



TUGAS AKHIR - TF 141581

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

IRVANDHI HITO HAGESHI
NRP. 02311440000025

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 SENSOR FAULT FOR
ELECTRICAL VEHICLES***

IRVANDHI HITO HAGESHI
NRP. 02311440000025

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 : Irvandhi Hito Hageshi
NRP : 02311440000025
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 Sensor 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, 24 April 2018
Yang membuat pernyataan,



Irvandhi Hito Hageshi
NRP. 02311440000025

Halaman ini sengaja dikosongkan

**LEMBAR PENGESAHAN I
TUGAS AKHIR**

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

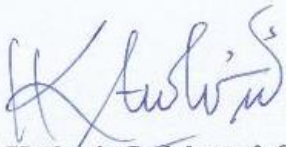
Oleh:

Irvandhi Hito Hageshi
NRP. 02311440000025

Surabaya, 24 April 2018

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 Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.
NIPN. 19780902 200312 1 002

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

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

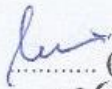
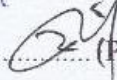
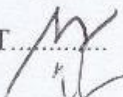
TUGAS AKHIR

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

Oleh:

IRVANDHI HITO HAGESHI
NRP. 02311440000025

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, S.T., M.T. |  | (Penguji I) |
| 4. Ir. Ya'umar, M.T. |  | (Penguji II) |
| 5. Arief Abdurrahman, S.T., M.T. |  | (Penguji III) |

SURABAYA
APRIL, 2018

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

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

Nama : Irvandhi Hito Hageshi
NRP : 02311440000025
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.

ABSTRAK

Regenerative braking system adalah sebuah metode pengereman yang menggunakan energi mekanik dari motor dimana energi mekanik dan energi kinetik akan diubah menjadi energi listrik yang dikembalikan ke baterai. *Regenerative braking system* terdiri dari beberapa komponen salah satunya adalah sensor arus. Kesalahan pada sensor dapat menyebabkan kerusakan pada baterai akibat arus yang besar. Tugas akhir ini merancang sebuah sistem yang dapat mentoleransi kesalahan pada sensor. Sistem ini disebut dengan *Active Fault Tolerant Control* (AFTC). Sistem dirancang dan disimulasikan dengan software. Untuk membuat sistem tersebut, dimulai dari pemodelan motor BLDC yang kemudian merancang sistem kontrol PI dengan menggunakan metode *trial and error*. Setelah didapat kontrol yang bagus, dirancang sistem AFTC dengan cara membuat *softsensor* yang digunakan untuk merekonfigurasi sinyal *kontroller*. Untuk menguji performa AFTC yang telah dirancang, maka diberikan kesalahan pada sensor berupa kesalahan bias dan kesalahan sensitifitas. Dari perancangan AFTC yang telah dibuat, didapatkan respon yang lebih baik dengan menggunakan AFTC pada saat sensor mengalami kesalahan berupa kesalahan bias dan kesalahan sensitifitas dengan kesalahan masing – masing sebesar 30%, 60%, dan 100%.

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

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

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

Name : Irvandhi Hito Hageshi
NRP : 02311440000025
Department : Teknik Fisika FTI-ITS
Supervisors : Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.

ABSTRACT

Regenerative braking system is a braking method that uses the mechanical energy of the motor where the mechanical energy and energy will be converted into electrical energy that will be the battery. The regenerative braking system consists of several components one of which is a current sensor. Sensor errors can cause damage to battery. This final project is a system that can tolerant errors in the sensor. This system is called Active Fault Tolerant Control (AFTC). Systems are designed and balanced with software. To make the system, starting from BLDC motor modeling which then using PI control system by using trial and error method. After good control, AFTC system is designed by making softsensor used to reconfigur controller signal. For AFTC performance that has been designed, then the error on the sensor in the form bias error and sensitivity error. From AFTC designers that have been made, a better response is obtained by using AFTC when the sensor experiences bias error and sensitivity error of 30%, 60%, and 100% respectively.

Keywords: *Regenerative Braking System, Sensor, 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 SISTEM ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL (AFTC) PADA REGENERATIVE BRAKING SYSTEM DENGAN KESALAHAN PADA SENSOR 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 Kepala 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. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan dalam pengerjaan tugas akhir ini.
3. Bapak Totok Ruki Biyanto, S.T., M.T., Ph.D selaku Kepala Laboratorium Rekayasa Instrumensi yang telah memberikan ilmu, petunjuk, dan kemudahan perizinan.
4. Bapak Ir. Ronny Dwi Noriyati, M.Kes selaku dosen wali yang telah membimbing penulis selama perkuliahan dan memberikan ilmu serta nasihat yang sangat bermanfaat.
5. Seluruh dosen Teknik Fisika ITS atas segala ilmu, bimbingan, petunjuk, dan nasihat yang sangat bermanfaat.
6. Keluarga, atas segala doa, perhatian, serta dukungan moril dan materiil yang telah diberikan.
7. Seluruh teman seperjuangan dalam tugas akhir, yaitu terima kasih untuk semuanya.
8. Naufal dan Fifi yang telah memberikan bantuan serta semangat bagi penulis untuk menyelesaikan tugas akhir ini.

