



TUGAS AKHIR - TF 141581

PERANCANGAN SISTEM *ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL (AFTC)* PADA *REGENERATIVE BRAKING SYSTEM* DENGAN KESALAHAN PADA AKTUATOR UNTUK KENDARAAN LISTRIK

NAUFAL NUGRAHANDHITA
NRP. 02311440000022

Dosen Pembimbing:
Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.
Murry Raditya, S.T., M.T.

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

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



FINAL PROJECT - TF 141581

**ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL (AFTC)
DESIGN OF REGENERATIVE BRAKING
SYSTEM WITH ACTUATOR FAULT FOR
ELECTRICAL VEHICLES**

NAUFAL NUGRAHANDHITA
NRP. 02311440000022

Supervisor:
Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.
Murry Raditya, S.T., M.T.

ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2018

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Naufal Nugrahandhita
NRP : 023114410000022
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 “Perancangan Sistem *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) Pada *Regenerative Braking System* Dengan Kesalahan Pada Aktuator Untuk Kendaraan Listrik” 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, 4 Juli 2018
Yang membuat pernyataan,

Naufal Nugrahandhita
NRP. 02311440000022

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**LEMBAR PENGESAHAN I
TUGAS AKHIR**

**PERANCANGAN SISTEM ACTIVE FAULT TOLERANT
CONTROL (AFTC) PADA REGENERATIVE BRAKING
SYSTEM DENGAN KESALAHAN PADA AKTUATOR
UNTUK KENDARAAN LISTRIK**

Oleh:

Naufal Nugrahandhita
NRP.0231144000022

Surabaya, 04 Juli 2018

Menyetujui,

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II


Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.
NIPN. 19760523 200012 2 001


Murry Raditya, S.T., M.T.

Mengetahui,

**Kepala Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS**


Agus Muhammad Fatta, S.T., M.Si., Ph.D.
NIPN. 19780902 200312 1002

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**PERANCANGAN SISTEM ACTIVE FAULT TOLERANT
CONTROL (AFTC) PADA REGENERATIVE BRAKING
SYSTEM DENGAN KESALAHAN PADA AKTUATOR
UNTUK KENDARAAN LISTRIK**

TUGAS AKHIR

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

Oleh:

NAUFAL NUGRAHANDHITA
NRP. 02311440000022

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.

 (Pembimbing I)

2. Murry Raditya, S.T., M.T.

 (Pembimbing II)

3. Dr. Bambang L. Widjiantoro

 (Ketua Penguji)

4. Ir. Yaumar, M.T

 (Penguji I)

5. Arief Abdurrahman, S.T, M.T

 (Penguji II)

SURABAYA
Juli, 2018

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

PERANCANGAN SISTEM ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL (AFTC) PADA REGENERATIVE BRAKING SYSTEM DENGAN KESALAHAN PADA AKTUATOR UNTUK KENDARAAN LISTRIK

Nama : Naufal Nugrahandhita
NRP : 02311440000022
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.
Murry Raditya, S.T., M.T

ABSTRAK

Regenerative Braking System adalah suatu metode pengereman dimana energi mekanik akibat putaran motor akan dikonversi menjadi energi listrik dan dikembalikan ke baterai. *Regenerative Braking System* terdiri dari beberapa komponen salah satunya adalah aktuator berupa *switch*. Kesalahan pada aktuator dapat menyebabkan kerusakan pada baterai akibat arus yang besar. Pada tugas akhir ini dilakukan perancangan *sistem Active Fault Tolerant Control* yaitu sistem kendali yang mampu menoleransi gangguan berupa kesalahan aktuator pada komponen secara otomatis. Langkah pertama yang dilakukan adalah memodelkan *Regenerative Braking System*. Langkah kedua yaitu merancang sistem kontrol PID dengan metode trial and error didapatkan nilai K_p dan K_i sebesar 0.5 dan 10. Langkah ketiga adalah merancang sistem AFTC dengan metode estimator aktuator. Dari hasil uji respon setelah diberi kesalahan bias pada aktuator, respon sistem menunjukkan bahwa kontroler yang dilengkapi AFTC mampu menghasilkan *maximum overshoot* sebesar 1,2%, *error steady state* sebesar 2% dan *settling time* sebesar 0,06 %, sedangkan sistem pengendali pada PID tanpa AFTC menghasilkan respon yang tidak stabil.

Kata Kunci : *Regenerative Braking System, Aktuator, Active Fault Tolerant Control*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL (AFTC)
DESIGN OF REGENERATIVE BRAKING SYSTEM
WITH ACTUATOR FAULT FOR ELECTRICAL
VEHICLES**

Name	: Naufal Nugrahandhita
NRP	: 02311440000022
Department	: Teknik Fisika FTI-ITS
Supervisory	: Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. Murry Raditya, S.T., M.T

ABSTRACT

Regenerative Braking System is a method of braking where mechanical energy due to motor rotation will become electrical energy to battery. The Regenerative Braking System consists of several components one of which is a switch actuator. Errors in the actuator can cause damage to the battery due to large currents. In this final project has been done Active Fault Tolerant Control design which is a control system that is able to tolerate the interference that occurs in the component automatically. The first step is to model Regenerative Braking System. The second step is PID control system with trial and error method of Kp and Ki values 0,5 and 10. The third step is AFTC with actuator estimator method. From the results of the response given the bias error on the actuator, the system response shows that AFTC able to generate maximum overshoot of 1.2%, steady state error of 2% and settling time of 0.06%, while the control system on PID without AFTC generate response which is unstable

Keywords: Regenerative Braking System, Actuator, Active Fault Tolerant Control

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya serta shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW sehingga dapat terselesaikannya tugas akhir beserta laporan tugas akhir yang berjudul **“Perancangan Active Fault Tolerant Control (AFTC) pada Regenerative Braking System Dengan Kesalahan pada Aktuator Untuk Kendaraan Listrik”**.

Penulis telah banyak memperoleh bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian tugas akhir dan laporan tugas akhir ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D selaku Ketua Departemen Teknik Fisika ITS yang telah memberikan ilmu, bimbingan serta sarana dan prasarana selama menempuh pendidikan di Teknik Fisika ITS.
2. Ibu Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. dan bapak Murry Raditya, S.T, M.T. selaku dosen pembimbing yang telah dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan dalam pengerjaan tugas akhir ini.
3. Bapak Ir. Sarwono, M.M selaku dosen wali yang telah membimbing penulis selama perkuliahan dan memberikan ilmu serta nasihat yang sangat bermanfaat.
4. Seluruh dosen Teknik Fisika ITS atas segala ilmu, bimbingan, petunjuk, dan nasihat yang sangat bermanfaat.
5. Keluarga atas segala, doa, perhatian, serta dukungan moril dan materiil yang telah diberikan.
6. Seluruh teman seperjuangan dalam tugas akhir, terima kasih untuk semuanya.
7. Seluruh teman-teman mahasiswa Departemen Teknik Fisika ITS terima kasih untuk semuanya.
8. Seluruh civitas akademika Teknik Fisika ITS, terima kasih atas segala bantuan dan kerjasamanya.
9. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terimakasih atas bantuannya.

Penulis sadar bahwa penulisan laporan tugas akhir ini masih terdapat kekurangan. Namun, semoga laporan ini dapat memberikan kontribusi yang berarti dan menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembaca, keluarga besar Teknik Fisika ITS khususnya, dan civitas akademika ITS pada umumnya. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat sebagai referensi pengerjaan laporan tugas akhir bagi mahasiswa lainnya.

Surabaya, 4 Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
COVER PAGE.....	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME.....	v
LEMBAR PENGESAHAN I	Error! Bookmark not defined.
LEMBAR PENGESAHAN II	Error! Bookmark not defined.
ABSTRAK.....	xi
ABSTRACT.....	xiii
KATA PENGANTAR.....	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
DAFTAR NOTASI	xxiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Sistematika Laporan.....	3
BAB II TEORI PENUNJANG.....	5
2.1 Motor <i>Brushless Direct Current (BLDC)</i>	5
2.2 <i>Regenerative Braking System</i>	8
2.3 <i>Solid State Relay (SSR)</i>	10
2.4 Kontrol PI	12
2.5 <i>Estimator</i>	14
2.6 <i>Sistem Active Fault Tolerant Control (AFTC)</i>	15
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	19
3.1 Pemodelan <i>Regenerative Braking System</i>	22
3.2 Perancangan pengendalian PID	25
3.3 Perancangan estimator model aktuator.....	26
3.4 Rekonfigurasi Kontrol.....	28
3.5 Uji Performansi AFTC	29
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN.....	31
4.1 Uji Tracking Kontroler pada simulasi	31
4.2 Uji Performansi Kesalahan Aktuator dengan simulasi	32

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	43
5.1 Kesimpulan	43
5.2 Saran	43
DAFTAR PUSTAKA.....	45
LAMPIRAN.....	49

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Konstruksi Motor BLDC [5]	6
Gambar 2. 2	Rangkaian <i>stator</i> motor BLDC [6].....	6
Gambar 2. 3	Grafik empat metode operasi gerak pada motor BLDC	9
Gambar 2. 4	Konstruksi <i>solid state relay (SSR)</i> [8]	10
Gambar 2. 5	<i>Solid state relay</i> [8]	11
Gambar 2. 6	Diagram blok kontrol PI [5]	13
Gambar 2. 7	Skema <i>active fault tolerant control</i> [4].....	16
Gambar 3. 1	Diagram Alir Penelitian Tugas Akhir.....	20
Gambar 3. 2	[Lanjutan] Diagram Alir Penelitian Tugas Akhir	21
Gambar 3. 3	Sinyal keluaran PWM	24
Gambar 3. 4	Diagram Blok Sistem Pengendalian arus <i>Regenerative Braking System</i>	25
Gambar 4. 1	Respon uji <i>tracking</i> kontroler pada simulasi	31
Gambar 4. 2	Hasil perbandingan respon sistem AFTC dengan sistem tanpa AFTC dengan kesalahan bias 1 aktuator.....	33
Gambar 4. 3	Hasil perbandingan respon sistem AFTC dengan sistem tanpa AFTC dengan kesalahan bias 2 aktuator.....	35
Gambar 4. 4	Respon uji <i>tracking setpoint</i> pada kesalahan 1 aktuator.....	37
Gambar 4. 5	Respon uji <i>tracking setpoint</i> pada kesalahan 2 aktuator.....	38
Gambar 4. 6	Respon uji <i>tracking setpoint</i> pada kesalahan 3 aktuator.....	40

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1	Parameter pemodelan motor BLDC	23
Tabel 3. 2	Parameter nilai gain pengendalian PID	26
Tabel 4. 3	Performansi sistem dengan kesalahan bias 100% pada satu aktuator secara sismulasi	32
Tabel 4. 4	Performansi sistem dengan kesalahan bias 100% pada dua aktuator secara simulasi	34
Tabel 4. 5	Performansi sistem uji <i>tracking setpoint</i> pada kesalahan 1 aktuator	36
Tabel 4. 6	Performansi sistem uji <i>tracking setpoint</i> pada kesalahan 2 aktuator	39
Tabel 4. 7	Performansi sistem uji <i>tracking setpoint</i> pada kesalahan 3 aktuator	40

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR NOTASI

V_a	= tegangan pada fasa A, volt
V_b	= tegangan pada fasa B, volt
V_c	= tegangan pada fasa C, volt
I_a	= Arus pada fasa A, Ampere
I_b	= Arus pada fasa B, Ampere
I_c	= Arus pada fasa C, Ampere
e_a	= <i>back electromagnetic force</i> (EMF) pada fasa A, volt
e_b	= back electromagnetic force (EMF) pada fasa A, volt
e_c	= back electromagnetic force (EMF) pada fasa A, volt
R	= Tahanan kumparan <i>stator</i> , ohm
J	= momen inersia ekuivalen dari motor, kg.m^2
L	= induktansi kumparan <i>stator</i> , henry
T_e	= torsi elektromagnetik, Nm
T_i	= torsi beban, Nm
w_m	= kecepatan sudut, rad/s
B_b	= konstanta damping
K_p	= gain proporsional
K_i	= gain integral
A	= Matriks keadaan (<i>state</i>)
B	= Matriks masukan/matriks kendali
C	= Matriks keluaran
D	= Matriks gangguan
x	= vector keadaan
$\dot{x}$	= Turunan x
y	= Vektor output pengukuran
$u(t)$	= Masukan kendali
$y(t)$	= Vektor keluaran
$x(t)$	= Vektor keadaan (<i>state</i>)
F_a	= Vektor kesalahan aktuator
$u_m(k)$	= sinyal kendali dengan kesalahan
$\hat{f}_a(k)$	= estimasi kesalahan pada aktuator
$u(k)$	= sinyal kendali sebenarnya
p	= <i>poles</i>

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beberapa negara berkembang di dunia telah mempunyai kebijakan tentang peningkatan jumlah kendaraan listrik sebagai solusi alternatif transportasi komersial. Kebijakan tersebut berguna untuk mengurangi pemakaian bahan bakar minyak bumi dan sebagai solusi untuk memperbaiki kualitas udara dengan mengurangi emisi polutan, Menurut *Electrical Vehicle Initiative*, penjualan kendaraan listrik di seluruh dunia akan mencapai target sebesar 7,2 juta buah hingga tahun 2020 [1]. Oleh karena itu, diperlukan penelitian mengenai pengembangan teknologi untuk menunjang kendaraan listrik yang mumpuni.

