (000110)	V6 (100100)	V1 (100001)	V2 (001001)	V3 (011000)

Untuk menentukan pensaklaran yang tepat dapat dilakukan dengan cara mengetahui posisi sektor rotor aktual kemudian dilakukan pensaklaran sesuai pada tabel 2 dengan didasari oleh keluaran kontroler histerisis pada komponen torsi elektromagnetik dan fluks. Semisal fluks yang bekerja adalah pada keadaan konstan, dan sektor yang terdeteksi dari *hall-effect* adalah pada sektor II dan hasil komparasi antara torsi elektromagnetik aktual dan estimasi adalah bernilai positif sehingga menyebabkan keluaran kontroler histerisis bernilai 1, maka pensaklaran yang dilakukan pada inverter adalah V3(011000). Begitu juga ketika nilai komparasi torsi elektromagnetik aktual dan estimasi bernilai negatif yang menyebabkan kontroler histerisis bernilai -1, sehingga pensaklaran yang dilakukan pada inverter adalah V6(100100). Sektor posisi pada bidang $\alpha - \beta$ dapat dilihat pada gambar 2.5



Gambar 2.5 Pembagian sektor dan posisi sensor *hall-effect* pada koordinat bidang $\alpha - \beta$

Permasalahan DTC pada motor BLDC dengan kontrol torsi elektromagnetik adalah dapat mengestimasi nilai torsi elektromagnetik secara tepat. Untuk mendapatkan nilai estimasi torsi elektromagnetik. Torsi dapat diketahui dengan arus vektor dari stator dan vektor fluks stator. Untuk mengetahui nilai vektor dari fluks stator pada koordinat bidang $\alpha - \beta$ adalah dengan persamaan 2.15 dan 2.16[5].

$$\varphi_{s\alpha} = \int V_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha} dt \quad (2.15)$$

$$\varphi_{s\beta} = \int V_{s\beta} - R_s i_{s\beta} dt \quad (2.16)$$

Dimana nilai R_s adalah resistansi pada belitan stator. Kemudian nilai dari $i_{s\alpha}$ dan $i_{s\beta}$ dapat diketahui dengan transformasi *Clarke* yang dapat mentransformasi arus serta tegangan *back-emf* tiga fasa ke dalam orthogonal $\alpha - \beta$ [11][12] persamaan 2.17 dan 2.18.

$$i_{s\alpha} = i_{sa} \quad (2.17)$$

$$i_{s\beta} = \frac{\sqrt{3}}{3} (i_{sa} + 2i_{sb}) \quad (2.18)$$

Nilai dari $i_{s\alpha}$ dan $i_{s\beta}$ adalah magnitudo arus pada koordinat bidang $\alpha - \beta$. Fluks pada rotor dapat dituliskan dengan persamaan 2.19 dan 2.20.

$$\varphi_{r\alpha} = \varphi_{s\alpha} - Ls \cdot i_{s\alpha} \quad (2.19)$$

$$\varphi_{r\beta} = \varphi_{s\beta} - Ls \cdot i_{s\beta} \quad (2.20)$$

Torsi elektromagnetik dari motor BLDC dapat dituliskan dengan persamaan 2.21

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \left(\frac{d\varphi_{r\alpha}}{d\theta_e} i_{s\alpha} + \frac{d\varphi_{r\beta}}{d\theta_e} i_{s\beta} \right) \quad (2.21)$$

dimana nilai dari

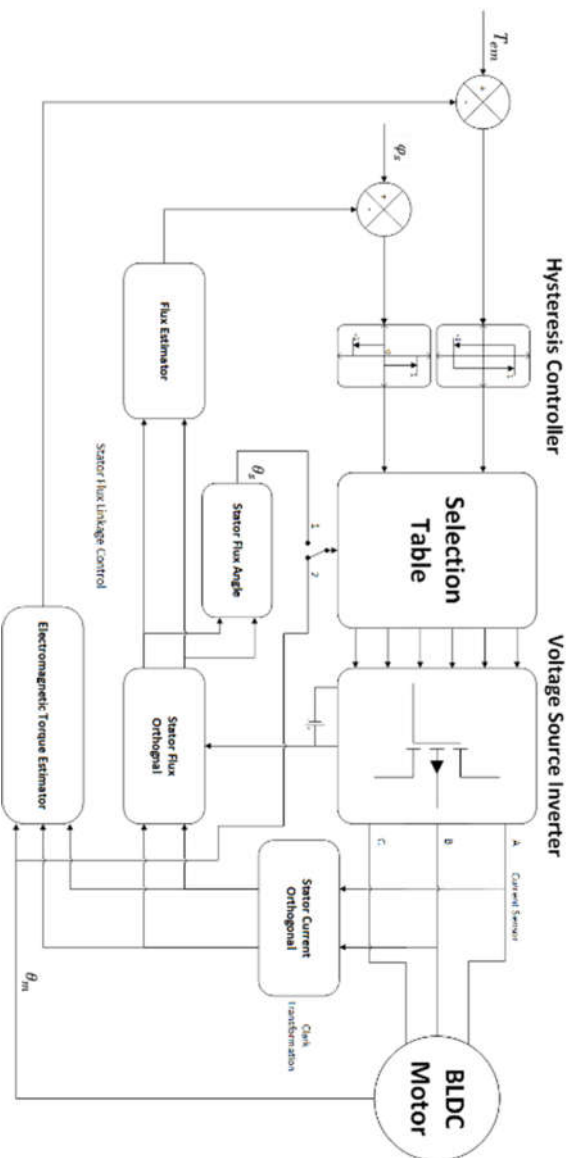
$$\frac{d\varphi_{r\alpha}}{d\theta_e} = \frac{e_\alpha}{\omega_e}, \quad (2.22)$$

$$\frac{d\varphi_{r\beta}}{d\theta_e} = \frac{e_\beta}{\omega_e}, \quad 2.23$$

sehingga didapatkan

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \left(\frac{e_\alpha}{\omega_e} i_{s\alpha} + \frac{e_\beta}{\omega_e} i_{s\beta} \right) \quad (2.24)$$

Untuk melihat skema DTC secara keseluruhan dapat dilihat pada gambar 3.2. Pada gambar 3.2, pembacaan sektor posisi dilakukan dengan menggunakan pembacaan sensor *hall-effect*.



Gambar 3.2 Skema DTC secara keseluruhan pada motor BLDC [5]

2.3. Kontrol PI

Variasi dari kontrol *Proportional Integral Derivative* (PID) salah satunya adalah hanya dengan menggunakan kontrol proporsional dan integral (PI). Nilai keluaran dari kontroler ($u(t)$) yang diberikan ke sistem adalah sebagai berikut.

$$u(t) = K_c e(t) + \frac{K_c}{T_I} \int_0^t e(t) dt \quad (2.25)$$

Dimana $e(t)$ adalah nilai *error* yang terjadi pada *set point* (SP), yaitu perbedaan antara nilai SP dan variabel terukur (PV). Nilai dari $e(t)$ dapat dituliskan dengan

$$e(t) = SP - PV \quad (2.26)$$

Terdapat dua nilai *tuning* pada kontroler PI, yaitu K_c (*controller gain*) dan *integral time constant* (T_I). Nilai K_c proporsional terhadap nilai *error* pada SP dan juga nilai dari integral *error*, dimana semakin tinggi nilai nya membuat sistem kontrol lebih agresif dalam menanggapi *error* dari SP. Kelebihan dari kontrol PI adalah dapat mereduksi nilai dari *steady-state error*.

2.3.1. Kontroler PI Diskrit

Kontroler digital diimplementasikan dalam bentuk diskrit pada periode sampling tertentu. Sehingga, untuk dapat mengimplementasikan kontrol PI pada kontroler digital diperlukan persamaan diskrit dari kontrol PI itu sendiri. Modifikasi pada kontrol PI pada persamaan diskrit adalah mengganti bentuk kontinyu dari integral dengan penjumlahan dari *error*, dengan menggunakan Δt sebagai waktu selama pengambilan sampling dan nt merupakan jumlah sampling.

$$u(t) = K_c e(t) + \frac{K_c}{T_I} \sum_{i=1}^{nt} e_i(t) \Delta t \quad 2.27$$

2.3.2. Anti-Reset Windup

Hal penting dalam kontrol dengan menggunakan integral adalah agar nilai output dari kontroler tersebut tidak berada pada nilai yang sangat tinggi dan/atau tidak berada pada nilai yang sangat

rendah. Hal tersebut dikarenakan pada kontrol dengan menggunakan integral berarti menjumlahkan seluruh *error* yang ada selama sistem berjalan, sehingga perlu diberikan adanya batas saturasi (*saturation limit*). Batas saturasi akan membatasi keluaran kontrol sampai nilai penjumlahan dari *error* berkurang. *Anti-reset windup* membuat kontrol integral tidak mengakumulasi *error* selama/ketika keluaran kontroler berada pada batas atas atau batas bawah dari batas saturasi.

2.4. Metode *Tuning* Parameter Kontrol PI

Metode tuning Zieger-Nichols adalah metode heuristik dalam menentukan parameter pada kontroler PID. Sejak ditemukan sistem kontrol PID pada tahun 1910 dan metode tuning Zieger-Nichols pada tahun 1942, kepopuleran PID semakin meningkat dengan cepat. Namun, untuk menentukan parameter PID, tidak ada metode standar yang digunakan, sehingga terdapat beberapa variasi dan metode dalam menentukan parameter PID.