Salah satu permasalahan yang terjadi pada kendaraan listrik adalah mengenai sistem penyimpanan energi yang tidak efisien. Kendala yang muncul dari sistem penyimpanan energi yaitu jarak tempuh dari kendaraan listrik yang terbatas. Salah satu metode untuk menyiasati kendala tersebut, yaitu dengan sistem regenerasi energi saat pengereman elektrik atau biasa disebut *Regenerative Braking System (RBS)*. Selama proses pengereman elektrik berlangsung, energi kinetik pada kendaraan listrik tersebut dikonversi menjadi energi listrik dengan *RBS* dan disimpan pada baterai. Efisiensi energi dari kendaraan listrik dapat meningkat dan jarak tempuh dari kendaraan listrik akan bertambah [2]. Dari penelitian sebelum nya dapat diketahui bahwa efisiensi energi dari kendaraan listrik akan meningkat sebanyak 8-25% dengan menggunakan sistem *RBS* [3].

Suatu proses pengendalian *RBS* diperlukan adanya aktuator *switch* untuk mengubah sistem penyimpanan energi saat kondisi akselerasi dan saat kondisi regenerasi energi. Hal tersebut dibedakan untuk membentuk aliran daya keluar dan masuk ke baterai. Baterai akan discharge ketika motor dalam kondisi akselerasi sebaliknya jika motor dalam kondisi pengereman atau deselerasi maka baterai akan *charge*. Penggantian urutan switch

akan bekerja berdasarkan sinyal yang diberikan oleh sensor arus ketika motor dalam keadaan deselerasi.

Dalam beberapa permasalahan desain pengendalian, sistem dapat menghasilkan kinerja yang tidak stabil karena performa sistem rentan terhadap kesalahan pada sensor maupun aktuator. Untuk mengatasi hal tersebut diperlukan sistem kendali yang mampu menoleransi gangguan berupa kesalahan pada komponen secara otomatis disebut *fault tolerant control system* (FTCS). FTCS dapat diklasifikasikan dalam 2 tipe yaitu *Active Fault Tolerant Control System* (AFTCS) dan *Passive Fault Tolerant Control System* (PFTCS). AFTCS terdiri dari 2 tahapan yaitu *Fault Detection and Identification* (FDI) dan *Reconfigurable Control* [4]. FDI digunakan untuk memperkirakan kesalahan sedangkan *reconfigurable control* digunakan untuk mengkompensasi sinyal kendali secara otomatis sehingga sistem tetap stabil. Sistem yang stabil ditentukan dengan parameter yang digunakan yaitu *maximum overshoot*, *settling time*, dan *error steady state* terhadap *set point*.

Pada tugas akhir ini dilakukan Perancangan sistem *active fault tolerant control* (AFTC) pada *regenerative braking system* dengan kesalahan pada aktuator untuk kendaraan listrik. Penggunaan sistem AFTC dapat mentoleransi kesalahan yang terjadi pada *Regenerative Braking System* sehingga sistem dapat bekerja secara stabil.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut maka dapat dirumuskan permasalahannya yaitu :

- Bagaimana merancang *active fault tolerant control* (AFTC) pada *regenerative braking system* (RBS) agar meminimalisir kesalahan pada aktuator?
- Bagaimana perfomansi *active fault tolerant control* (AFTC) pada *regenerative braking system* (RBS) ?

1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam tugas akhir ini yaitu merancang *active fault tolerant control* (AFTC) pada *regenerative braking system* (RBS) yang mampu menangani kesalahan pada aktuator.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

- a. Pemodelan yang digunakan adalah pengereman pada satu roda
- b. Motor yang digunakan tipe *Brushless Direct Current* (BLDC).
- c. Variabel yang dikontrol adalah arus motor BLDC.
- d. Kesalahan yang digunakan adalah kesalahan pada aktuator berupa *switch solid state relay*
- e. Kesalahan yang terjadi adalah kesalahan bias

1.5 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir adalah sebagai berikut:

- a. BAB I PENDAHULUAN
Pada bab I ini terdiri dari latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah, dan sistematika laporan.
- b. BAB II TEORI PENUNJANG
Pada bab II ini dibahas mengenai teori-teori yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan, seperti teori sistem motor *brushless DC*, pemodelan *regenerative braking system*, kontrol PI, *solid state relay*, sistem AFTC, dan *Estimator*.
- c. BAB III METODOLOGI PENELITIAN
Pada bab III ini berisi mengenai rancangan dari penelitian yang dilakukan, metode, dan langkah-langkah dalam penelitian.
- d. BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN
Pada bab IV ini berisi tentang analisis hasil perancangan sistem *active fault tolerant control*.

e. BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab V ini diberikan kesimpulan tentang tugas akhir yang telah dilakukan berdasarkan data-data yang diperoleh serta diberikan saran sebagai penunjang maupun pengembangan untuk tugas akhir yang selanjutnya

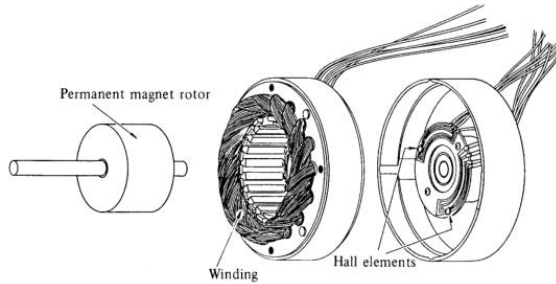
BAB II

TEORI PENUNJANG

2.1 Motor *Brushless Direct Current* (BLDC)

Motor *brushless direct current* (BLDC) adalah sistem penggerak elektrik bersumber arus DC tanpa sikat. Saat ini BLDC motor telah digunakan secara luas pada aplikasi *electric vehicle* (EV) karena memiliki beberapa keunggulan dibandingkan motor DC konvensional, dan motor induksi. Dibandingkan dengan motor DC konvensional, BLDC memiliki biaya perawatan yang lebih rendah dan kecepatan yang lebih tinggi akibat tidak digunakannya brush. Dibandingkan dengan motor induksi, BLDC memiliki efisiensi yang lebih tinggi karena rotor dan torsi awal yang lebih tinggi karena rotor terbuat dari magnet permanen [5].

Secara umum motor BLDC terdiri dari dua bagian seperti pada Gambar 2.1, yakni, rotor, bagian yang bergerak, yang terbuat dari permanen magnet dan stator, bagian yang tidak bergerak, yang terbuat dari kumparan 3 fasa. Walaupun merupakan motor listrik synchronous AC 3 fasa, motor ini tetap disebut dengan BLDC karena pada implementasinya BLDC menggunakan sumber DC sebagai sumber energi utama yang kemudian diubah menjadi tegangan AC dengan menggunakan inverter 3 fasa. Tujuan dari pemberian tegangan AC 3 fasa pada stator BLDC adalah menciptakan medan magnet putar stator untuk menarik magnet rotor. Oleh karena tidak adanya brush pada motor BLDC, untuk menentukan timing komutasi yang tepat pada motor ini sehingga didapatkan torsi dan kecepatan yang konstan, diperlukan 3 buah sensor *Hall* dan atau *encoder*. Pada sensor Hall, timing komutasi ditentukan dengan cara mendeteksi medan magnet rotor dengan menggunakan 3 buah sensor *hall* untuk mendapatkan 6 kombinasi timing yang berbeda..



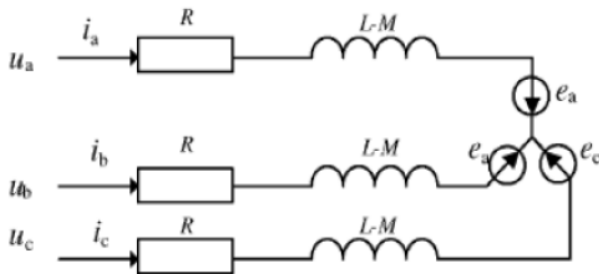
Gambar 2. 1 Konstruksi Motor BLDC [5]

Motor BLDC memiliki magnet permanen pada rotor dan kumparan 3 fasa di statornya seperti pada skema Gambar 2.2. Dengan menggunakan notasi vektor, baik kumparan rotor maupun stator dapat digambarkan sebagai sebuah rangkaian resistif dan induktif, dan dengan menggunakan hukum *Kirchhoff* untuk tegangan (KVL), persamaan kumparan stator dapat dituliskan sebagai berikut

$$V_a = (L - M) \frac{di_a}{dt} + R \cdot i_a + e_a \quad (2.1)$$

$$V_b = (L - M) \frac{di_b}{dt} + R \cdot i_b + e_b \quad (2.2)$$

$$V_c = (L - M) \frac{di_c}{dt} + R \cdot i_c + e_c \quad (2.3)$$



Gambar 2. 2 Rangkaian *stator* motor BLDC [6]

Dimana :

- V_a = tegangan pada fasa A, volt
- V_b = tegangan pada fasa B, volt
- V_c = tegangan pada fasa C, volt
- I_a = Arus pada fasa A, Ampere
- I_b = Arus pada fasa B, Ampere
- I_c = Arus pada fasa C, Ampere
- e_a = *back electromagnetic force* (EMF) pada fasa A, volt
- e_b = *back electromagnetic force* (EMF) pada fasa A, volt
- e_c = *back electromagnetic force* (EMF) pada fasa A, volt
- R = Tahanan kumparan *stator*, ohm
- M = Mutual induktansi kumparan *stator*
- L = induktansi kumparan *stator*, henry

Sehingga bentuk persamaan matriks dari kumparan stator adalah sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L - M & 0 & 0 \\ 0 & L - M & 0 \\ 0 & 0 & L - M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Dengan menggunakan hukum kedua Newton tentang persamaan gerak, maka dapat ditentukan persamaan mekanik dari motor BLDC sebagai berikut :

$$J \frac{d\omega}{dt} = \sum T_l \quad (2.5)$$

$$T_e = B \omega_m + J \frac{d\omega}{dt} + T_l \quad (2.6)$$

Dimana :

- T_e = torsi elektromagnetik
- J = inersia rotor
- T_l = torsi beban

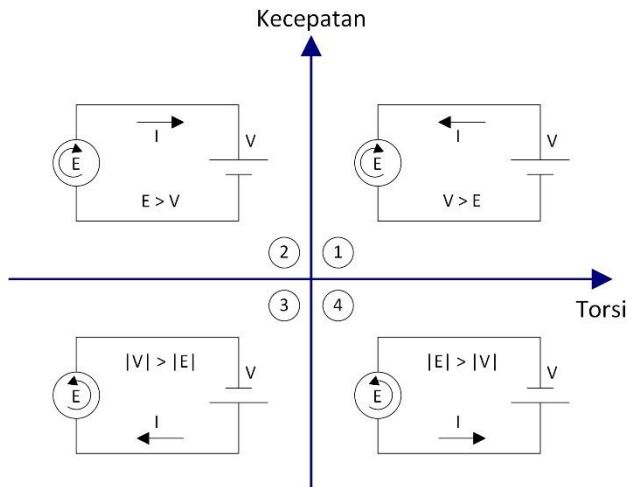
ω_m = Kecepatan sudut
 B = konstanta *damping*

Karena arus yang diberikan berupa arus AC 3 fasa sinusoidal, nilai medan magnet dan polarisasi setiap kumparan akan berubah – ubah setiap saat. Medan putar dari magnet stator timbul akibat adanya perubahan polaritas pada stator A, B, dan C. Ketika stator A diberikan tegangan negatif maka akan timbul medan magnet dengan polaritas negatif sedangkan B dan C yang diberikan tegangan positif akan memiliki polaritas positif. Akibat adanya perbedaan polaritas antara medan magnet kumparan stator dan magnet rotor, sisi positif magnet rotor akan berputar mendekati medan magnet stator A, sedangkan sisi negatifnya akan berputar mengikuti medan magnet stator B dan C. Akibat tegangan yang digunakan berupa tegangan AC sinusoidal, medan magnet stator A, B, dan C akan berubah – ubah polaritas dan besarnya mengikuti perubahan tegangan sinusoidal AC. Ketika A dan B memiliki medan magnet negatif akibat mendapatkan tegangan negatif dan A memiliki medan magnet positif akibat tegangan positif, magnet permanen rotor akan berputar menuju ke polaritas yang bersesuaian yakni bagian negatif akan berputar menuju medan magnet stator C dan sebaliknya bagian positif akan berputar menuju medan magnet stator A dan B. Selanjutnya ketika B memiliki medan magnet negatif dan A serta C memiliki medan magnet positif, bagian positif magnet permanen akan berputar menuju B dan bagian negatif akan menuju A dari kumparan C. Karena tegangan AC sinusoidal yang digunakan berlangsung secara kontinu, proses perubahan polaritas tegangan pada stator ini akan terjadi secara terus menerus sehingga menciptakan medan putar magnet stator dan magnet permanen rotor akan berputar mengikuti medan putar magnet stator ini. Hal inilah yang menyebabkan rotor pada BLDC dapat berputar.