Untuk dapat menentukan parameter K_c dan T_I pada kontroler PI, dilakukan dengan cara meniadakan kontrol integral terlebih dahulu. Kemudian mengubah nilai K_c secara perlahan, dan dilakukan sampai dengan keluaran dari sistem berada pada *steady state*, sebelum menggunakan nilai K_c lainnya. Ketika keluaran sistem dari nilai K_c berosilasi secara periodik dan terus menerus (atau mendekati hal tersebut), maka nilai dari K_c diganti dengan K_u (*ultimate gain*) dan periode osilasi tersebut ditandai dengan P_u (*ultimate period*). Nilai dari K_u dan P_u kemudian digunakan untuk mencari nilai dari K_c dan T_I sesuai pada tabel 2.3

Tabel 2.3 Tabel untuk menentukan parameter kontrol PI

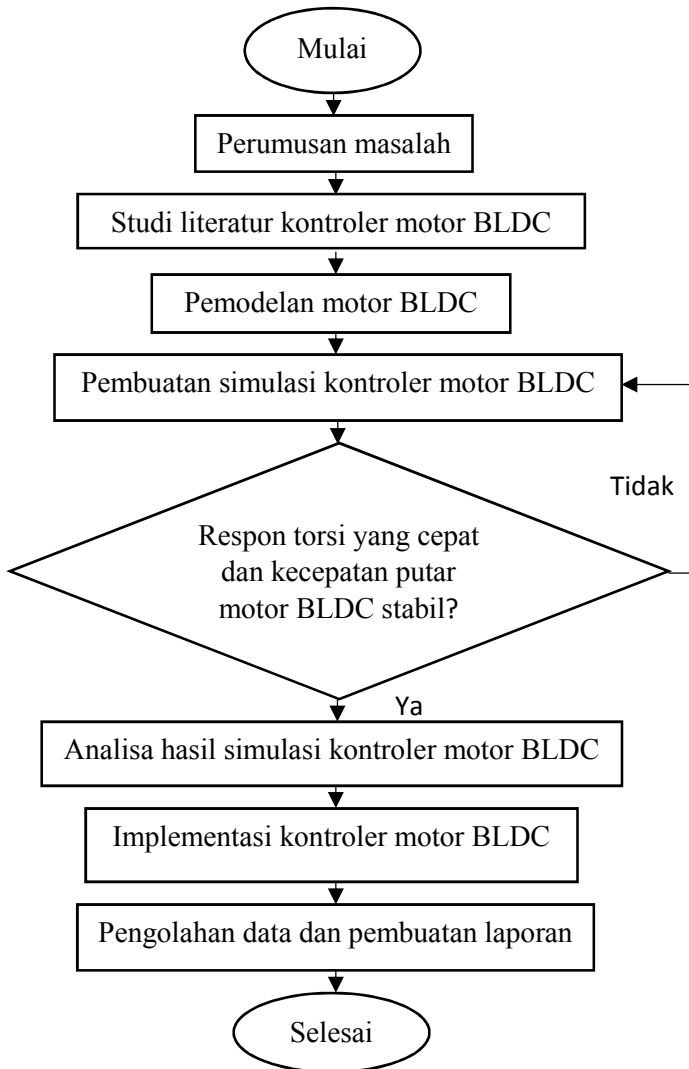
	K_c	T_I
Kontrol PI	$K_u/2.2$	$P_u/1.2$

BAB III

METODOLOGI

Pada tugas akhir ini dibuat kontroler motor BLDC dengan keluaran berupa kecepatan putar motor. Untuk mendapatkan kecepatan putar motor yang sesuai dengan yang dikehendaki, dilakukan kontrol bertingkat dengan menggunakan kontrol PI yang berfungsi sebagai regulator kecepatan putar motor BLDC dan DTC yang merupakan kontrol vektor untuk dapat menggerakkan rotor pada motor BLDC agar bergerak sesuai dengan torsi elektromagnetik yang di estimasi atau dapat disebut sebagai kontrol komutasi. Pergerakan rotor yang sesuai sektor karena DTC secara terus-menerus, akan menghasilkan kecepatan putar dari rotor. Kecepatan putar motor BLDC kemudian akan disesuaikan dengan nilai kecepatan putar motor *set point*. Penggunaan regulator kecepatan PI dan DTC sebagai kontrol bertingkat adalah agar didapatkan respon torsi yang cepat dan kecepatan putar motor yang stabil. Pada DTC, posisi rotor akan bergerak menuju sektor posisi rotor yang dituju setelah dilakukan estimasi torsi elektromagnetik. Rotor bergerak sesuai dengan tabel konduksi pada inverter, sehingga keadaan (*state*) dari pensaklar pada inverter akan berubah sesuai dengan sektor yang dituju. Cara kerja demikian dapat memberikan respon torsi yang cepat, akan tetapi cara kerja tersebut akan menghasilkan *ripple* sehingga kecepatan putar dari motor akan menjadi tidak stabil[9]. Untuk menanggulangi hal tersebut kemudian digunakan kontrol PI yang dapat mereduksi kesalahan pada *steady-state*[13], sekaligus sebagai regulator kecepatan putar dari motor BLDC.

Perancangan kontroler motor BLDC menggunakan DTC dan regulator kecepatan PI dilakukan dengan cara melakukan simulasi kontrol pada perangkat lunak terlebih dahulu sebelum dilakukan perancangan kontroler. Langkah-langkah yang dilakukan dalam pelaksanaan penelitian ini dapat digambarkan dalam gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir proses pengerjaan kontroler motor BLDC

Implementasi kontroler motor BLDC dengan kontrol bertingkat menggunakan DTC dan regulator kecepatan PI memerlukan adanya proses simulasi sehingga dapat mengurangi terjadinya kesalahan pada saat melakukan implementasi kontroler motor BLDC, selain itu pembuatan simulasi juga bertujuan untuk mendapatkan parameter dari kontrol kecepatan yang sesuai sehingga didapatkan respon torsi yang cepat dan juga kecepatan putar motor yang stabil. Setelah didapatkan parameter kontrol kecepatan yang sesuai, implementasi kontroler dilakukan dengan cara memasukkan program yang dibuat pada kontroler motor BLDC.

3.1. Studi Literatur

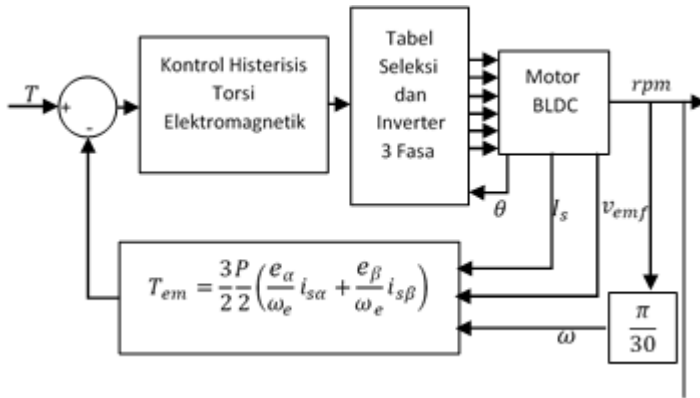
Tahapan ini merupakan tahapan awal dalam pengerjaan penelitian ini. Tahapan ini bertujuan untuk mengetahui dan mempelajari teori-teori dasar untuk menunjang dalam pelaksanaan tugas akhir. Penelitian ini berhubungan dengan kontrol motor BLDC dengan menggunakan DTC, sehingga penelitian-penelitian sebelumnya mengenai kontrol motor sinkron dengan metode DTC dijadikan sebagai referensi dari tugas akhir ini.

Literatur-literatur yang digunakan untuk menunjang penelitian ini diambil dari berbagai sumber, baik itu jurnal – jurnal penelitian sebelumnya, buku dan lain sebagainya. Penelitian ini juga menggunakan perangkat lunak MATLAB dan Keil μ Vision, sehingga dibutuhkan juga pemahaman mendalam dalam penggunaan perangkat lunak tersebut.

3.2. Skema DTC pada Motor BLDC

Pada motor BLDC nilai amplitudo fluks hampir bernilai konstan. Karena hal tersebut, maka kontrol fluks tidak digunakan atau dihilangkan, sehingga hanya digunakan kontrol histerisis torsi elektromagnetik. Hal tersebut juga merupakan penyebab penggunaan sensor untuk menentukan posisi sektor dari rotor menggunakan sensor *hall-effect*. Dengan dihilangkannya kontrol fluks, maka terdapat konsekuensi terhadap metode pensaklaran pada inverter. Pensaklaran yang digunakan pada tugas akhir ini

adalah pada saat keluaran kontroler histerisis pada komponen fluks berada pada nilai 0, seperti pada tabel 2.2. Untuk mengetahui keberadaan sektor posisi dari rotor digunakan sensor *hall-effect* dengan cara pembacaan seperti pada tabel 2.1. Karena tidak digunakan kontrol histerisis pada komponen fluks, maka untuk mendapatkan nilai estimasi dari torsi elektromagnetik digunakan persamaan 2.24. Skema dari DTC bekerja sebagai kontrol komutasi untuk motor BLDC, dimana untuk dapat melakukan komutasi pada motor BLDC dibutuhkan metode kontrol tertentu, karena terkait dengan posisi rotor dan juga pensaklaran pada inverter.



Gambar 3.2 Blok motor BLDC dengan sistem kontrol komutasi menggunakan DTC

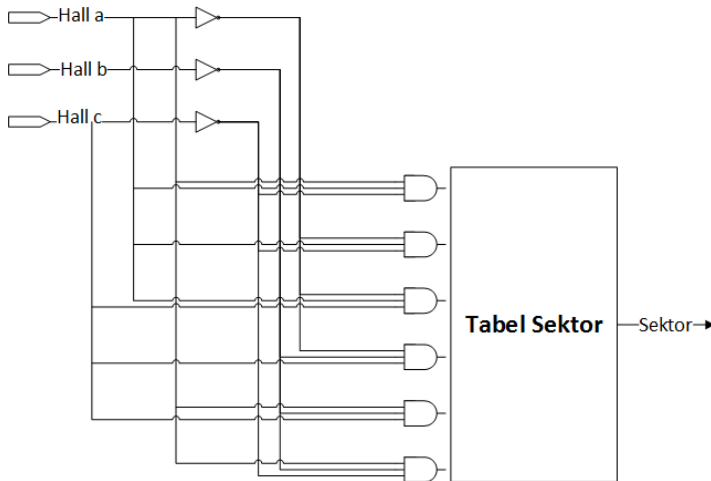
3.3. Simulasi Kontroler Motor BLDC dengan DTC Menggunakan Kontrol PI

Pada tugas akhir ini kontrol kecepatan motor BLDC dengan regulator kecepatan PI dan DTC dilakukan sebagai kontrol bertingkat. Regulator kecepatan PI memberikan keluaran berupa nilai torsi yang kemudian nilai tersebut berlaku sebagai masukan kedalam skema DTC (gambar 3.2). Diagram blok regulator kecepatan PI dan DTC dapat dilihat pada gambar 3.3.

Parameter-parameter pada tabel 3.1 terbagi kedalam dua bagian, yaitu parameter elektrik dan juga parameter mekanik. Parameter elektrik meliputi resistansi (R) dan juga induktansi (L) dari motor, sedangkan parameter mekanik terdiri dari konstanta *back-emf* (k_e), konstanta torsi (k_t), koefisien gaya gesek (B), dan momen inersia motor (J). Model motor BLDC yang digunakan pada tugas akhir ini adalah motor *Permanent Magnet Synchronous Motor* (PMSM) dengan tegangan *back-EMF* yang berbentuk *non-sinusoidal* atau berbentuk trapezoid yang berada pada MATLAB/Simulink. Simulasi secara keseluruhan dari motor BLDC dengan kontrol PI dan DTC pada MATLAB/Simulink dapat dilihat pada lampiran.