2.2 Regenerative Braking System

Terdapat empat metode operasi gerak pada motor BLDC atau biasa disebut dengan *four quadrant operation* seperti pada Gambar 2.3 grafik karakteristik antara kecepatan dengan torsi.

Ketika motor beroperasi pada kuadran pertama dan ketiga, nilai tegangan pada sumber lebih besar dari tegangan balik motor sehingga motor dalam metode akselerasi maju dan mundur dengan arah arus yang berbeda. Sedangkan ketika motor beroperasi pada kuadran kedua dan keempat, tegangan balik dari motor lebih besar daripada sumber tegangan sehingga terjadi metode pengereman maju dan mundur dengan arah yang berbeda juga [1].

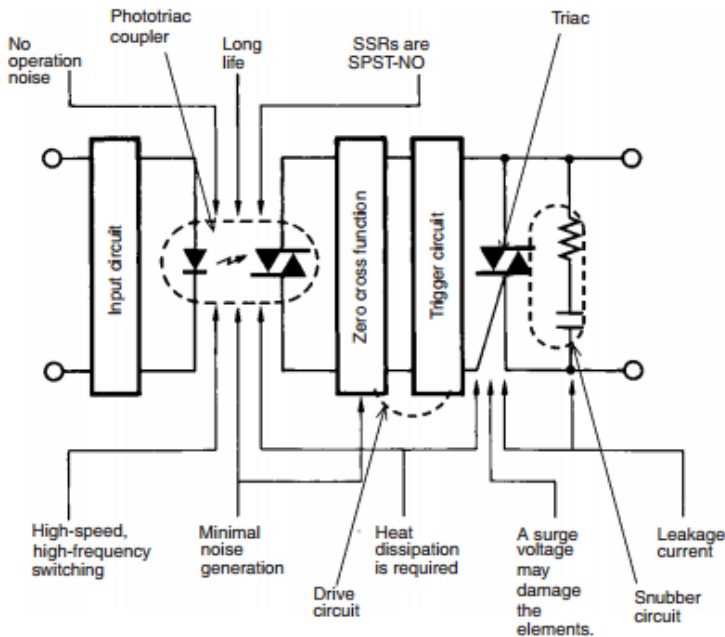


Gambar 2. 3 Grafik empat metode operasi gerak pada motor BLDC

Regenerative braking system adalah suatu metode pengereman dimana energi mekanik akibat putaran motor akan dikonversi menjadi energi listrik dan dikembalikan ke baterai. Pengereman regeneratif dapat diwujudkan ketika motor dalam keadaan deselerasi. Pada saat torsi motor bernilai positif, maka motor akan mengambil daya dari baterai dan ketika torsi motor bernilai negatif, maka motor akan bekerja layaknya generator yaitu mengisi daya dari baterai. Pengisian baterai tersebut disebabkan oleh adanya tegangan balik pada motor atau dikenal dengan *back EMF (electromagnetic force)*. Untuk menghindari

kerusakan pada baterai akibat arus yang besar dari back EMF maka diperlukan pengendalian pada proses pengereman regeneratif [7]. Besarnya arus balik/arus pengereman ini dapat dikendalikan dengan menggunakan mode pensaklaran berupa aktuatur *Solid state relay* dengan *pulse width modulation* (PWM). PWM berfungsi sebagai pengatur *level* dari pengereman regeneratif dengan *variansi duty cycle* dari sinyal PWM tersebut

2.3 Solid State Relay (SSR)



Gambar 2. 4 Konstruksi *solid state relay* (SSR) [8]

Electronic switch atau biasa disebut dengan *Solid state relay* (SSR) adalah sebuah alat saklar elektronik yang tidak memiliki bagian yang bergerak. Fungsi dari SSR tidak terlalu berbeda dengan relai elektromagnetis konvensional. Namun pada alat

penghubung dari SSR berbeda dengan relai elektromagnetis. Pada relai elektromagnetis menggunakan penghubung berupa penggerak lilitan kawat penghantar atau kumparan. Sedangkan pada SSR menggunakan alat penghubung semikonduktor seperti *thyristor*, *triac*, *diode* dan *transistor*. Solid state relay ini dibangun dengan isolator untuk memisahkan bagian input (kontrol) dan output (beban) [8].

SSR juga dikenal dengan sebutan *opto-triac*. Disebut *opto-triac* karena didalam SSR mempunyai konstruksi menggunakan gabungan antara *triac* dengan *optocoupler* sebagai komponen utama pada rangkaian pemicunya. *Optocoupler* merupakan komponen optik semikonduktor yang digunakan untuk memindahkan informasi dari tegangan rendah ke tegangan tinggi. Sedangkan *triac* atau biasa disebut *triade alternating current switch* sebagai saklar arus bolak-balik.



Gambar 2. 5 Solid state relay [8]

Dengan Solid state relay kita dapat menghindari terjadinya percikan api juga dapat menghindari terjadinya sambungan tidak sempurna karena kontaktor yang keropos seperti pada relay

konvensional. Selain itu apabila dibandingkan dengan relai elektromagnetik (*electromagnetic relay – EMR*), SSR mempunyai beberapa kelebihan diantaranya yaitu :

- Lebih tahan lama dan dapat diandalkan karena pada SSR tidak mempunyai bagian yang bergerak pada pensaklaran
- Tidak menimbulkan *interferensi* elektromagnetik
- Tahan terhadap guncangan dan getaran
- Memiliki waktu tanggapan yang cepat sekitar 10us pada operasi pensaklaran

2.4 Kontrol PI

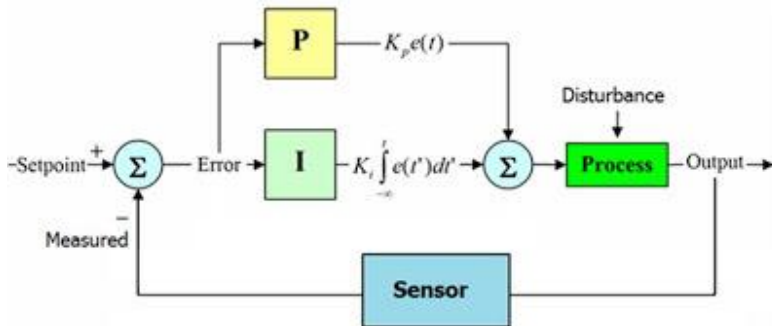
Fungsi dari kontroler dalam sebuah sistem kontrol mempunyai kontribusi yang besar terhadap perilaku sistem. Hal itu disebabkan oleh tidak dapat dirubahnya komponen penyusun sistem tersebut. Artinya, karakteristik plant harus diterima sebagaimana adanya, perubahan perilaku sistem hanya dapat dilakukan melalui penambahan kontroler saja. Salah satu fungsi kontroler adalah mengurangi sinyal *error*, sinyal *error* adalah perbedaan nilai *setpoint* dengan nilai *output plant*. *Setpoint* adalah nilai referensi atau nilai yang diinginkan, sedangkan *output plant* adalah nilai aktual yang terukur pada *output plant*. Semakin kecil nilai sinyal error maka kinerja sistem kontrol dinilai semakin baik. Prinsip kerja kontroler adalah membandingkan nilai output plant dengan nilai setpoint, menentukan nilai kesalahan dan akhirnya menghasilkan sinyal kontrol untuk meminimalkan kesalahan [8].

Pengendali PI merupakan suatu algoritma kontrol untuk menghitung besarnya koreksi yang diperlukan suatu alat pengendali untuk mengendalikan sebuah proses. Kontrol *proportional* digunakan sebagai penguat atau pembesar sinyal sehingga proses variable dapat mencapai set point. Namun penambahan *gain proportional* akan meninggalkan *offset*.. Oleh karena itu, kekurangan dari kontrol *proportional* yang selalu meninggalkan *offset* diperbaiki oleh kontrol *integral* untuk menghilangkan *offset* tersebut. Kemampuan kontrol *integral* untuk menghilangkan *offset* tidak disertai dengan kemampuan respon secara cepat. Upaya memperbaiki respon didapatkan

dengan menggunakan kontrol *derivative*. Algoritma pengendalian PI dirumuskan sebagai :

$$u(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau] \quad (2.7)$$

Dimana $u(t)$ adalah variable output dari kontroler dan e adalah variable kesalahan kontrol. Parameter pengontrol dari PI adalah gain proporsional K , waktu intergal T_i , dan waktu turunan T_d . Seperti pada persamaan (2.7) dan pada Gambar 2.4 sinyal control PID merupakan penjumlahan dari 3 yaitu : P-term (sebanding dengan kesalahan), I (sebanding dengan integral dari kesalahan), dan D-term (sebanding dengan turunan dari kesalahan).



Gambar 2. 6 Diagram blok kontrol PI [5]

Untuk mendapatkan hasil respon sistem yang stabil, suatu sistem pengendalian harus mendapatkan proses tuning atau penyetelan alat. Berbagai macam metode tuning telah ditemukan. Salah satunya adalah metode trial and error. Metode ini secara harfiah dapat disamakan dengan dengan istilah coba-coba, tetapi kata trial and error disini mengandung pengertian coba-coba yang didukung dengan pengetahuan yang pasti. Misalnya, seseorang memang mencoba-coba menurunkan kontrol proportional untuk mempercepat reaksi, tetapi orang tersebut harus tau benar bahwa

kontrol proportional cukup diturunkan dari 125% menjadi 100%, tidak dari 125% menjadi 25% [8]. Artinya, metode trial and error ini dapat dikatakan metode coba-coba yang didukung dengan pengetahuan dari seseorang akan akibat yang terjadi jika parameter diturunkan secara drastis.