3.2.1. Pembacaan Sektor pada Motor BLDC

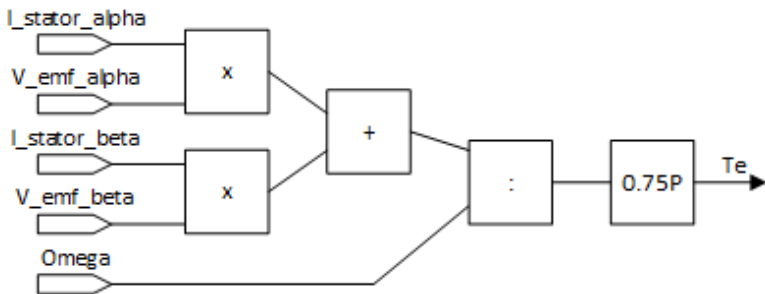
Pembacaan sektor menggunakan sensor *hall-effect* dilakukan sesuai dengan tabel 2.2. Keluaran dari sensor *hall-effect* bernilai 1 (satu) atau 0 (nol) seperti pada gambar 2.4 Posisi dari sensor *hall-effect* sesuai sektor dapat dilihat pada gambar 2.5. Menggunakan data-data yang telah disebutkan, maka dibuat model pembacaan dari sektor dengan sensor *hall-effect* seperti pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Skema pembacaan sektor berdasarkan pembacaan sensor *hall-effect*

3.2.2. Estimasi Torsi Elektromagnetik

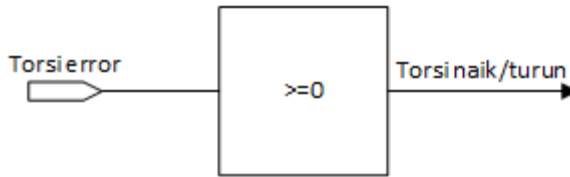
Estimasi nilai torsi elektromagnetik pada motor BLDC didapatkan sesuai dengan persamaan 2.24. Paramater yang digunakan pada persamaan tersebut antara lain adalah tegangan *back-emf*, arus stator dan juga kecepatan putar dari rotor pada motor BLDC. Sebelum melakukan estimasi perlu dilakukan transformasi dari tegangan *back-emf* dan arus stator pada orthogonal $\alpha - \beta$ dengan menggunakan transformasi *Clarke*. Model dari persamaan estimasi torsi elektromagnetik dapat dilihat pada gambar 3.5.



Gambar 3.5 Blok perhitungan nilai estimasi torsi elektromagnetik

3.2.3. Kontroler Histerisis Torsi Elektromagnetik

Kontroler histerisis torsi elektromagnetik atau *torque hysteresis controller* memberikan keluaran dari nilai komparasi antara nilai estimasi torsi elektromagnetik dan juga nilai aktual dari variabel torsi elektromagnetik. Nilai keluaran dari kontroler histerisis yang seringkali digunakan adalah bernilai 1 atau -1. Namun model yang digunakan pada tugas akhir ini memberikan keluaran dari kontroler histerisis dengan tipe data *Boolean*, yang bernilai antara 0 dan 1, atau dapat diartikan juga dengan *TRUE* atau *FALSE*, nilai tersebut secara berutan mewakili nilai 1 dan -1. Model dari kontroler histerisis torsi elektromagnetik tersebut pada MATLAB/Simulink dapat dilihat pada gambar 3.6.



Gambar 3.6 Kontrol histerisis torsi elektromagnetik dengan keluaran *TRUE* dan *FALSE*

3.2.4. Pensaklaran Inverter Berdasarkan Pembacaan Sektor

Pensaklaran digunakan untuk melakukan sistem buka-tutup pada MOSFET, sehingga arus dapat mengalir melalui MOSFET. Arus mengalir pada MOSFET ketika *gate* pada MOSFET diberikan tegangan atau nilai 1 (satu) pada tipe data *Boolean*. Arus dan tegangan yang mengalir melalui MOSFET digunakan untuk memberikan daya pada motor. Pensaklaran yang tepat dapat membuat motor BLDC berputar. Pensaklaran inverter dilakukan dengan masukan berupa nilai sektor posisi dari rotor pada koordinat bidang $\alpha - \beta$ yang bernilai antara 1 dan 6 (lihat gambar 2.5), dan keluaran dari kontroler histerisis torsi elektromagnetik yang bernilai antara 1 atau -1 (telah dijelaskan sebelumnya bahwa nilai keluaran dari kontroler histerisis torsi elektromagnetik pada tugas akhir ini bernilai *TRUE* atau *FALSE*). Pensaklaran pada inverter dilakukan sesuai dengan tabel 2.2, ketika nilai estimasi fluks bernilai 0. Proses ini termasuk kedalam blok *Selection Table* (tabel seleksi) pada gambar 3.2. Model pensaklaran inverter pada MATLAB/Simulink dapat dilihat pada gambar 3.7.



Gambar 3.7 Blok Pensaklaran Inverter

3.4. Penentuan Parameter Proporsional dan Integral

Kegunaan dari kontrol PI adalah sebagai regulator kecepatan dari kontroler motor BLDC. Regulator kecepatan PI memiliki masukan berupa variabel kecepatan putar motor sebagai *set point* dan juga umpan balik, dengan keluaran berupa torsi referensi. Untuk mendapatkan nilai parameter dari regulator kecepatan dengan menggunakan PI, adalah dengan cara melakukan kontrol bertingkat antara DTC dengan regulator kecepatan PI. Respon dari kontrol bertingkat tersebut kemudian digunakan untuk mendapatkan parameter yang sesuai untuk regulator kecepatan PI.

Pada tugas akhir ini, parameter proporsional dan integral ditentukan dengan metode *Zieger-Nichols*. Pada metode tersebut, untuk dapat menentukan parameter K_c dan T_I pada kontroler PI, dilakukan dengan cara meniadakan kontrol integral terlebih dahulu. Kemudian mengubah nilai K_c secara perlahan, dan dilakukan sampai dengan keluaran dari sistem berosilasi pada *steady state*, sebelum menggunakan nilai K_c lainnya. Ketika keluaran sistem dari nilai K_c berosilasi secara periodik dan terus menerus (atau mendekati hal tersebut), maka nilai dari K_c diganti dengan K_u (*ultimate gain*) dan periode osilasi tersebut ditandai dengan P_u (*ultimate period*). Nilai dari K_u dan P_u kemudian digunakan untuk mencari nilai dari K_c dan T_I sesuai pada tabel 2.3

3.5. Desain Kontroler Motor BLDC

Untuk melakukan kontrol kecepatan pada motor BLDC, dibutuhkan kontroler untuk menentukan pensaklaran pada inverter. Kontrol kecepatan motor BLDC yang digunakan adalah kontrol PI dengan DTC. Untuk melakukan kedua kontrol tersebut digunakan mikrokontroler mampu melakukan komputasi dengan cepat, terlebih sistem kontrol yang digunakan adalah DTC, dimana pada kontrol tersebut dibutuhkan perhitungan cepat sehingga estimasi torsi elektromagnetik yang dihitung dapat dibandingkan dengan aktual. Periode sampling yang digunakan pada tugas akhir ini adalah sebesar 10 mikrosekond.

Mikrokontroler yang digunakan pada tugas akhir ini adalah mikrokontroler berbasis ARM, yaitu menggunakan STM32F4.

Pada mikrokontroler tersebut memungkinkan untuk dapat mengimplementasikan DTC, karena memiliki kecepatan prosesor mencapai 168MHz. Selain memiliki kecepatan prosesor yang relatif tinggi, mikrokontroler tersebut juga memiliki *Analog to Digital Converter* (ADC) 12bit, sehingga bisa didapatkan nilai kepresisian yang tinggi dari pembacaan sensor analog, dalam hal ini adalah pembacaan sensor arus dan juga sensor untuk melakukan pembacaan tegangan *back-emf*.

Keluaran tegangan dari mikrokontroler STM32F407 hanyalah sebesar 3.3 Volt, nilai tersebut terlalu kecil untuk dapat menggerakkan motor BLDC. Untuk mengatasi hal tersebut, maka digunakan MOSFET. Masukan MOSFET berupa nilai tegangan dari mikrokontroler, tegangan tersebut dilakukan untuk melakukan proses pensaklaran sehingga daya dapat dialirkan melalui MOSFET. Pada driver motor juga digunakan *driver* MOSFET, yaitu menggunakan IC Driver IR2110. IC Driver tersebut digunakan pada MOSFET sisi atas dan juga sisi bawah pada sistem *H-Bridge*. Pada kontroler juga terdapat *optocoupler* yang berguna sebagai pengaman yang menjadikan rangkaian terpisah antara kontroler dan driver motor.

3.6. Pemrograman Kontroler Motor BLDC

Pembuatan *firmware* pada kontroler motor BLDC dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak pemrograman Keil μ Vision 5. Bahasa pemrograman yang digunakan adalah C. Pada pemrograman tersebut dilakukan akuisisi data dari sensor arus stator, tegangan *back-emf*, kecepatan rotor dan posisi rotor. Keluaran yang dihasilkan dari arus stator kemudian digunakan untuk mengetahui nilai dari arus stator pada bidang orthogonal $\alpha - \beta$ menggunakan transformasi Clark secara *line-to-line* (menggunakan dua “*line*”), hal tersebut juga dilakukan pada tegangan *back-EMF*. Pembacaan nilai kecepatan motor dilakukan dengan cara membaca sinyal dari *hall-effect*, begitu juga dengan posisi sektor dari rotor. Dari pembacaan arus stator dan tegangan *back-EMF* bidang $\alpha - \beta$, dan kecepatan putar rotor kemudian

dilakukan perhitungan estimasi torsi elektromagnetik. Setelah diketahui nilai dari kecepatan putar aktual motor, posisi sektor dari rotor dan estimasi torsi elektromagnetik. Kemudian dilakukan kontrol histerisis elektromagnetik. Keluaran dari kontrol histerisis elektromagnetik kemudian dibandingkan sesuai dengan tabel 2.2. Keluaran dari tabel seleksi adalah nilai sektor yang akan melakukan pensaklaran pada inverter dengan cara merubah keadaan (*state*) MOSFET pada inverter.