Beberapa parameter dalam algoritma PID yang harus diketahui dalam suatu *system closed loop* adalah *maximum overshoot*, *settling time*, dan *error steady state*

- a. *Maximum (percent) overshoot* merupakan nilai puncak tertinggi respon sistem pengukuran terhadap keadaan yang diinginkan. Jika nilai steady state dari respon berbeda dengan nilai yang diinginkan, umumnya menggunakan maximum percent overshoot dengan persamaan :

$$\text{Maksimum overshoot} = \frac{y_p - y_{ss}}{y_{ss}} \times 100\% \quad (2.8)$$

dengan y_p merupakan nilai maksimum respon sistem dan y_{ss} adalah nilai *steady state* sistem

- b. *Settling time* adalah waktu yang dibutuhkan respon sistem untuk mencapai dan berada direntang $\pm 5\%$ atau $\pm 2\%$ dari nilai akhir.
- c. *Error steady state* adalah nilai error yang dihasilkan dari keadaan steady ketika belum mencapai *set point* yang diinginkan

2.5 Estimator

Estimator adalah suatu algoritma yang digunakan mengestimasi keadaan (state) sistem berdasarkan model matematis sistem. Selain itu estimator juga digunakan untuk mengestimasi kesalahan yang terjadi pada sistem [9]. Pada umumnya suatu sistem dimodelkan dalam bentuk ruang keadaan (*state space*), yang dapat didefinisikan secara umum seperti persamaan sistem sebagai berikut :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.9)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (2.10)$$

Dimana :

A = matriks pada keadaan (*state*)

B = matriks pada kontrol input

C = matriks pada hasil pengukuran

D = matriks pada gangguan

x = vektor keadaan (*state*)

$\dot{x}$ = turunan vektor keadaan

u = masukan (*input*) kendali

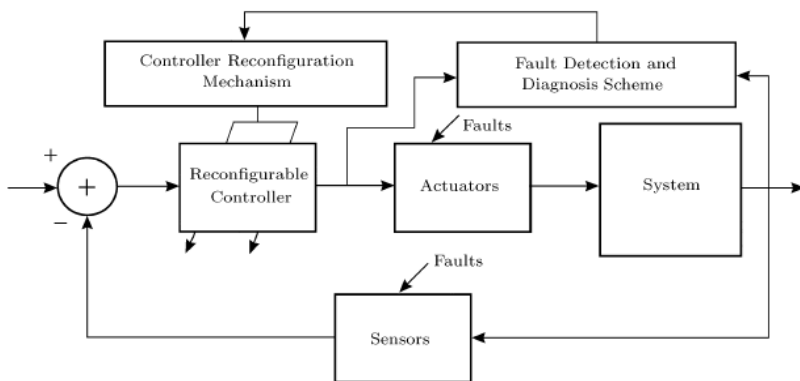
y = vektor keluaran

Perancangan estimator digunakan untuk mengestimasi kesalahan pada keadaan sistem dalam bentuk ruang keadaan. Bentuk umum estimator dengan sebuah kesalahan aktuator ditunjukkan pada persamaan (2.9) dan (2.10), dimana persamaan tersebut merupakan representasi dari model matematis sistem agar dapat mengkompensasi kesalahan pada aktuator [10].

2.6 Sistem Active Fault Tolerant Control (AFTC)

Terkadang pada suatu proses, manufaktur, dan lainnya terjadi beberapa kerusakan minor pada aktuator, sensor ataupun komponen-komponen lain penyusun sistem tersebut. Untuk mencegah kesalahan dan untuk meminimalkan risiko potensial, teknik pengendalian dan pendekatan desain baru perlu dikembangkan untuk mengatasi malfungsi komponen sistem dengan mempertahankan tingkat stabilitas dan tingkat kinerja sistem yang diinginkan. Sistem kontrol yang memiliki kemampuan semacam itu sering dikenal sebagai sistem kontrol toleran kesalahan (FTCS) [4]. FTCS dapat diklasifikasikan pada 2 tipe yaitu passive fault tolerant control system (PFTCS) dan active fault tolerant control system (AFTCS). PFCTS didesain untuk menjadi sistem kontrol yang *robust* dari kesalahan suatu komponen. Sedangkan AFTCS bereaksi terhadap kesalahan yang terjadi pada suatu komponen dengan merekonfigurasi aksi kontrol

sehingga kestabilan dan kinerja pada sistem dapat dijaga. Dengan demikian, tujuan utama dari FTCS adalah merancang kontroler dengan struktur yang cocok untuk mencapai kestabilan dan kinerja yang diinginkan. Tidak hanya ketika kontrol komponen berfungsi secara normal tetapi ketika terjadi kesalahan pada suatu komponen tersebut.



Gambar 2. 7 Skema *active fault tolerant control* [4]

AFTCS dapat juga disebut fault detection and identification (FDI). Perbedaan AFTC dan PFTC terletak pada perancangan FDI dan reconfigurable controller (RC), sehingga kunci utama pada AFTC adalah merancang kontroler yang dapat direkonfigurasi, skema FDI dengan sensitivitas yang tinggi terhadap kesalahan dan robust terhadap ketidakpastian, dan mekanisme rekonfigurasi yang sebisa mungkin mampu memulihkan performansi sistem setelah terjadi kesalahan walaupun terdapat ketidakpastian dan time delay pada FDI Secara umum *Active Fault Tolerant Control* terdiri dari empat sub sistem yaitu :

- Reconfigurable Controller (RC)
- Fault Detection Diagnosis (FDD)
- Mekanisme RC
- Command Reference Actuator

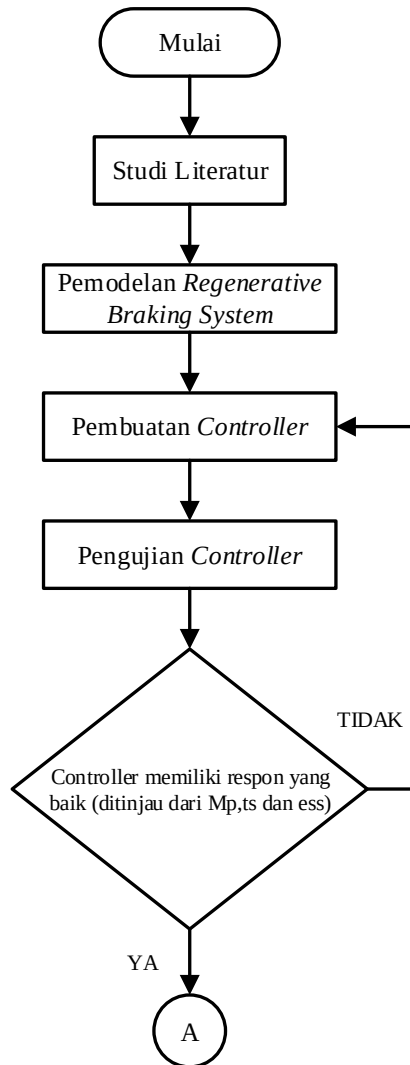
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III

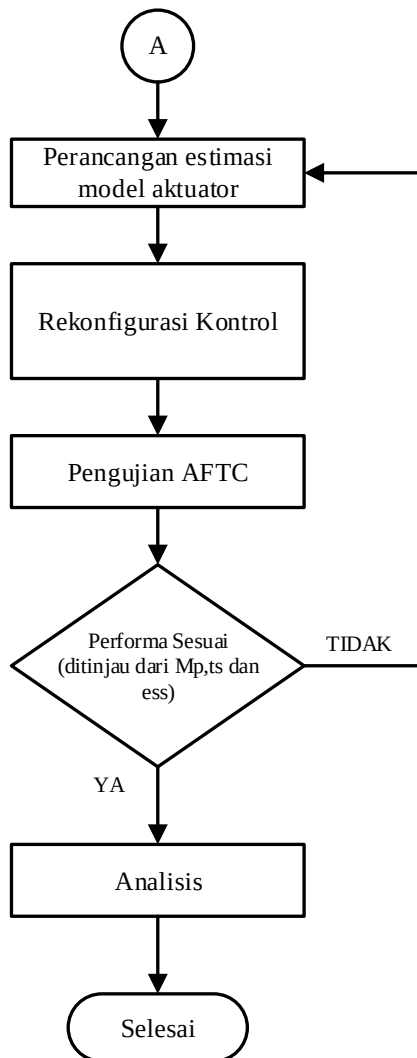
METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab metodologi penelitian kali ini membahas mengenai prosedur penelitian yang dilakukan guna mencapai tujuan penelitian Tugas Akhir ini dijelaskan melalui sebuah diagram alir (*flowchart*) pada Gambar 3.1 yang mendeskripsikan tahap-tahap penelitian sebagai berikut :

- a. Studi literatur diperlukan pada penyusunan tugas akhir ini untuk dijadikan referensi dalam melakukan pengerjaan dan penyusunan tugas akhir. Oleh karena itu, diperlukan membangun pemahaman secara mendetail mengenai regenerative braking system, kontrol PID, dan Active Fault Toleran Control (AFTC). Studi literatur dilakukan dengan mencari sumber referensi melalui buku dan jurnal penelitian yang sudah pernah dilakukan terkait poin-poin pada topik tugas akhir kali ini
- b. Pemodelan Regenerative Braking System didapat dari jurnal IEEE yang telah melakukan penelitian sebelumnya. Pemodelan disimulasikan pada fitur Simulink pada perangkat lunak Matlab R2014a
- c. Setelah dilakukan pemodelan pada Regenerative Braking System, maka dilakukan perancangan kontroler PID yang bertujuan untuk menentukan nilai parameter proportional, integral dan derivative yang mampu menghasilkan respon yang baik untuk sistem. Metode yang digunakan untuk mendapatkan nilai parameter-parameter tersebut ialah metode trial and error
- d. Perancangan estimator dilakukan untuk mengestimasi kesalahan pada aktuator. Nilai matriks ruang keadaan untuk perancangan estimator diperoleh dari simulasi Regenerative Braking System. Pada perancangan observer dilakukan penentuan gain observer pada perangkat lunak MATLAB R2014a.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian Tugas Akhir



Gambar 3. 2 [Lanjutan] Diagram Alir Penelitian Tugas Akhir

- e. Setelah didapatkan estimator aktuator, maka dilakukan rekonfigurasi kontrol guna untuk pengaturan ulang dari suatu sistem kendali dengan metode kompensasi yang digunakan untuk menoleransi kesalahan pada aktuator
- f. Setelah dilakukan rekonfigurasi kontrol selanjutnya dilakukan uji performansi dengan memberikan kesalahan pada aktuator. Performansi dari grafik respon tersebut selanjutnya dibandingkan antara sistem kontrol PID menggunakan AFTC dengan performansi sistem yang hanya menggunakan kontrol PID saja.
- g. Pembuatan laporan dilakukan setelah dilakukan uji performansi dimana laporan tersebut berisi analisa hasil dari uji performansi. Selain itu juga laporan tersebut berisi mengenai teori – teori penunjang yang digunakan pada saat penelitian dilakukan dan dokumentasi selama proses pengerjaan tugas akhir berupa tulisan ilmiah

3.1 Pemodelan *Regenerative Braking System*

Pemodelan pada *Regenerative Braking System* dilakukan dengan penurunan model matematis dari *plant* berupa motor *brushless* DC. Pemodelan motor BLDC pada penilitan ini menggunakan pemodelan pada satu roda. Motor BLDC terdiri dari bagian stator yang memiliki magnet permanen dan bagian stator yang memiliki kumparan tiga fasa. Dengan menggunakan hukum Kirchoff untuk tegangan (KVL) pada suatu rangkaian resistansi dan induktansi maka model matematis motor BLDC dapat diketahui seperti pada persamaan (2.1), (2.2) dan (2.3). Dari ketiga persamaan tersebut disubstitusi hingga mendapatkan persamaan sebagai berikut :

$$V_{ab} = R(i_a - i_b) + (L - M) \frac{d}{dt}(i_a - i_b) + e_{ab} \quad (3.1)$$

$$V_{bc} = R(i_b - i_c) + (L - M) \frac{d}{dt}(i_b - i_c) + e_{ab} \quad (3.2)$$

Dengan menggunakan hukum Kirchoff 1 tentang persamaan arus total yang dapat dituliskan sebagai berikut :

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (3.3)$$

Dari persamaan diatas dapat memodifikasi persamaan (3.1) dan (3.2) sehingga diperoleh persamaan turunan arus sebagai berikut :

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{R}{L}i_a + \frac{2}{3L}(V_{ab} - e_{ab}) + \frac{1}{3L}(V_{bc} - e_{bc}) \quad (3.4)$$

$$\frac{di_b}{dt} = -\frac{R}{L}i_b - \frac{2}{3L}(V_{ab} - e_{ab}) + \frac{1}{3L}(V_{bc} - e_{bc}) \quad (3.5)$$

Persamaan (3.4) dan (3.5) dapat diubah ke dalam bentuk persamaan ruang keadaan motor BLDC sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2}{3L} & \frac{1}{3L} \\ -\frac{1}{3L} & -\frac{1}{3L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{bc} - e_{bc} \\ V_{bc} - e_{bc} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Dimana nilai mutual induktansi (M) dianggap konstan. Untuk nilai dari resistansi (R) dan induktansi (L) pada motor dapat diperoleh dari parameter datasheet motor BLDC yang digunakan yaitu sebagai berikut :

Tabel 3. 1 Parameter pemodelan motor BLDC

Deskripsi	Nilai	Satuan
Resistansi stator fasa motor (R)	2.8750	ohm
Induktansi stator fasa motor (L)	0.00085	H
Daya	1	kW
Back EMF Trapezoidal	120	derajat

Pada pemodelan sinyal pulse-width modulation (PWM) didapatkan melalui komparasi sinyal ramp (*carrier signal*) dengan nilai *error* antara nilai tegangan yang diinginkan dengan nilai tegangan keluaran aktual. Persamaan model matematika dari sinyal PWM adalah sebagai berikut :

$$\delta(t) = \text{sign}(V_r(t) - V_c(t)) \quad (3.8)$$

Dimana :