3.7. Pengambilan Data Kontroler Motor

Pengambilan data dari kecepatan dan torsi dari motor BLDC dengan DTC dan kontrol kecepatan menggunakan PI dilakukan pada dynamo meter. Pada alat tersebut dapat dilakukan pembacaan dari kecepatan motor aktual dan juga torsi aktual. Nilai yang didapatkan dari dynamo meter kemudian dibandingkan dengan data hasil simulasi dari kontrol kecepatan motor BLDC dengan DTC dan kontrol PI pada MATLAB/*Simulink*.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV

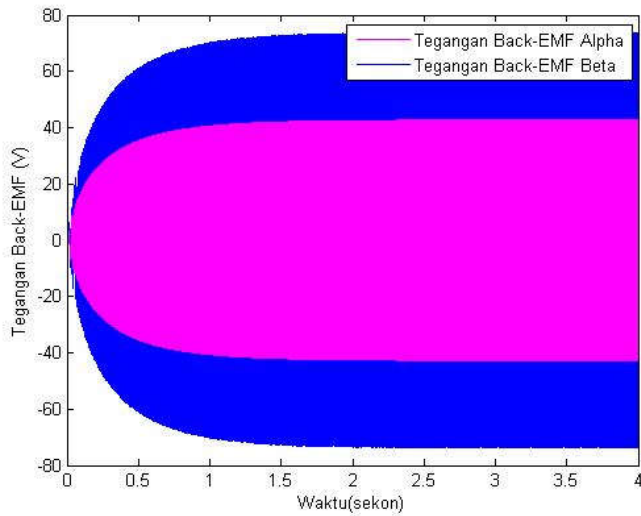
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Keluaran Simulasi Sistem *Direct Torque Control*

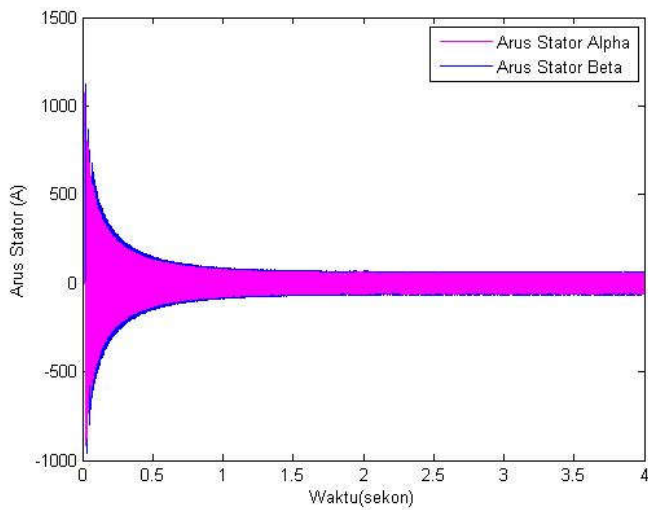
Sistem DTC yang digunakan pada tugas akhir ini menggunakan kontrol histerisis torsi elektromagnetik, sedangkan kontrol histerisis dari fluks tidak digunakan. Sehingga data yang digunakan pada tabel 2.2 adalah pada saat fluks rotor bernilai 0. Tidak digunakannya kontrol fluks adalah karena nilai fluks yang bernilai hampir konstan pada motor BLDC[5]. Sehingga persamaan estimasi untuk torsi elektromagnetik yang digunakan adalah seperti pada persamaan 2.24.

4.1.1 Keluaran Tegangan *Back-EMF* α dan β serta Arus Stator α dan β

Tegangan *back-emf* pada DTC digunakan untuk melakukan estimasi torsi elektromagnetik, begitu juga dengan arus stator. Untuk dapat melakukan estimasi tersebut sebelumnya diperlukan adanya transformasi menggunakan transformasi Clark, sehingga diketahui nilai vektor dari kedua variabel tersebut pada bidang orthogonal $\alpha - \beta$. Pada tugas akhir ini, penentuan nilai vektor tegangan *back-emf* dan arus stator pada bidang $\alpha - \beta$ dilakukan dengan cara *line-to-line* artinya untuk menentukan nilai tegangan *back-emf* dan arus stator pada orthogonal bidang $\alpha - \beta$, hanya digunakan dua kutub pada tegangan *back-emf* dan juga arus stator. Keluaran yang dihasilkan dari tegangan *back-emf* dan arus stator pada bidang $\alpha - \beta$ dapat dilihat pada gambar 4.1. Keluaran yang dihasilkan dari arus stator semakin menurun dengan semakin tinggi nya kecepatan putar motor atau semakin menurunnya torsi. Sedangkan keluaran yang dihasilkan dari tegangan *back-emf* semakin tinggi berbanding lurus dengan kecepatan putar motor (seperti pada persamaan 2.5 sampai 2.7).



(a)

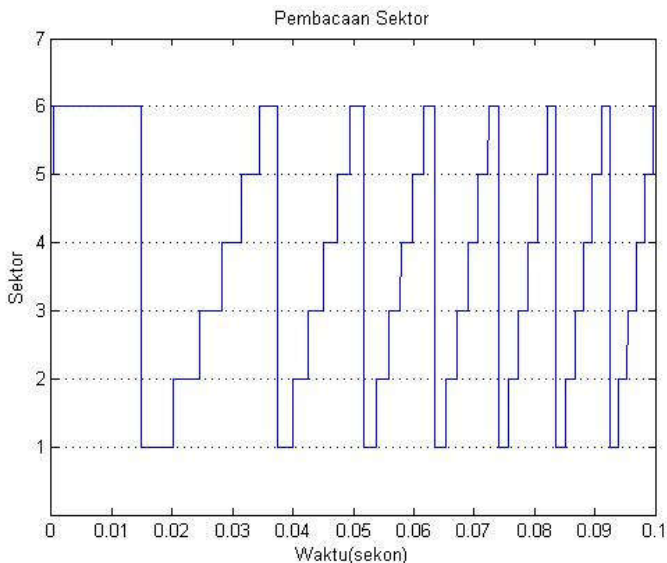


(b)

Gambar 4.1 Keluaran (a) tegangan *back-emf* dan (b) arus stator pada bidang $\alpha - \beta$

4.1.2 Pembacaan Sektor Posisi Rotor pada Motor BLDC

Untuk dapat mengaplikasikan DTC pada kontroler motor BLDC perlu adanya informasi mengenai posisi dari rotor dengan menggunakan encoder, dengan menggunakan encoder berupa sensor hall-effect. Keluaran dari pembacaan hall-effect dari motor akan memiliki keluaran seperti pada gambar 2.4. Pensimulasian yang dilakukan pada tugas akhir ini dilakukan dengan cara melakukan pembacaan posisi rotor motor BLDC dengan menggunakan sensor hall-effect kemudian melakukan pembacaan nilai sektor posisi dari rotor pada motor BLDC bentuk simulasi dapat dilihat pada gambar 3.4. Hasil pembacaan sektor posisi dari rotor pada motor BLDC harus sesuai dengan tabel 2.1. Keluaran dari simulasi pembacaan sektor posisi dapat dilihat pada gambar 4.2.



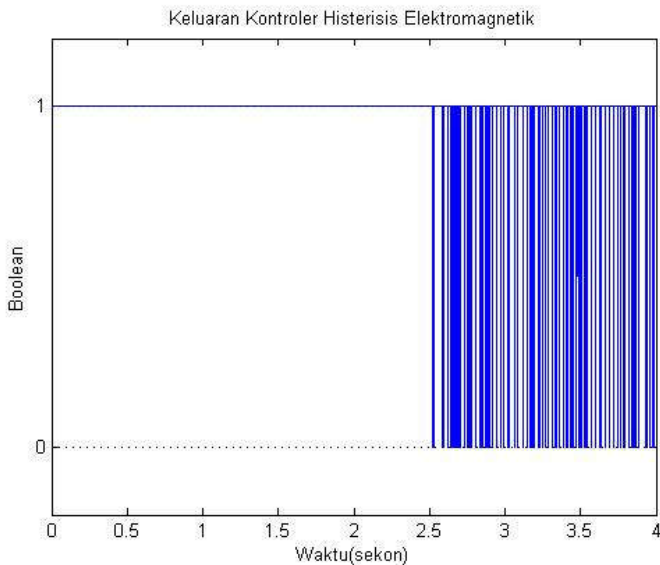
Gambar 4.2 Keluaran hasil simulasi pembacaan sektor posisi rotor pada motor BLDC

Pada gambar 4.2, pembacaan sektor dilakukan selama 0.1 sekon. Keberadaan sektor posisi dari rotor dapat diketahui dengan

keluaran dari hasil pembacaan sektor yang sejajar pada sumbu-x. Pada gambar 4.2, dapat diketahui dari pembacaan sektor selama 0.1 sekon keluaran berada sesuai pada sektor posisi rotor, yang merupakan angka bulat.

4.1.3 Hasil Keluaran Kontroler Histerisis Torsi Elektromagnetik

Pada skema DTC terdapat kontroler torsi elektromagnetik. seperti penjelasan pada bab 3, keluaran yang digunakan dari kontrol histerisis elektromagnetik yang digunakan pada tugas akhir ini adalah keluaran dengan tipe data *Boolean*, yang bernilai antara *TRUE* atau *FALSE* (1 atau 0). Simulasi dilakukan pada *Simulink* dengan skema seperti pada gambar 3.6. Hasil keluaran dari simulasi dapat dilihat pada gambar 4.3.



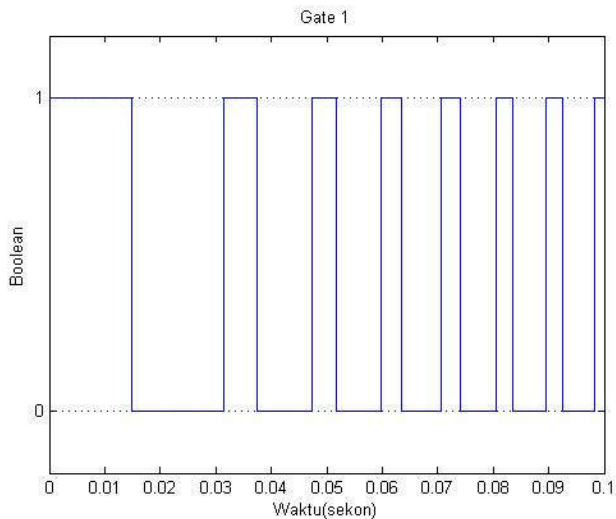
Gambar 4.3 Keluaran kontroler histerisis elektromagnetik

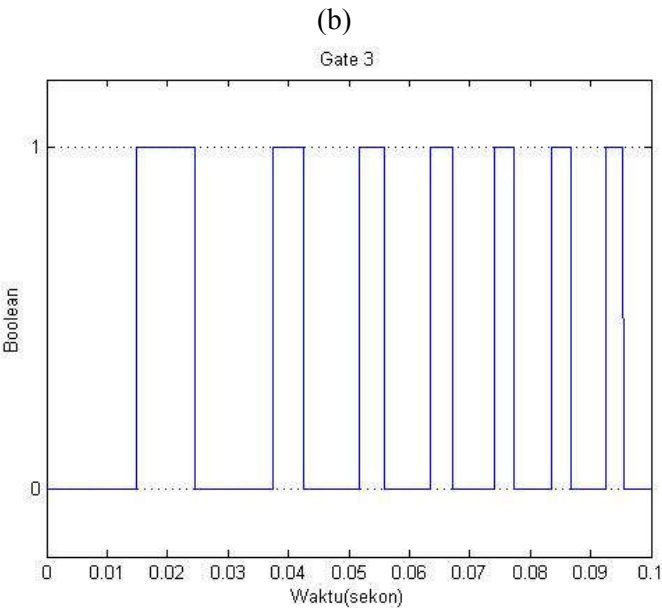
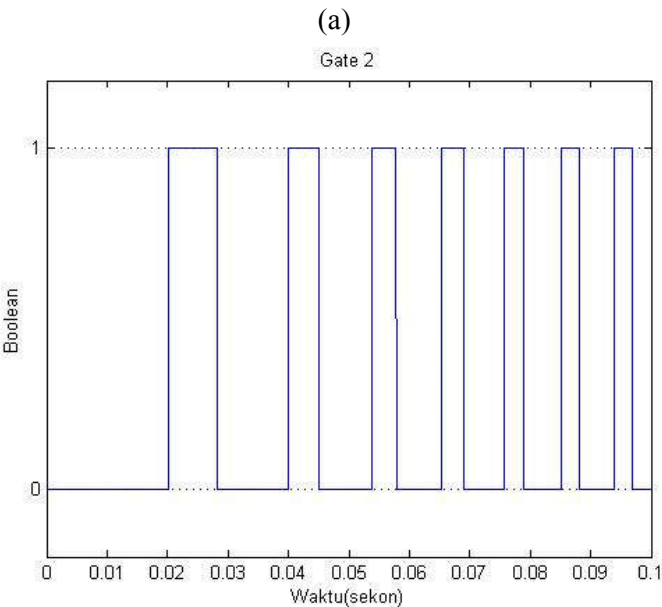
Keluaran dengan nilai *TRUE* (bernilai 1) mengindikasikan untuk menaikkan torsi sedangkan keluaran dengan nilai *FALSE*

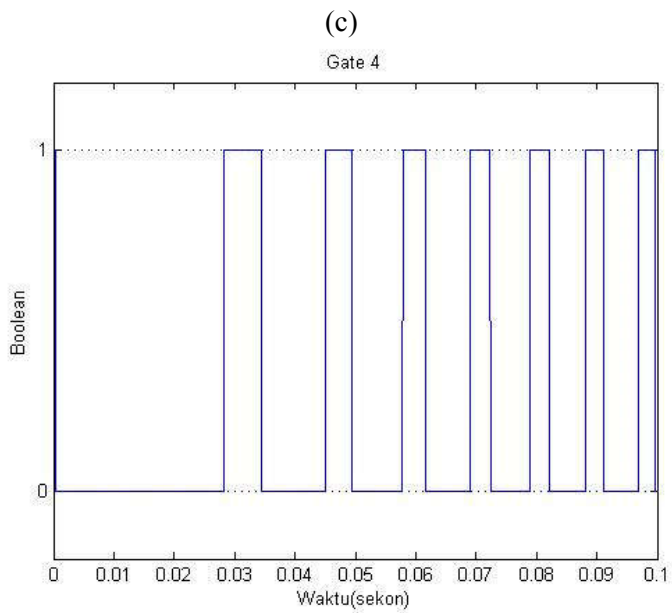
(bernilai 0) adalah untuk menurunkan torsi. Pada gambar 4.3, keluaran dari kontroler histerisis bernilai 1 sampai pada detik 2,52, hingga setelahnya keluaran kontroler histerisis berubah-ubah antara 1 dan 0. Hal tersebut menandakan bahwa nilai torsi yang dibutuhkan untuk naik adalah sampai pada detik 2,52 sampai adanya riak(*ripple*).

4.1.4 Hasil Keluaran Pensaklaran Inverter

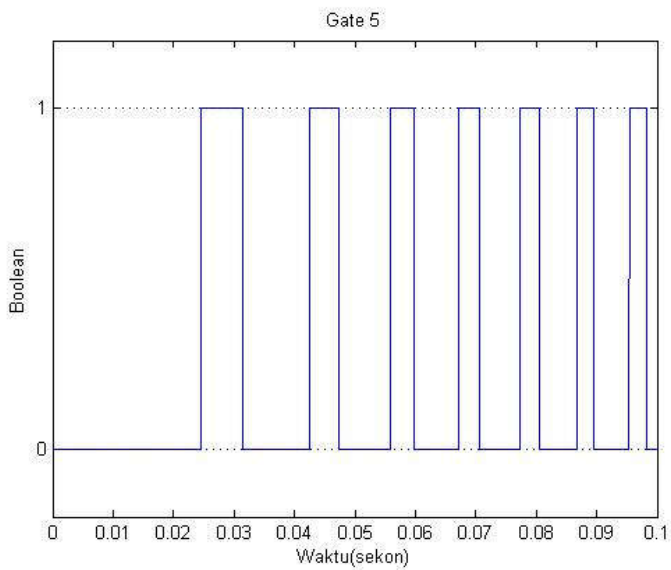
Pensaklaran inverter dilakukan untuk dapat memutar motor BLDC dengan cara memberikan aliran daya pada belitan stator sesuai dengan keluaran yang diberikan dari *Selection Table* (tabel seleksi) pada gambar 3.7, nilai yang dikeluarkan dari tabel seleksi memiliki nilai yang sama dengan tabel 2.2. Pensaklaran yang dilakukan dengan menggunakan DTC tidak menggunakan *Pulse Width Modulation* (PWM), melainkan sektor yang akan mengubah keadaan (*state*) dari MOSFET pada inverter, perubahan dari keadaan sesuai dengan sektor dan kontrol histerisis torsi elektromagnetik akan mengubah posisi dari rotor secara terus menerus sehingga dihasilkan kecepatan putar dari motor. Keluaran yang dihasilkan dari inverter adalah seperti pada gambar 4.4.



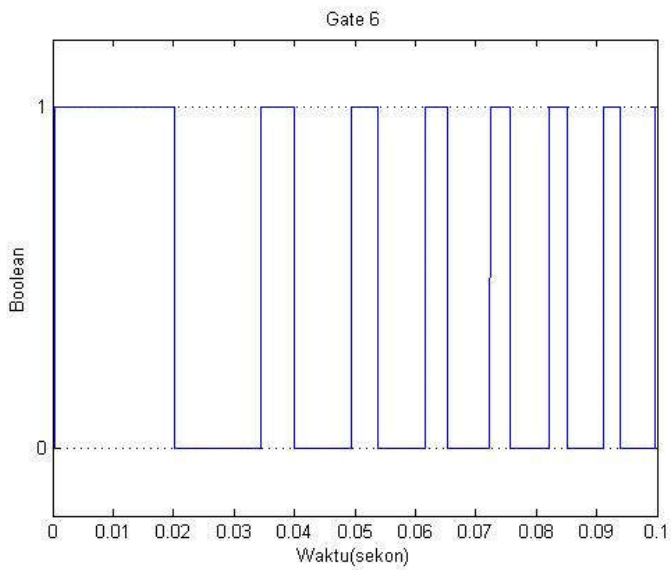




(d)



(e)

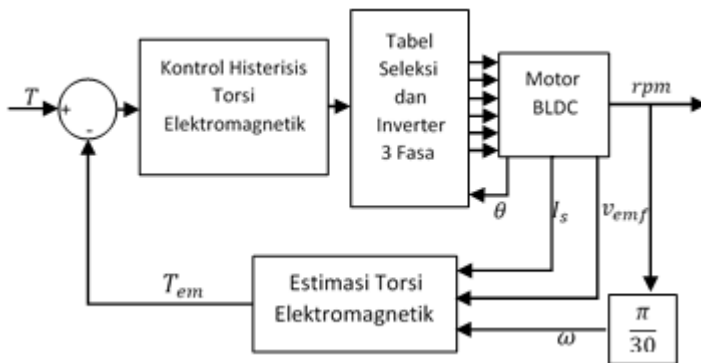


(f)

Gambar 4.4 Keluaran dari pensaklaran inverter, yang berada pada *gate* 1(a), *gate* 2(b), *gate* 3(c), *gate* 4(d), *gate* 5(e), *gate* 6(f)

4.2. Hasil Keluaran Simulasi Kontroler Motor BLDC dengan DTC dan Regulator Kecepatan PI

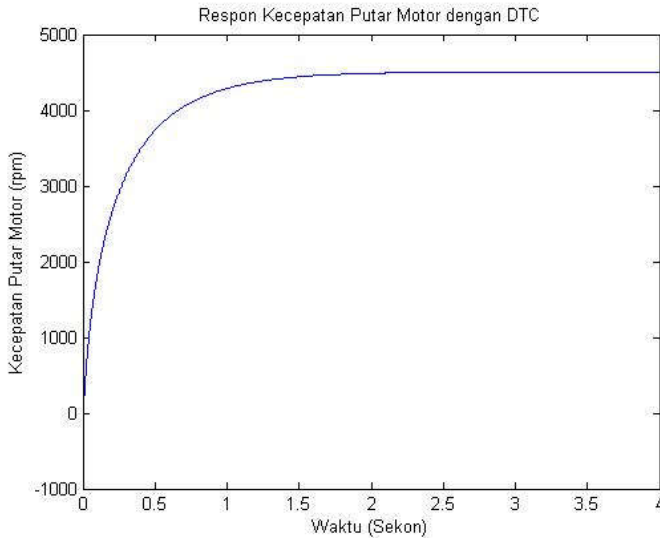
Pada perancangan kontroler motor BLDC, variabel yang dikendalikan adalah kecepatan putar dari motor. Untuk melakukan kontrol kecepatan butuh diketahui kecepatan putar maksimum motor. Kecepatan putar maksimum dari motor yang dihasilkan menggunakan DTC dapat diketahui dengan cara hanya melakukan DTC dimana nilai *set point* yang diberikan bernilai sangat besar. Skema simulasi DTC dapat dilihat pada gambar 4.5. Kecepatan putar maksimum juga dibutuhkan untuk mengetahui rentang kecepatan yang dapat dilakukan oleh motor BLDC dengan DTC, terlebih jika diimplementasikan pada bidang otomotif yang dimana nilai *set point* yang diberikan selalu berubah-ubah.



Gambar 4.5 DTC pada motor BLDC

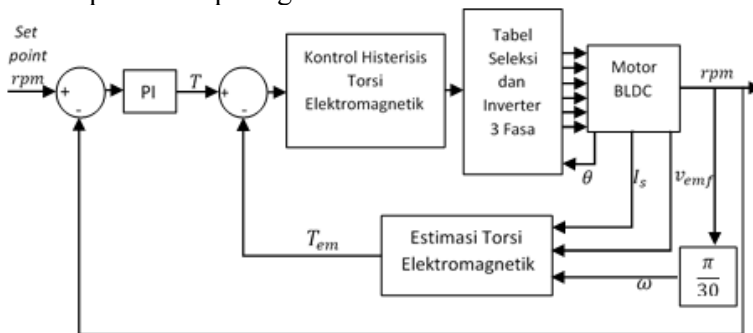
Keluaran DTC dari kontroler motor BLDC seperti pada gambar 4.6. Keluaran DTC dengan *set point* sangat besar memberikan informasi mengenai kecepatan putar maksimum dari

rotor. Kecepatan putar maksimum yang didapatkan adalah sebesar 4505.75058651999rpm.