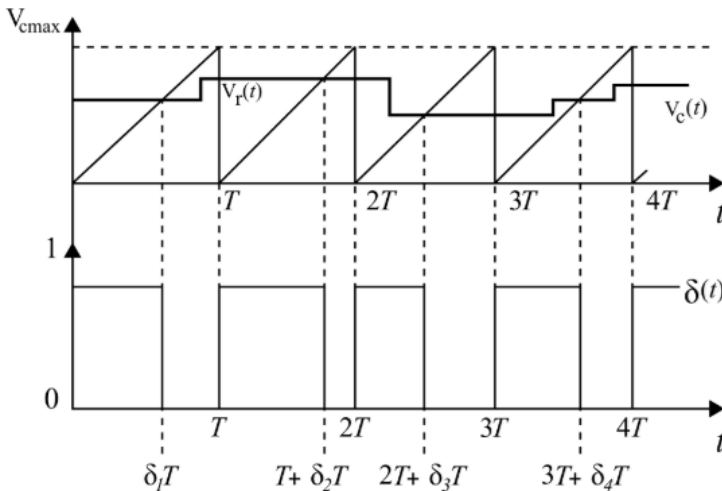
$V_r(t)$ = tegangan output generator dari sinyal ramp

$V_c(t)$ = tegangan keluaran aktual yang dikomparasi

sign = fungsi sign

$\delta(t)$ = output PWM

Nilai dari fungsi *sign* akan bernilai positif ketika nilai tegangan sinyal ramp $V_r(t)$ lebih besar dari nilai tegangan keluaran aktual $V_c(t)$, jika tidak maka nilai keluaran PWM bernilai 0. Hal tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.3



Gambar 3. 3 Sinyal keluaran PWM

Pemodelan dari aktuator berupa *solid state relay* didapatkan dari nilai masukan dari sinyal PWM berupa nilai rentang duty pada sinyal keluaran PWM. Sehingga persamaan model matematis dari aktuator *solid state* dapat ditunjukkan pada persamaan berikut :

$$\frac{\delta(t)}{V_c(t)} = \frac{G_c}{1 + \frac{sT}{2}} \quad (3.9)$$

Dimana :

$\delta(t)$ = output PWM

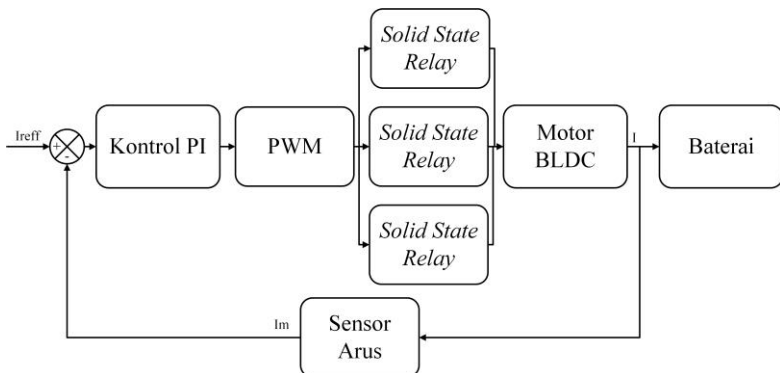
$V_c(t)$ = tegangan keluaran aktual yang dikomparasi

G_c = nilai *gain* kompensator

$T/2$ = asumsi *time delay* pada PWM

3.2 Perancangan pengendalian PID

Sistem *regenerative braking system* pada motor BLDC terdiri atas beberapa komponen yaitu *plant* motor BLDC, sensor arus dan aktuator *Solid state relay*, sehingga pemodelannya meliputi itu semua. Secara sistem *close loop* dapat ditunjukan dengan gambar diagram blok sebagai berikut :



Gambar 3. 4 Diagram Blok Sistem Pengendalian arus
Regenerative Braking System

Karakteristik pengendali PI sangat dipengaruhi oleh kontribusi besaran dari dua parameter yaitu nilai Kp dan Ki. Penentuan nilai parameter kendali Kp dan Ki didapatkan dengan metode *trial and error* untuk perancangan secara simulasi dengan simulink pada perangkat lunak matlab R2014a. *Tuning* yang dilakukan dengan metode *trial and error* hingga mencapai respon yang diinginkan. Parameter nilai gain *proportional* dan nilai gain *integral* ditampilkan pada Tabel 3.2

Tabel 3. 2 Parameter nilai gain pengendalian PID

<i>Gain Coefficient</i>	Nilai
Kp	0.5
Ki	10

3.3 Perancangan estimator model aktuator

Perancangan model aktuator digunakan untuk mengestimasi kesalahan yang ada dengan cara mengembangkan persamaan ruang keadaan sistem. Persamaan ruang keadaan dituliskan sebagai berikut :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (3.10)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -338,2 & 0 \\ 0 & -338,2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 78,4 & 39,2 \\ -39,2 & -39,2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{bc} - e_{bc} \\ V_{bc} - e_{bc} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (3.12)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,334 & 0 \\ 0 & 0,334 \\ -0,334 & -0,334 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$A = \begin{bmatrix} -338,2 & 0 \\ 0 & -338,2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 B &= \begin{bmatrix} 78,4 & 39,2 \\ -39,2 & -39,2 \end{bmatrix} \\
 C &= \begin{bmatrix} 0,334 & 0 \\ 0 & 0,334 \\ -0,334 & -0,334 \end{bmatrix} \\
 D &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

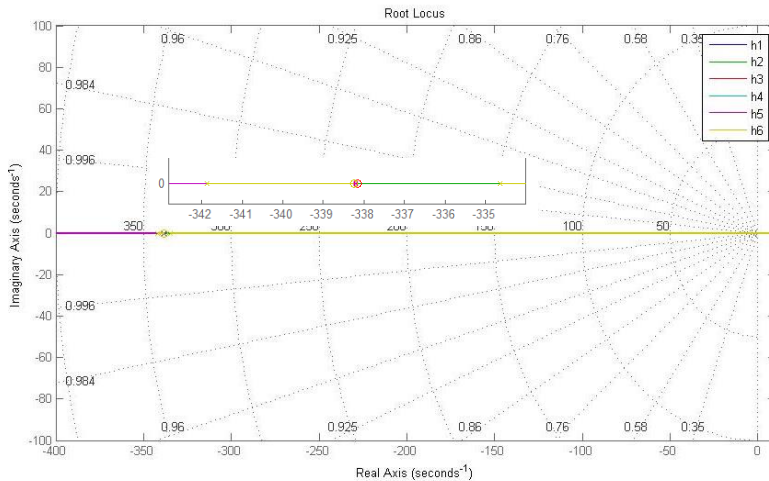
Dimana :

- A = matriks pada keadaan (*state*)
- B = matriks pada kontrol input
- C = matriks pada hasil pengukuran
- D = matriks pada gangguan
- x = vektor keadaan (*state*)
- $\dot{x}$ = turunan vektor keadaan
- u = masukan (*input*) kendali
- y = vektor keluaran

Sinyal keluaran dari ruang keadaan selanjutnya dipakai sebagai variable untuk mencari fungsi arus *root mean square* (Irms). Irms memiliki persamaan sebagai berikut :

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{(I_a - I_b)^2 + (I_b - I_c)^2 + (I_a - I_c)^2}{3}} \quad (3.14)$$

Selanjutnya persamaan (3.9), (3.11) dan (3.13) dibuat pada program simulink di *software* MATLAB 2014a untuk dilakukan simulasi. Dari hasil Simulink diperlukan pengujian kestabilan dari model estimator agar mengetahui respon keluaran estimator ini dapat dikatakan stabil untuk mengestimasi kesalahan pada aktuator. Pengujian dilakukan menggunakan metode *rooth locus*. Hal tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3. 5 Respon *rooth locus* pada estimator

Dari Gambar 3.5 dapat diketahui bahwa nilai pole berada pada sebelah kiri dari sumbu imajiner pada rentang nilai *real axis* -343 sampai dengan -336. Hal tersebut dapat membuktikan bahwa sistem estimator ini dapat dikatakan stabil karena nilai pole berada pada sebelah kiri dari sumbu imajiner, sehingga model estimator ini dapat digunakan estimator aktuator untuk mengestimasi kesalahan pada aktuator.

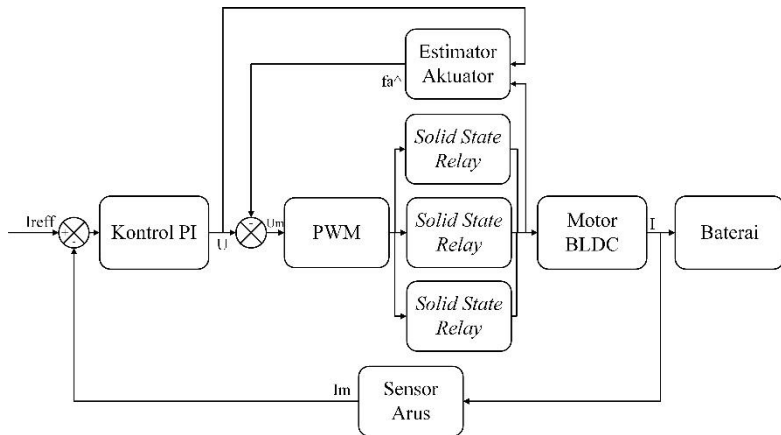
3.4 Rekonfigurasi Kontrol

Rekonfigurasi kontrol adalah pengaturan ulang dari suatu sistem kendali dengan metode kompensasi yang digunakan untuk menoleransi kesalahan pada aktuator. Kesalahan yang terjadi pada aktuator menyebabkan perubahan nilai sinyal kontrol (u) yang seharusnya sebagai masukan dari aktuator berubah menjadi kesalahan yang didefinisikan dengan $(u+fa)$. Agar sinyal masukan dari aktuator adalah sinyal kontrol (u), maka hasil estimasi model aktuator akan dikurangkan dengan sinyal setelah dikontrol (u) dengan demikian kesalahan pada aktuator dapat dikompensasi.

Persamaan kompensasi pada kesalahan aktuator adalah sebagai berikut :

$$u_m(k) = u(k) - \hat{f}_a(k) \quad (3.15)$$

Dengan $u_m(k)$ adalah nilai sinyal kendali dengan kesalahan, $u(k)$ adalah nilai sinyal kendali sebenarnya, dan $\hat{f}_a(k)$ adalah estimasi kesalahan pada aktuator. Skema rekonfigurasi kontrol ditunjukkan pada Gambar 3.5



Gambar 3. 6 Skema rekonfigurasi kontrol

3.5 Uji Performansi AFTC

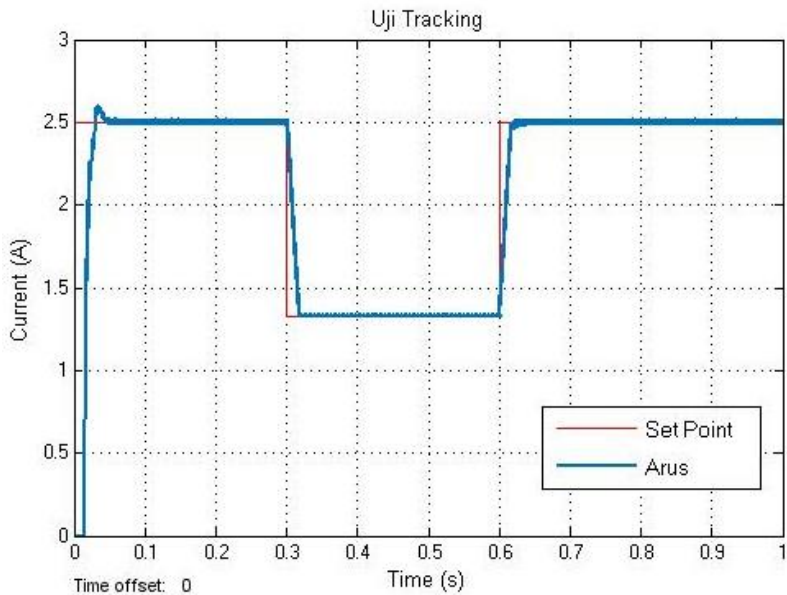
Untuk menguji apakah algoritma AFTC pada sistem ini telah berjalan dengan baik atau tidak, perlu dilakukan dengan uji perfromansi dari AFTC. Uji ini dilakukan dengan memberikan suatu kesalahan pada aktuator yaitu berupa kesalahan bias yang terjadi ketika aktuator *solid state relay* mengalami kerusakan berupa *open circuit damage*. Hasil respon perfromansi dari AFTC dibandingkan dengan respon tanpa AFTC.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Uji Tracking Kontroler pada simulasi

Nilai *gain* kontroler yang didapatkan dari metode *trial and error* ditunjukkan pada Tabel 3.2 diperlukan pengujian untuk mengetahui respon yang dihasilkan dari kontroler. Pengujian kontroler dilakukan untuk mengetahui respon dari *gain* kontroler dapat *tracking setpoint* saat terdapat perubahan *setpoint*. Berikut respon dari uji *tracking* controller :



Gambar 4. 1 Respon uji *tracking* kontroler pada simulasi

Gambar 4.1 menunjukkan dua grafik yaitu grafik berwarna hijau yang menunjukkan nilai *set point* yang diberikan masukan sebesar 2 ampere dan 1.33 ampere. Sedangkan grafik berwarna merah menunjukkan hasil respon kontroler. Hasil respon menunjukkan karakteristik respon nilai *maximum overshoot* sebesar 3%, *error steady state* sebesar 0% sedangkan nilai

settling time sebesar 0.043 detik. Dari grafik terlihat bahwa respon state *feedback* kontroler *regenerative braking system* dapat *tracking* mencapai nilai *set point* yang diinginkan dengan baik.

4.2 Uji Performansi Kesalahan Aktuator dengan simulasi

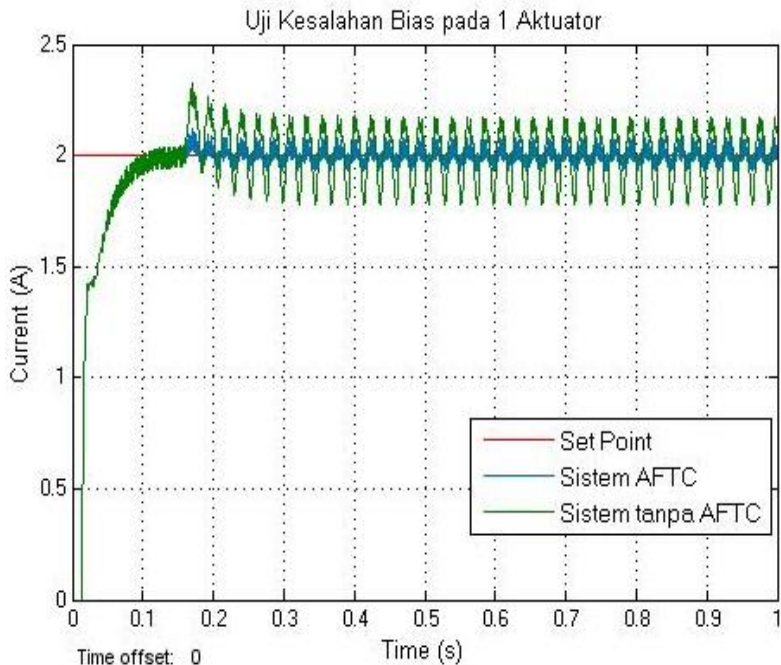
Uji performansi dilakukan untuk menguji algoritma *active fault tolerant control* yang telah dibuat dapat memperbaiki kesalahan yang terjadi pada aktuator. Uji secara simulasi dilakukan dengan memberikan kesalahan pada aktuator berupa kesalahan bias. Kesalahan bias merupakan penyimpangan nilai dari nilai tetapan yang telah ditentukan. Kesalahan bias pada sistem ini yaitu aktuator yang mengalami kerusakan berupa open circuit damage, sehingga nilai kesalahan bias secara simulasi pada aktuator diberikan sebesar 100% dari sinyal kendali. Uji performansi dilakukan secara simulasi dengan menggunakan perangkat lunak matlab R2014a untuk mengetahui apakah algoritma AFTC yang dirancang sudah mampu bekerja dengan baik.

4.2.1 Uji Kesalahan Bias pada 1 Aktuator

Sistem kontrol *regenerative braking system* diberikan kesalahan bias satu aktuator yaitu switch A pada detik ke 0.15 dari total waktu sampling yaitu 1 detik. Sehingga didapatkan respon sebagai berikut :

Tabel 4. 3 Performansi sistem dengan kesalahan bias 100% pada satu aktuator secara sismulasi

Parameter	Kontroller PI	
	AFTC	Tanpa AFTC
<i>Maximum Overshoot</i>	5,9%	16,37%
<i>Error Steady State</i>	3,9%	11,5%
<i>Settling Time</i>	0.173 s	0.3 s



Gambar 4. 2 Hasil perbandingan respon sistem AFTC dengan sistem tanpa AFTC dengan kesalahan bias 1 aktuator

Pada Gambar 4.2 respon sistem dengan AFTC yang ditunjukkan oleh grafik berwarna hijau dan sistem tanpa AFTC yang ditunjukkan grafik berwarna kuning, serta setpoint yang ditunjukkan grafik berwarna merah dengan nilai setpoint sebesar 2 ampere. Ketika kesalahan pada aktuator terjadi di detik ke 0.15, sistem dengan AFTC dan tanpa AFTC mengalami overshoot dan sistem dapat kembali mencapai nilai setpoint. Sistem dengan AFTC memiliki nilai overshoot 5,9% dengan nilai 2,1 ampere dan sistem tanpa AFTC memiliki nilai overshoot 16,37% dengan nilai 2,32 ampere. Untuk perbandingan nilai parameter settling time

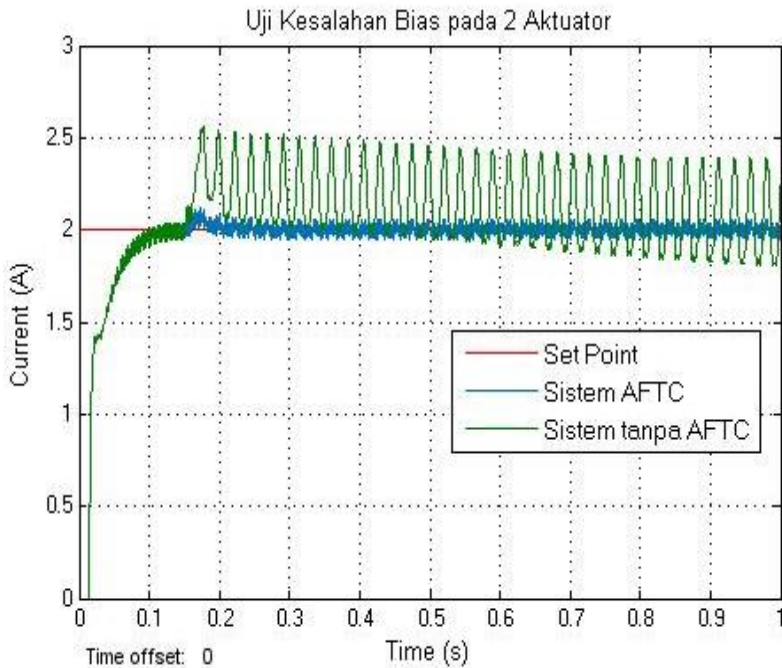
pada sistem AFTC dan non AFTC yaitu antara 0.3 dan 0.173. Sedangkan pada parameter error steady state , sistem dengan AFTC lebih baik dibanding sistem tanpa AFTC ditunjukkan dengan nilai 2% pada sistem AFTC dan nilai 8,2% pada sistem non AFTC. Hal tersebut menunjukkan bahwa ketika terjadi kesalahan bias pada 1 aktuator, kinerja *output regenerative braking system* dengan kontrol PI saja masih dapat menuju set point yang diinginkan dengan waktu lebih lama untuk menuju hasil yang stabil dan error yang besar. Sedangkan sistem dengan AFTC dapat menolerir kesalahan yang ada pada aktuator sehingga respon sistem menjadi lebih baik.

4.2.2 Uji Kesalahan Bias pada 2 Aktuator

Sistem kontrol *regenerative braking system* diberikan kesalahan bias pada dua aktuator yaitu masukan dari switch A dan switch B di detik ke 0.15 dari total waktu sampling yaitu 1 detik. Respon uji kesalahan bias pada 2 aktuator ditunjukkan seperti Gambar 4.3

Tabel 4. 4 Performansi sistem dengan kesalahan bias 100% pada dua aktuator secara simulasi

Parameter	Kontroller PI	
	AFTC	Tanpa AFTC
<i>Maximum Overshoot</i>	5,8%	27,9%
<i>Error Steady State</i>	3%	24,8%
<i>Settling Time</i>	0.175 s	0.7s



Gambar 4. 3 Hasil perbandingan respon sistem AFTC dengan sistem tanpa AFTC dengan kesalahan bias 2 aktuator

Pada Gambar 4.3 diketahui bahwa respon sistem dengan AFTC yang ditunjukkan oleh grafik berwarna hijau dan sistem tanpa AFTC yang ditunjukkan grafik berwarna kuning, serta setpoint yang ditunjukkan grafik berwarna merah dengan nilai setpoint sebesar 2 ampere. Ketika kesalahan pada dua aktuator terjadi di detik ke 0.15, sistem dengan AFTC dan tanpa AFTC mengalami overshoot yang berbeda. Sistem dengan AFTC memiliki nilai overshoot 5,9% dan sistem tanpa AFTC memiliki nilai overshoot 16,37%. Hal ini menyebabkan sistem tanpa AFTC mempunyai arus peak yang tinggi yaitu sebesar 2,5 Ampere. Untuk perbandingan nilai parameter settling time pada sistem

AFTC dan non AFTC yaitu antara 0.3 dan 0.173. Sedangkan pada parameter error steady state sistem dengan AFTC lebih baik dibanding sistem tanpa AFTC ditunjukkan dengan nilai 3% pada sistem AFTC dan nilai 24,8% pada sistem non AFTC. Hal tersebut menunjukkan bahwa ketika terjadi kesalahan bias pada 2 aktuator, kinerja *output regenerative braking system* tanpa AFTC memiliki respon yang dapat kembali menuju setpoint dengan error yang besar dan membutuhkan waktu yang lebih lama. Sedangkan sistem dengan AFTC dapat menolerir kesalahan yang ada pada aktuator sehingga respon sistem menjadi lebih baik.

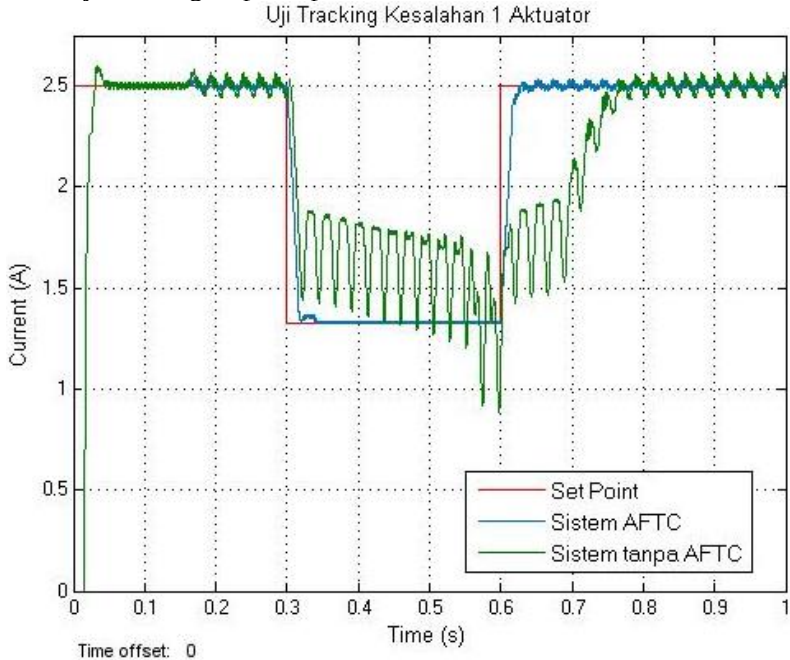
4.2.3 Uji Tracking Kesalahan aktuator

Pengujian tracking setpoint digunakan untuk melihat kemampuan dari sistem kontrol untuk melakukan kompensasi seiring dengan perubahan *setpoint*. *setpoint* dirubah pada detik 0,3 untuk setpoint turun menjadi 1,3 dan dirubah pada detik 0,6 dengan nilai set point naik menjadi 2,5. Pengujian ini diikuti dengan kesalahan aktuator berupa variasi jumlah kesalahan aktuator yaitu berupa kesalahan bias pada 1 aktuator dengan kesalahan bias pada 2 aktuator. Respon uji *tracking setpoint* kesalahan aktuator ditunjukkan pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5