Gambar 4.6 Respon Kecepatan Putar Motor dengan DTC

Setelah diketahui nilai kecepatan putar maksimum dari motor BLDC, kemudian dilakukan kontrol dengan umpan balik kecepatan putar motor sehingga diketahui respon dari kontrol tersebut dan untuk mendapatkan parameter dari kontrol PI. Skema simulasi dengan umpan balik kecepatan putar motor dapat dilihat pada gambar 4.7.



Gambar 4.7 Kontrol kecepatan putar motor menggunakan regulator kecepatan PI

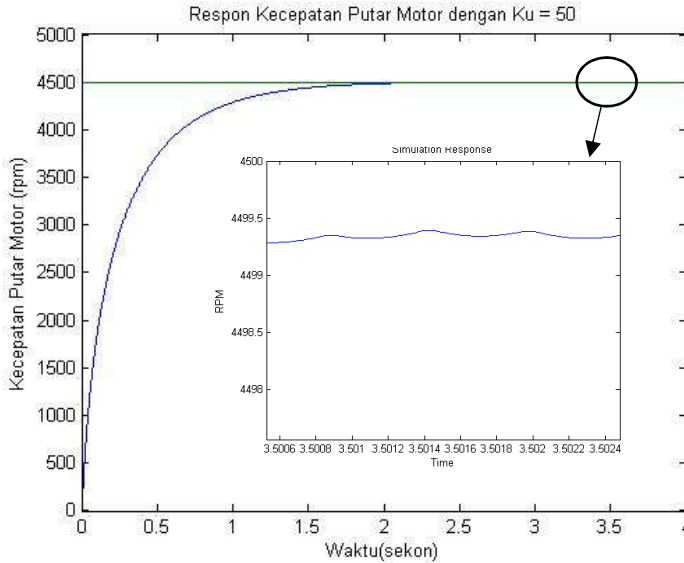
Kecepatan putar rotor dikendalikan dengan umpan balik berupa nilai kecepatan putar dari rotor. Respon keluaran yang diberikan dari sistem pada kontrol dengan umpan balik kecepatan putar motor tanpa menggunakan regulator kecepatan PI dapat dilihat pada gambar 4.8 dengan nilai *set point* sebesar 4500rpm dan sistem berjalan selama 4 detik.



Gambar 4.8 Respon sistem dengan umpan balik kecepatan putar motor

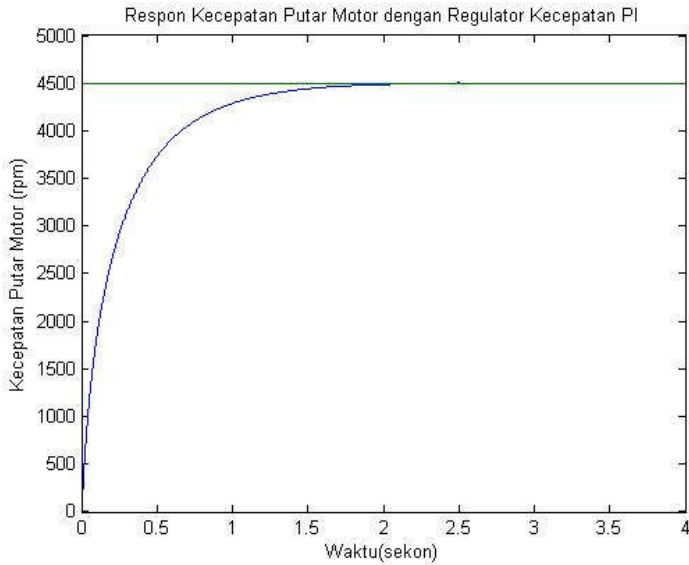
Analisa dilanjutkan dengan menentukan parameter dari kontrol PI yang tepat sehingga didapatkan respon sesuai yang diinginkan. Untuk melakukan simulasi dengan menggunakan kontrol kecepatan PI, maka digunakan simulasi seperti pada gambar 3.3. Nilai parameter ditentukan menggunakan metode *Zieger-Nichols* (ZN). Metode *tunning* dengan menggunakan *Zieger-Nichols* adalah dengan cara menentukan nilai K_u dan T_u .

Nilai K_u merupakan nilai pengali *error* sampai pada saat nilai keluaran *error* dengan pengali K_c bersosilasi pada *set point* atau mendekati. Nilai yang didapatkan dari pada sistem K_u adalah sebesar 50 dengan respon sistem seperti pada gambar 4.9.



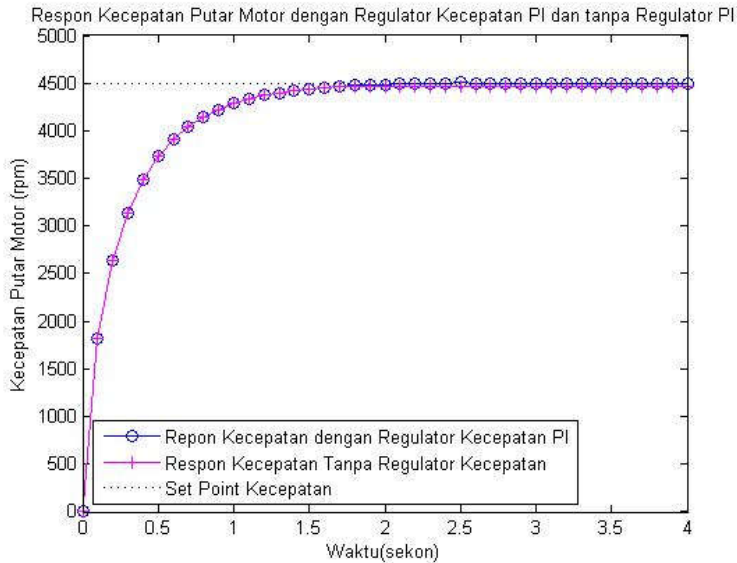
Gambar 4.9 Respon sistem dengan nilai K_u sebesar 50

Respon dari sistem dengan nilai K_u sebesar 50 memiliki nilai periode *ultimate* sebesar 0.001 pada sistem. Periode dihitung dengan menghitung selang waktu antar puncak pada keadaan *steady-state* seperti pada gambar 4.9. Untuk mendapatkan nilai dari parameter kontrol PI kemudian digunakan kaidah sesuai pada tabel 2.3. Maka didapatkan hasil keluaran dari sistem dengan nilai $K_c = 22.7273$ dan $T_I = 0.00083$. Dari nilai tersebut kemudian dilakukan simulasi dengan respon sistem seperti pada gambar 4.10.



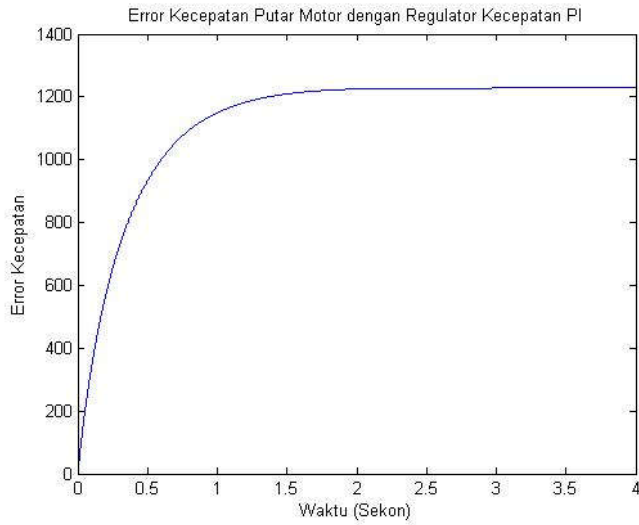
Gambar 4.10 Respon sistem dengan $K_c = 22.7273$ dan $T_I = 0.00083$

Untuk mengetahui seberapa baik keluaran yang diberikan menggunakan metode ZN, maka dilakukan perbandingan antara respon sistem yang menggunakan umpan balik berupa kecepatan putar motor tanpa regulator kecepatan PI dan respon sistem dengan regulator PI dimana parameter proposional dan integral didapat dengan metode ZN. Hasil perbandingan antara keduanya dapat dilihat pada gambar 4.11.

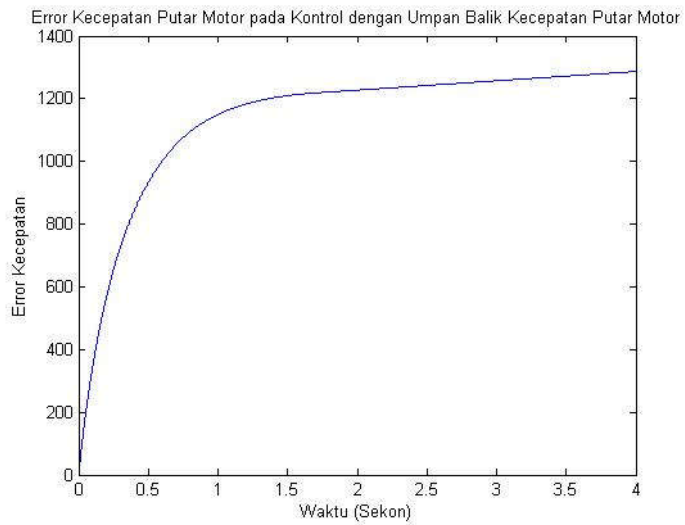


Gambar 4.11 Perbandingan respon kontrol *closeloop* dan kontrol PI dengan parameter $K_c = 22.7273$ dan $T_I = 0.00083$

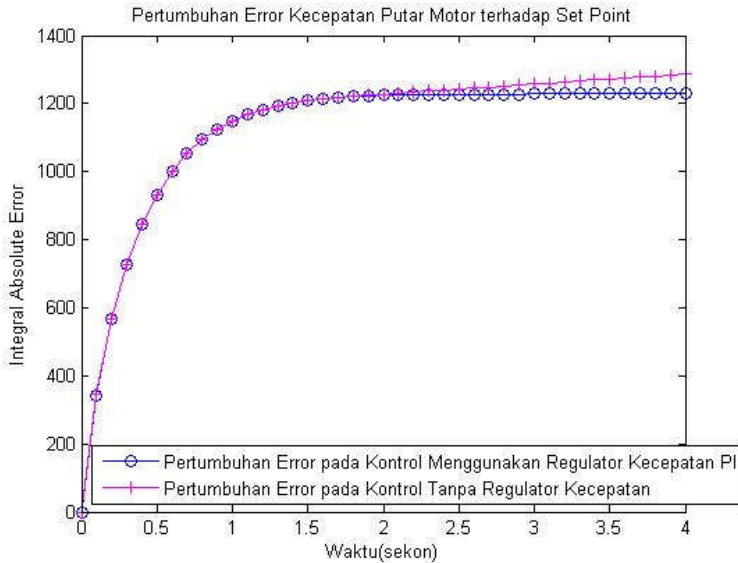
Hasil keduanya menunjukkan respon yang hampir serupa, namun pada kontrol dengan regulator kecepatan PI memberikan keluaran yang lebih stabil pada *steady-state*. Hal tersebut dapat dilihat dari perbandingan dari pertumbuhan jumlah dari *error* yang diabsolutkan antara keduanya terhadap waktu. Perbandingan tersebut dapat dilihat padagambar 4.12.



(a)



(b)

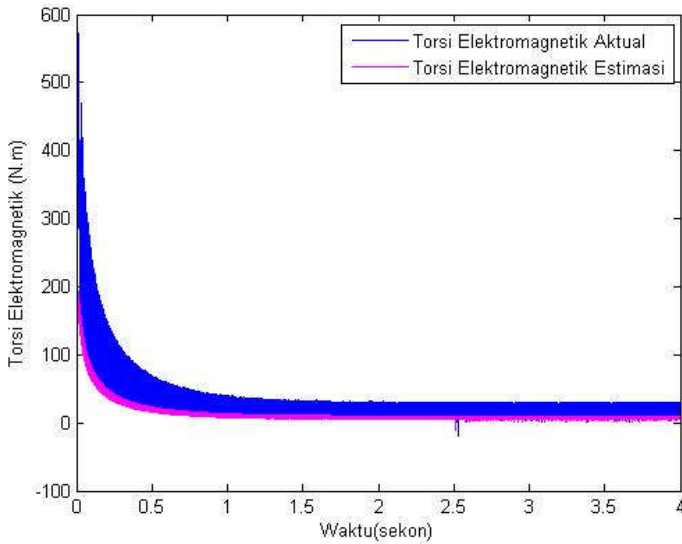


(c)

Gambar 4.12 Pertumbuhan *Integral Absolut Error* (IAE) pada kontrol DTC dengan regulator kecepatan PI (a), kontrol tanpa regulator kecepatan PI(b), dan perbandingan pertumbuhan *error*(c).

Pertumbuhan IAE antara keduanya menunjukkan bahwa pada kontrol PI, kurva IAE pada saat kecepatan putar rotor mendekati *set point* semakin landai. Sedangkan pada kontrol *close loop* kurva IAE tetap terus meningkat. Pertumbuhan *error* tersebut dijadikan parameter untuk mengetahui bahwa kontrol komutasi dengan DTC dan regulator kecepatan PI menghasilkan keluaran yang stabil.

Pada DTC yang dapat merespon torsi dengan cepat, respon torsi elektromagnetik terukur yang didapat dari DTC dengan kontrol PI adalah seperti pada gambar 4.13, yang dapat mencapai keadaan *steady* pada waktu 1.696 sekon.

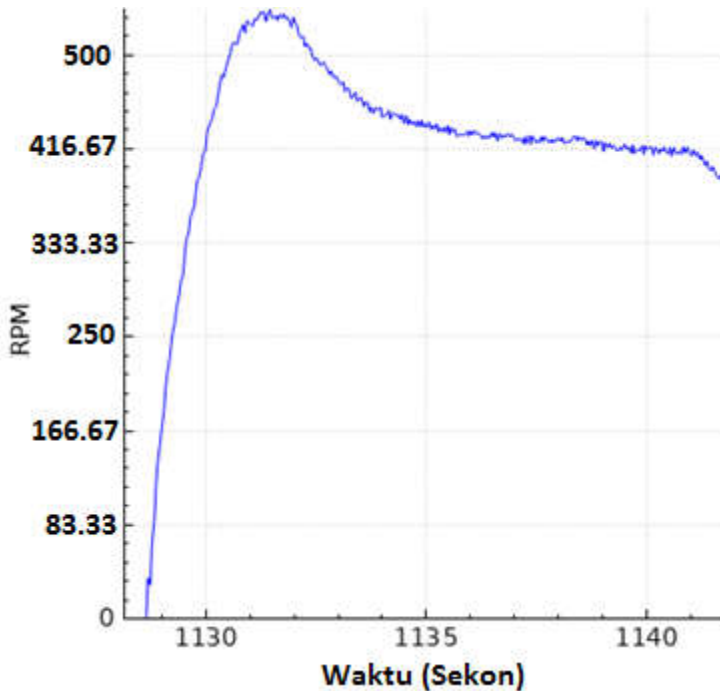


Gambar 4.13 Respon torsi elektromagnetik terukur.

Respon serupa juga terjadi pada hasil estimasi torsi elektromagnetik. Dimana respon torsi berkurang ketika kecepatan motor semakin tinggi. Respon estimasi torsi elektromagnetik dapat dilihat pada gambar 4.13. Hasil respon kecepatan putar rotor yang dapat mencapai keadaan *steady* dengan waktu 1.3438 sekon dan respon torsi yang dapat mencapai keadaan *steady* pada waktu 1.696 sekon.

4.3. Hasil Keluaran Kontroler Motor BLDC

Dari hasil respon yang didapatkan dari hasil simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink, kemudian dilakukan pengujian desain simulasi dengan cara melakukan implementasi pada perangkat keras berupa kontroler motor BLDC, dan dilakukan pengujian pada nilai set point pada 416.67rpm. Hasil yang didapatkan dari implementasi DTC pada kontroler adalah seperti pada gambar 4.15. Hasil dari respon kontroler didapatkan menggunakan perangkat lunak *VESC Tool*.



Gambar 4.14 Respon kecepatan putar motor pada kontroler motor BLDC

Keluaran dari kontroler motor BLDC merupakan nilai ERPM terhadap waktu. Dari respon yang diberikan kontroler, terdapat banyak riak yang dihasilkan, hal tersebut kemungkinan terjadi dikarenakan pembacaan sensor mengingat cara kerja dari DTC yang secara langsung memberikan perubahan *state* pada MOSFET.

4.4. Pembahasan

Untuk mendapatkan respon torsi yang cepat dan kecepatan putar motor yang stabil pada motor BLDC, dapat digunakan kontroler motor BLDC menggunakan DTC dengan kontrol kecepatan PI. Sistem kontrol menggunakan DTC memerlukan adanya pembacaan-pembacaan dari sensor, data yang dibutuhkan dari DTC pada tugas akhir ini adalah berupa nilai arus stator, tegangan *back-emf*, kecepatan putar motor, dan posisi dari rotor pada motor

BLDC. Ketiganya dibutuhkan untuk melakukan estimasi dari torsi elektromagnetik. Nilai dari torsi elektromagnetik kemudian dibandingkan dengan nilai torsi aktual pada kontrol histerisis torsi elektromagnetik. Hasil perbandingan antara kedua nilai tersebut kemudian digunakan untuk melakukan pensaklaran pada inverter sesuai dari sektor posisi rotor. Pensaklaran tersebut kemudian akan membuat rotor bergerak yang kemudian akan menghasilkan kecepatan. Parameter dari kontrol kecepatan menggunakan PI didapatkan dengan menggunakan metode *Zieger-Nichols*. Untuk mencari parameter PI dilakukan dengan mencari nilai konstanta *ultimate* terlebih dahulu kemudian diketahui periode osilasi pada respon saat atau ketika mendekati *set point*. Parameter PI yang didapatkan adalah $K_c = 22.7273$ dan $T_I = 0.00083$. Dari kontrol DTC dan kontrol kecepatan menggunakan PI, didapatkan respon kecepatan dari motor BLDC untuk mencapai *set point* selama 1.3438 sekon, sedangkan dibutuhkan waktu selama 1.696 sekon untuk respon torsi mencapai *steady-state*. Hasil kestabilan yang ditunjukkan dari kontroler motor BLDC dengan DTC dan kontrol kecepatan PI menunjukkan bahwa pertumbuhan error pada kontroler dengan kontrol kecepatan PI memiliki pertumbuhan IAE (*Integral Absolute Error*) yang lebih landai. Untuk hasil dari kontroler pada perangkat keras menunjukkan nilai kecepatan dengan banyaknya riak yang terjadi pada motor, hal tersebut kemungkinan terjadi dikarenakan adanya torsi atau gangguan dari luar.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat diambil dari hasil pembuatan tugas akhir ini antara lain:

- a. Untuk mendapatkan respon torsi yang cepat dan kecepatan putar motor yang stabil pada motor BLDC, dapat digunakan kontroler motor BLDC menggunakan DTC dengan regulator kecepatan PI, dimana didapatkan waktu untuk kecepatan motor mencapai *steady-state* adalah selama 1.3438 sekon, sedangkan dibutuhkan waktu selama 1.696 sekon untuk respon torsi mencapai *steady-state* pada saat dilakukan simulasi. Akan tetapi pada saat melakukan pengambilan data pada perangkat keras kontroler secara langsung, didapatkan hasil yang memiliki banyak riak pada respon kecepatan. Hal tersebut kemungkinan dikarenakan adanya torsi yang menghambat dari luar, mengingat pada saat percobaan motor dengan menggunakan perangkat keras kontroler motor BLDC dilakukan pada kecepatan putar roda yang relatif rendah, yaitu 416,67rpm.
- b. Untuk mendapatkan respon kecepatan putar motor yang stabil pada *steady-state* didapatkan nilai K_c sebesar 22.7273 dan T_I sebesar 0.00083. Hal tersebut dibuktikan dengan nilai IAE antara kontrol *closeloop* dengan kontrol kecepatan dengan PI, dimana pada kontrol kecepatan dengan PI memiliki pertumbuhan IAE yang lebih landai dibandingkan dengan kontrol tanpa menggunakan regulator kecepatan PI.

5.2. Saran

Adapun saran dalam pembuatan tugas akhir ini adalah untuk melakukan metode lain dalam menentukan parameter kontrol PI dan untuk dibandingkan dengan metode kontrol komutasi motor BLDC yang lain, khususnya dengan kontrol vektor lainnya. Penambahan metode kontrol kecepatan yang bersifat adaptif juga

dibutuhkan, terlebih pada penggunaan motor dengan beban yang berubah secara dinamis.