Tabel 4. 5 Performansi sistem uji *tracking setpoint* pada kesalahan 1 aktuator

Parameter	Dengan AFTC		Tanpa AFTC	
	Naik	Turun	Naik	Turun
<i>Maximum Overshoot</i>	1,3%	2,26%	2,5%	40,8%
<i>Error Steady State</i>	0,6%	0,2%	1,45%	33,3%
<i>Settling Time</i>	0,075 s	0,02 s	0,23 s	0,23 s

a. Uji tracking setpoint pada kesalahan 1 aktuator

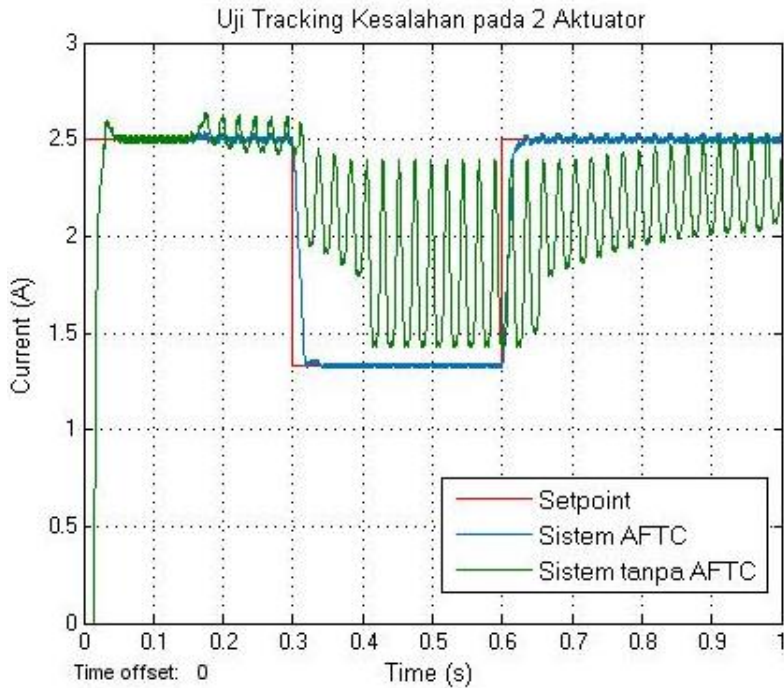


Gambar 4. 4 Respon uji *tracking setpoint* pada kesalahan 1 aktuator

Ketika sistem kontrol *regenerative braking system* diberikan kesalahan bias pada satu aktuator yaitu switch A memiliki karakteristik respon sistem yang ditunjukkan pada Tabel 4.3. Pada grafik turun respon sistem kontrol tanpa AFTC dapat mengikuti *tracking setpoint* yang diinginkan pada grafik turun dengan *error steady state*, *maximum overshoot* dan *settling time* yang besar. Akan tetapi pada grafik naik, sistem tanpa AFTC dapat mengikuti *tracking setpoint* yang diinginkan dengan nilai *maximum overshoot* dan *error steady state* yang rendah meskipun dengan *settling time* yang lama. Sedangkan pada sistem dengan AFTC memiliki respon *error steady state*, *maximum*

overshoot dan *settling time* yang rendah. Hal tersebut menunjukkan bahwa sistem dengan AFTC dapat menolerir kesalahan pada satu aktuator dengan mengikuti *tracking setpoint* yang diinginkan sehingga respon sistem menjadi lebih baik.

b. Uji tracking setpoint pada kesalahan 2 aktuator



Gambar 4. 5 Respon uji *tracking setpoint* pada kesalahan 2 aktuator

Tabel 4. 6 Performansi sistem uji *tracking setpoint* pada kesalahan 2 aktuator

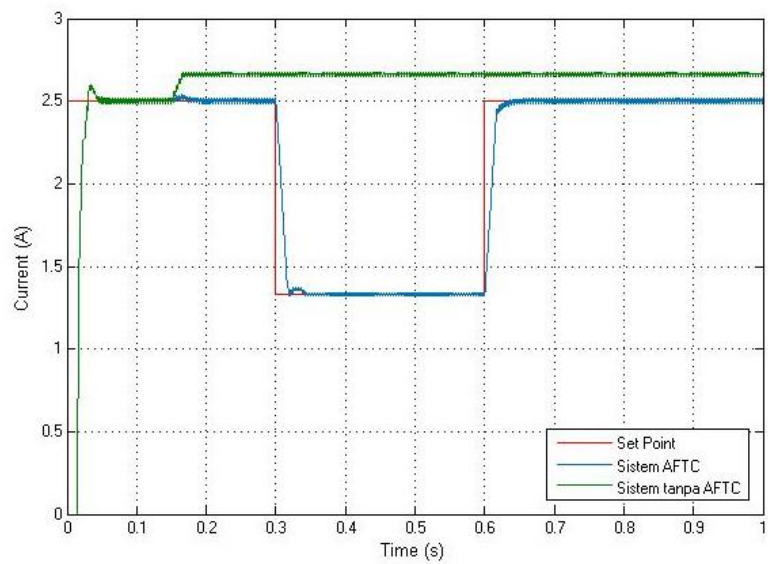
Parameter	Dengan AFTC		Tanpa AFTC	
	Naik	Turun	Naik	Turun
<i>Maximum Overshoot</i>	1,2%	1,1%	1,2%	94,8%
<i>Error Steady State</i>	1%	2%	20%	80,7%
<i>Settling Time</i>	0.060 s	0.05 s	0,2 s	0,15 s

Ketika sistem kontrol *regenerative braking system* diberikan kesalahan bias pada dua aktuator yaitu switch A dan switch B memiliki karakteristik respon sistem yang ditunjukkan pada Tabel 4.4. Hasil respon menunjukkan bahwa sistem kontrol *regenerative braking system* tanpa AFTC tidak dapat mengikuti *tracking setpoint* yang diinginkan dibuktikan dengan tidak terdapatnya nilai *settling time*. Begitupula dengan nilai *error steady state* yang mencapai nilai 80% pada grafik turun dan 20% pada grafik naik. Nilai *maximum overshoot* sistem tanpa AFTC pada grafik turun mencapai nilai 94,8% yang artinya nilai arus keluaran sistem mendekati 2 kali lipat dari nilai *setpoint* yang diinginkan. Sedangkan pada sistem kontrol *regenerative braking system* dengan AFTC dapat mengikuti *tracking setpoint* yang diinginkan dibuktikan dengan *error steady state*, *maximum overshoot* dan *settling time* yang kecil. Hal itu menunjukkan bahwa sistem AFTC dapat menolerir kesalahan pada satu aktuator dengan mengikuti *tracking setpoint* yang diinginkan sehingga respon sistem menjadi lebih baik.

c. Uji *tracking setpoint* pada kesalahan 3 aktuator

Pengujian ini dilakukan dengan memberikan kesalahan bias pada 3 aktuator dari tiap fasa A, B dan C. Perubahan *setpoint* diberikan pada detik ke 0.3 dengan nilai *setpoint* awal 2,5 menjadi 1,3 pada kurva turun. Sedangkan pada kurva naik diberikan perubahan nilai *setpoint* pada detik ke 0,6 dengan nilai

setpoint akhir sebesar 2,5. Berikut merupakan hasil respon sistem kontrol RBS dengan kesalahan pada 3 aktuator



Gambar 4. 6 Respon uji *tracking setpoint* pada kesalahan 3 aktuator

Tabel 4. 7 Performansi sistem uji *tracking setpoint* pada kesalahan 3 aktuator

Parameter	Dengan AFTC		Tanpa AFTC	
	Naik	Turun	Naik	Turun
<i>Maximum Overshoot</i>	0,6%	2.9%	7,1%	101,3%
<i>Error Steady State</i>	0.34%	0.3%	6,45%	100,6%
<i>Settling Time</i>	0.03 s	0.038 s	0.01 s	0.01 s

Hasil respon sistem kontrol RBS dengan kesalahan 3 aktuator yang ditunjukkan pada Gambar 4.6 menunjukkan perbedaan respon antara sistem dengan AFTC dan sistem tanpa

AFTC. Sesuai dengan karakteristik respon sistem menunjukkan bahwa sistem tanpa AFTC tidak dapat mengikuti *tracking setpoint* pada kurva naik maupun kurva turun. Hal tersebut dikarenakan pada sistem tanpa AFTC tidak dapat mengkompensasi kesalahan bias 100% pada ketiga aktuator sehingga seolah-olah sistem RBS tidak terkontrol dengan nilai arus keluran sistem konstan sebesar 2,6 ampere. Sedangkan pada sistem RBS dengan AFTC, respon sistem RBS dapat mengikuti *setpoint* dengan karakteristik yang baik. Hal tersebut dikarenakan pada sistem RBS dengan AFTC dapat mengkompensasi kesalahan yang terjadi dengan membandingkan nilai keluaran aktuator yang terdapat kesalahan dengan model estimator. Dari ketiga hasil uji perfomansi sistem RBS dengan kesalahan aktuator dapat diketahui bahwa sistem dengan AFTC dapat mengkompensasi kesalahan dari setiap variansi jumlah kesalahan aktuator.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data yang telah dilakukan didapatkan kesimpulan dari tugas akhir mengenai Perancangan Sistem Active Fault Tolerant Control (AFTC) pada Regenerative Braking System dengan Kesalahan pada Aktuator untuk Kendaraan Listrik adalah sebagai berikut :

1. Telah dilakukan perancangan algoritma AFTC berupa estimasi kesalahan dan menghasilkan *state* yang benar. Estimator aktuator mampu mengestimasi kesalahan yang terjadi pada aktuator dan AFTC mampu menjaga performansi sistem kontrol untuk tetap pada *set point*.
2. Sistem tanpa AFTC pada kesalahan aktuator secara simulasi mengalami *overshoot* sebesar 94,8%, *error steady state* sebesar 80,7% dan *settling time* 0,15 detik. Sedangkan pada sistem AFTC memiliki parameter *overshoot* sebesar 1,2%, *error steady state* sebesar 2% dan *settling time* sebesar 0,05 detik

5.2 Saran

Dari tugas akhir ini terdapat saran yang dapat digunakan untuk penelitian selanjutnya, yakni pengembangan algoritma AFTC dapat dilakukan secara *real time* pada *miniplant* dengan menggunakan berbagai macam penggunaan strategi kontrol .

”

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Maia, M. Silva, R. Araujo and U. Nunes, "Electrical Vehicle Modeling: A Fuzzy Logic Model for Regenerative Braking," *Expert Systems With Applications*, 2015.
- [2] A. A. Fahmi, M. Ashari and H. Suryoatmojo, "Sistem Pengereman Elektris Brushless DC Motor Menggunakan Bidirectional Inverter untuk Aplikasi Kendaraan Listrik," *Prosiding Seminar Tugas Akhir Teknik Elektro FTI-ITS*, 2013.
- [3] C. Pan and et all, "Research on motor rotational speed measurement in regenerative braking system of electric vehicle," *Mech. Syst. Signal Process*, 2015.
- [4] Y. Zhang and J. Jiang, "Bibliographical Review on Reconfigurable Fault-Tolerant," *Annual Reviews in Control* , 2008.
- [5] B. Das, S. Chakrabarti, P. R. Kasari and A. Chakraborti, "Novel Reverse Regeneration Technique of BLDC Motor for Capacitor Charging," *International Conference on Control, Instrumentation, Energy & Communication*, 2014.
- [6] S. Dudhe and A. G. Thosar, "MATHEMATICAL MODELLING AND SIMULATION OF THREE PHASE BLDC MOTOR USING MATLAB/SIMULINK," *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, vol. 7, no. 5, pp. 1426-1433, 2014.
- [7] J.-p. Wen and C.-w. Zhang, "Research on Modeling and Control of Regenerative Braking for Brushless DC Machines Driven Electric Vehicles," pp. 1-6, 2015.