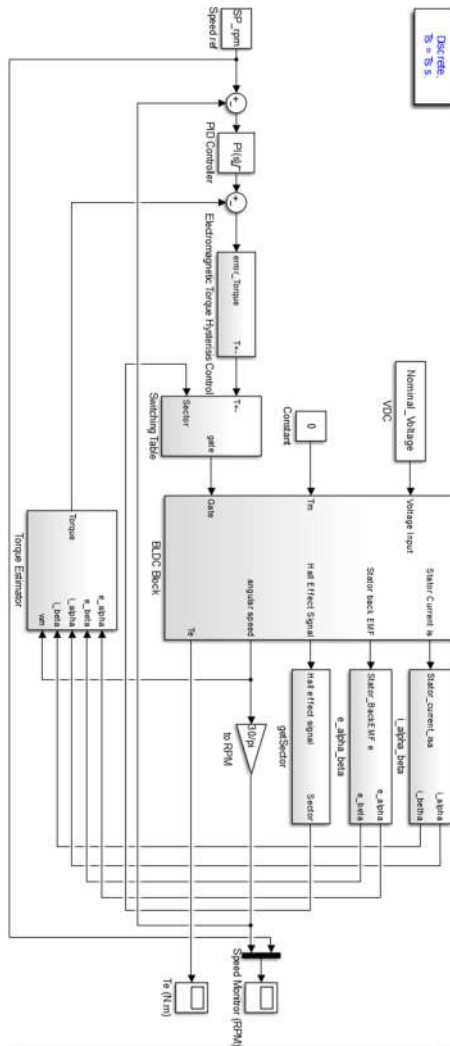
DAFTAR PUSTAKA

- [1]. **Yong Liu; Z. Q. Zhu; David Howe.** “*Direct Torque Control of Brushless DC Drives with Reduced Torque Ripple*”, IEEE, Vol 41, 2005
- [2]. **N. Parhizkar; M. Shafiei; M. Bahrami Kouhshahi.** “*Direct Torque Control of Brushless DC Motor Drives with Reduced Starting Current Using Fuzzy Logic Controller*” ,IEEE, Vol 50, 2014
- [3]. **D. Premalatha; A. Sakthi Rubini.** “*Direct Torque Control of Brushless DC Motor Using PI and Fuzzy Controller*” International Journal of Science, IJSETR, Vol. 4, April, 2015
- [4]. **Mourad Masmoudi; Bassem El Bads; Ahmed Masmoudi.** “*Direct Torque Control of Brushless DC Motor Drives With Improved Reliability*”, IEEE, Maret, 2013
- [5]. **Ozturk, Salih Baris; Toliyat, Hamid A.** “*Direct Torque Control of Brushless DC Motor with Non-sinusoidal Back-EMF*”, IEEE, April, 2011
- [6]. **Harij Mukti K.** “Implementasi Direct Torque Control dalam Pengaturan Kecepatan Motor Induksi”, Jurnal ELTEK, Vol 12, April, 2014
- [7]. **Hudha Rencana Panjaitan Sakti Wengi; Muhammad Nur Yuniarto.** “Perancangan dan Uji Performa Axial Flux Permanent Magnet Coreless Brushless Direct Current (DC) Motor”
- [8]. **Merve Yildirim; Mehmet Polat; Hasan Kurum,** “*A Survey On Comparison Of Electric Motor Types And Drives Used for Electric Vehicle*”, IEEE 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, Turkey, Sept. 2014

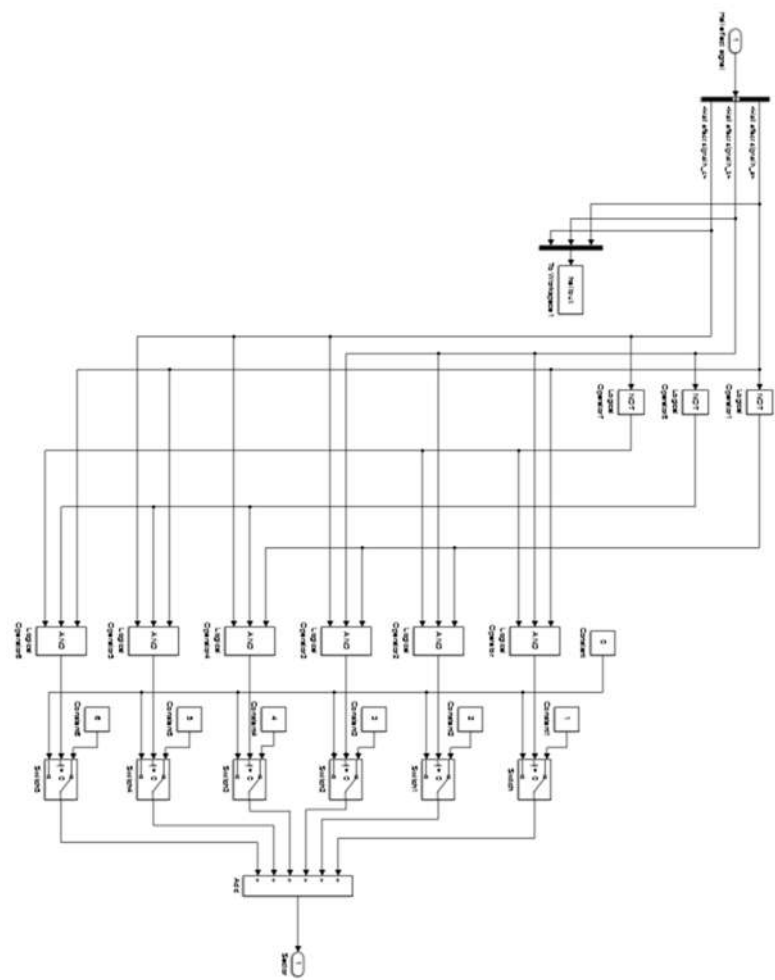
- [9].**David Ocen**, “*Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor*”, *KTH Signal Sensor and Systems*, Swedia, Mei. 2005
- [10].**Stefan Baldursson**, “*BLDC Motor Modelling and Control*”, *Chalmers Tekniska Hogskola*, Swedia, Mei. 2005
- [11].**Clarke & Park Transforms on The TMS320C2XX**, Texas Instrument, Amerika, 1997
- [12].**Coordinate Transform in Motor Control**, Cypress, Amerika, Document No. 002-05345 Rev. B*
- [13].**J. Malarvizhi; S. U. Prabha**, “*Direct Torque Control of B4-Inverter Fed BLDC Motor Using Fuzzy Logic Controller*”, *IJERT*, Vol. 3, 2014
- [14].**Padmaraja Yadamale**, “*Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*”. Microchip Technology Inc., 2003

LAMPIRAN

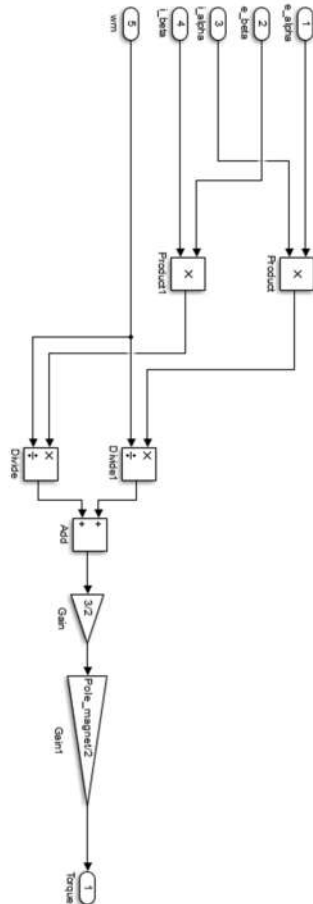
Lampiran A. Simulasi kontroler motor BLDC dengan DTC dan regulator kecepatan PI menggunakan MATLAB/Simulink



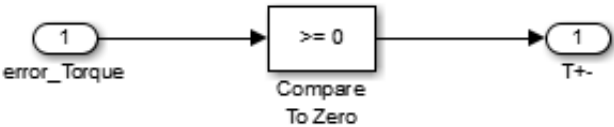
Lampiran B. Simulasi pembacaan sektor posisi rotor menggunakan MATLAB/Simulink



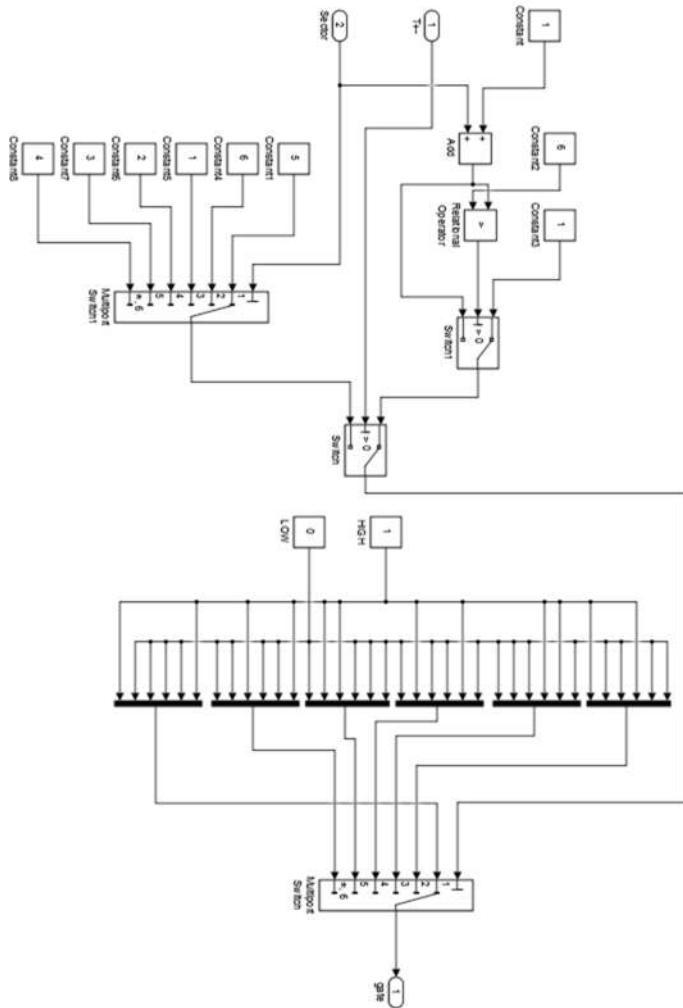
Lampiran C. Simulasi estimasi torsi elektromagnetik menggunakan MATLAB/Simulink



Lampiran D. Simulasi kontroler histerisis torsi elektromagnetik menggunakan MATLAB/*Simulink*



Lampiran D. Simulasi pensaklaran inveter menggunakan MATLAB/Simulink



BIODATA PENULIS



Penulis lahir di kota Jakarta pada tanggal 13 November 1994 dari orangtua bernama Bapak Djarot Setiabudi dan Ibu Sri Hartini. Penulis adalah anak kedua dari dua bersaudara. Penulis saat ini bertempat tinggal di kota Malang, Jawa Timur. Pendidikan penulis berawal dari TK Al-Hidayah Kelapa Gading. Pada tahun 2007 penulis menyelesaikan pendidikan di SD Negeri 03 Kelapa Gading dan melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 30 Jakarta hingga lulus tahun 2010. Pada tahun 2013, penulis menyelesaikan pendidikan di SMA Negeri 13 Jakarta. Setelah lulus dari SMA tersebut, penulis melanjutkan pendidikan di Perguruan Tinggi Negeri ITS jurusan Teknik Fisika hingga tahun 2018. Bagi pembaca yang ingin menyampaikan kritik, saran, atau ingin berdiskusi dengan penulis, dapat menghubungi melalui email arnanto.rizki@gmail.com.