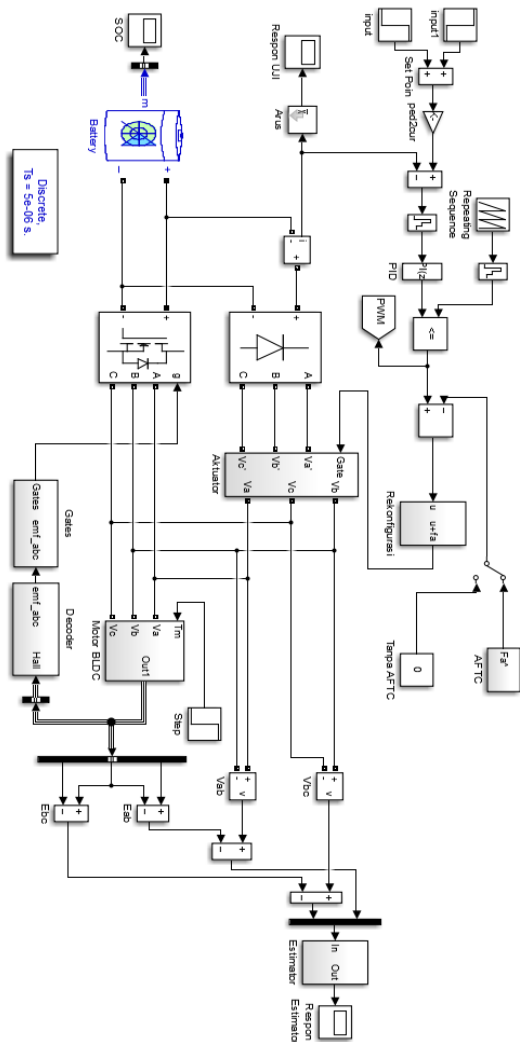
- [8] A. Bradley, Solid State Relay Application Guide, Rockwell Automation, 2002.
- [9] Katsuhiko, Ogata;, Modern Control Engineering, New Delhi: Prentice-Hall, 1981.
- [10] T. A. A. J. Katherin I, "Robust Observer-Based Fault Tolerant Tracking Control for Linier Systems with Simultanes Actuator and Sensor Faults:Application to a DC Motor System," *International Review on Modelling Simulations*, p. Vol 8 N 4, 2015.
- [11] A. D. Arigi and K. Idriawati, "Perancangan Active Fault Tolerant Control (AFTC) Pada Anti-Lock Braking System (ABS) Mobil Listrik Dengan Kesalahan Pada Aktuator," *Proseding Seminar Tugas Akhir Teknik Fisika FTI-ITS*, 2017.
- [12] G. Chen, "System analysis using redundancy of descriptor representation," *IEEE*, pp. 231-236, 2004.
- [13] V. Andrean, "Rancang Bangun Sistem Pengereman Regeneratif Brushless Dc Motor Menggunakan Bidirectional Voltage Source Inverter (VSI)," 2016.
- [14] C. S. Joice, S. R. Paranjothi and V. J. S. Kumar, "Digital Control Strategy for Four Quadrant Operation of Three Phase BLDC Motor With Load Variations," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS*, vol. 9, p. 2, 2013.
- [15] T. S. Khadse and S. P. Karmore, "A Novel Approach for Fault Tolerant Control System and Embedded System Security," *International Conference on Information Security & Privacy* , 2015.
- [16] M. Akhila and P. Ratnan, "Analysis of Regenerative Braking In Brushless DC Motor Drive Using Adaptive Neuro Based Fuzzy Inference System," *International*

- Journal of Science and Research (IJSR)*, vol. IV, 2015.
- [17] A. Tashakori, M. Ektesabi and N. Hosseinzadeh, "Modeling of BLDC Motor with Ideal BackEMF for Automotive Applications," *Proceedings of the World Congress on Engineering*, vol. II, 2011.

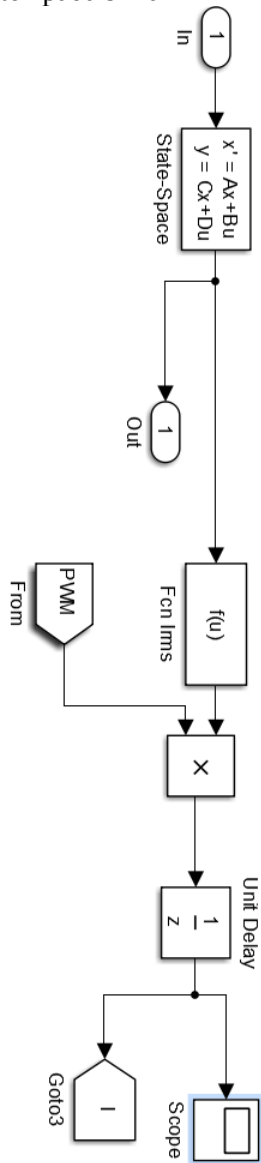
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN

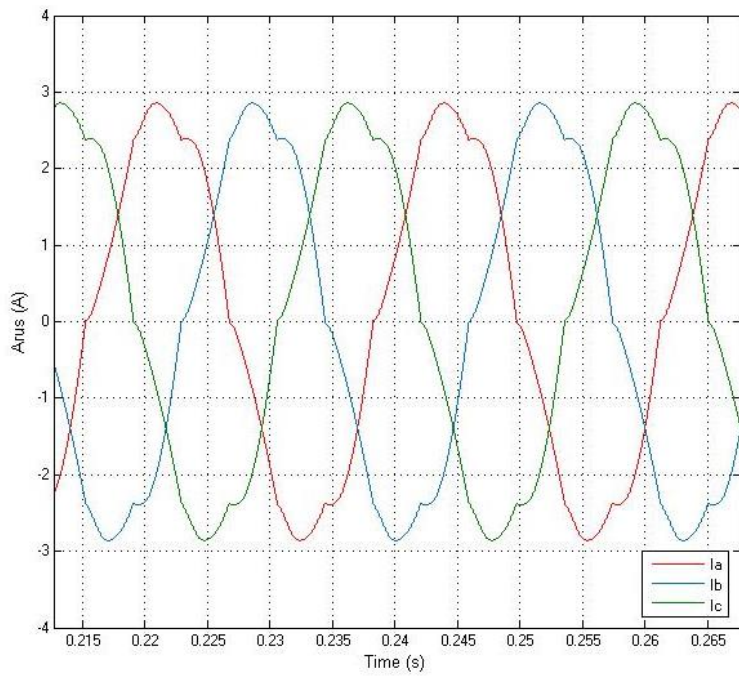
- a. Desain sistem AFTC pada RBS dengan simulink



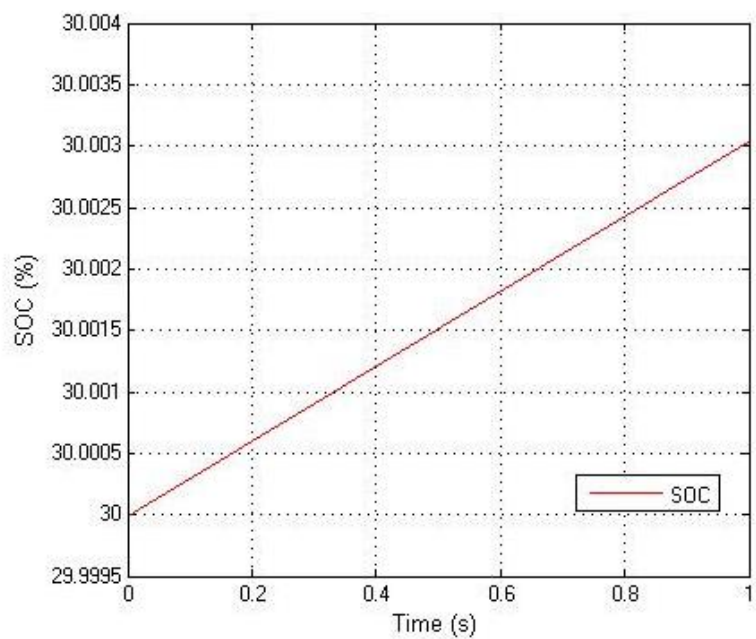
b. *Estimator* pada simulink



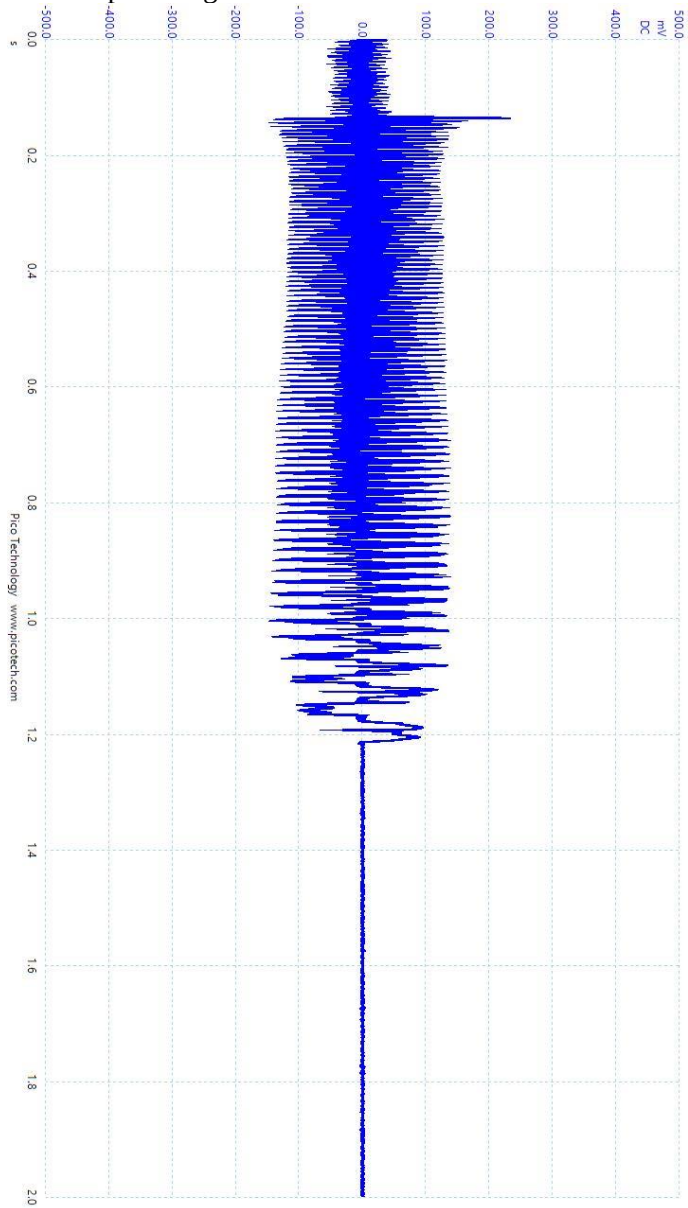
c. *Respon Estimator*



d. Respon *State of Charge (SOC)*



e. Respon Pengukuran arus RBS



f. m-file

```
lap=get(0,'ShowHiddenHandles');
set(0,'ShowHiddenHandles','On');
set(gcf,'menubar','figure');
set(gcf,'CloseRequestFcn','closereq');
set(gcf,'DefaultLineClipping','Off');
set(0,'ShowHiddenHandles',lap)

A=[-338.235294117647,0;0,-338.235294117647];

B=[78.4313725490196,39.2156862745098;-
   39.2156862745098,39.2156862745098];

C=[0.333418814239898,0;0,0.333418814239898;-
   0.333418814239898,-0.333418814239898];

D=[0,0;0,0;0,0];

L=[0.008500000000000000];
R=[2.875000000000000];
Ts=[5.000000000000000e-06];
sys=ss(A,B,C,D);

tf(sys)
x=ss2tf(A,B,C,D,1);
h1 = tf([26.15],[1 338.2]);
h2 = tf([-13.08],[1 338.2]);
h3 = tf([-13.08 -4423],[1 676.5 1.144e05]);
h4 = tf([13.08],[1 338.2]);
h5 = tf([13.08],[1 338.2]);
h6 = tf([-26.15 -8845],[1 676.5 1.144e05]);
rlocus(h1,h2,h3,h4,h5,h6)
```

BIODATA PENULIS



Naufal Nugrahandhita lahir di Surabaya, Jawa Timur pada tanggal 20 Juli 1996. Merupakan anak bungsu dari 3 bersaudara pasangan Bapak Budi Hari Djaja dan Ibu Anita Karyani. Setelah lulus dari SMAN 1 Malang tahun 2014 kemudian melanjutkan studinya di departemen Teknik Fisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN) . Bidang minat yang diambil penulis pada saat menempuh perkuliahan adalah bidang Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif pada bidang organisasi kemahasiswaan, yaitu Himpunan Mahasiswa Teknik Fisika (HMTF ITS) pada bidang Hubungan Luar. Penulis dapat dihubungi melalui alamat email naufaldhita@gmail.com