9. Seluruh teman–teman Departemen Teknik Fisika ITS angkatan 2014, terima kasih untuk semuanya.
10. Seluruh karyawan dan civitas akademika Teknik Fisika ITS, terima kasih atas segala bantuan dan kerjasamanya.
11. 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, 24 April 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
COVER PAGE	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME	v
LEMBAR PENGESAHAN I	vii
LEMBAR PENGESAHAN II	ix
ABSTRAK	xi
<i>ABSTRACT</i>	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 <i>Regenerative Braking System</i>	5
2.2 <i>Brushless Direct Current (BLDC) Motor</i>	5
2.3 Sensor Arus	7
2.4 Kontrol PI.....	9
2.5 <i>Active Fault Tolerant Control System (AFTCS)</i> ...	10
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	13
3.1 Pemodelan <i>Regenerative Braking System</i>	15
3.2 Perancangan <i>Controller</i>	19
3.3 Perancangan Active Fault Tolerant Control (AFTC).....	20
3.4 Uji Performansi AFTC	22
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	23
4.1 Hasil Uji Sistem <i>Close loop</i>	23

4.2	Hasil Uji Estimasi Softsensor.....	24
4.3	Uji Performansi Kesalahan Sensor.....	25
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		37
5.1	Kesimpulan	37
5.2	Saran.....	38
DAFTAR PUSTAKA.....		39
LAMPIRAN		
BIODATA PENULIS		

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Rangkaian motor BLDC	6
Gambar 2. 2	Sensor Arus	8
Gambar 2. 3	Blok Diagram PI Controller	9
Gambar 2. 4	Struktur umum sistem AFTC	12
Gambar 3. 1	Diagram Alir Penelitian Tugas Akhir	14
Gambar 3. 2	Model matematis dari motor BLDC	15
Gambar 3. 3	Diagram Blok Sistem Pengendalian Arus pada <i>Regenerative Braking System</i>	19
Gambar 3. 4	Skema Rekonfigurasi Kontrol.....	22
Gambar 4. 1	Hasil Uji Sistem <i>Close loop</i>	23
Gambar 4. 2	Hasil Uji Estimasi <i>Softsensor</i>	24
Gambar 4. 3	Hasil Uji Respon dengan kesalahan bias 30 %	26
Gambar 4. 4	Hasil Uji Respon dengan kesalahan bias 60 %	27
Gambar 4. 5	Hasil Uji Respon dengan kesalahan bias 100 % ...	29
Gambar 4. 6	Hasil Uji Respon dengan kesalahan sensitifitas 30%, 60 %, dan 100 %	31
Gambar 4. 7	Hasil Uji Respon dengan kesalahan sensitifitas 30%	32
Gambar 4. 8	Hasil Uji Respon dengan kesalahan sensitifitas 60%	34
Gambar 4. 9	Hasil Uji Respon dengan kesalahan sensitifitas 100%	35

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Table 3. 1 Parameter Motor BLDC	18
Tabel 4. 1 Performansi sistem dengan kesalahan bias 30%.....	25
Tabel 4. 2 Performansi sistem dengan kesalahan bias 60 %.....	27
Tabel 4. 3 Performansi sistem dengan kesalahan bias 100 %.....	28
Tabel 4. 4 Performansi sistem dengan kesalahan sensitifitas 30%, 60%, dan 100%	30
Tabel 4. 5 Performansi sistem dengan kesalahan sensitifitas 30%	32
Tabel 4. 6 Performansi sistem dengan kesalahan sensitifitas 60%	33
Tabel 4. 7 Performansi sistem dengan kesalahan sensitifitas 100%	34

“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	= <i>back electromagnetic force</i> (EMF) pada fasa A, volt
e_c	= <i>back electromagnetic force</i> (EMF) pada fasa A, volt
M	= mutual induktansi dari sator
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 $x(t)$
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>)
I_m	= arus hasil pengukuran
I	= arus tanpa kesalahan
f_s	= kesalahan sensor
$\hat{f}_s$	= estimasi kesalahan pada sensor

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan kendaraan dengan menggunakan motor bakar dalam (*internal combustion engine*) merupakan salah satu prestasi terbesar dalam teknologi moderen khususnya dibidang otomotif. Kendaraan telah memberikan kontribusi yang sangat besar dalam peradaban masyarakat. Hal ini mendorong industri – industri yang bergerak dibidang penyediaan kendaraan untuk membuat kendaraan yang sesuai dengan kebutuhan masyarakat. Namun penggunaan kendaraan yang sangat banyak dapat menimbulkan *global warming*, dan bahan bakar yang semakin lama semakin menipis. Masalah – masalah tersebut mendorong berbagai kalangan untuk membuat kendaraan yang aman, nyama, ramah lingkungan serta efisien salah satunya adalah mulai banyak riset dan pengembangan yang dilakukan pada kendaraan listrik [1].

Sebuah kendaraan didalamnya terdapat berbagai sistem yang sangat penting bagi pengoperasian kendaraan tersebut. Salah satu sistem yang penting pada kendaraan adalah sistem pengereman. Sistem pengereman yang umum digunakan pada kendaraan adalah dengan pengereman hidrolik dimana energi kinetik diubah menjadi energi panas akibat adanya gesekan yang terjadi [2]. Namun hal ini sangatlah tidak efisien digunakan pada kendaraan listrik sehingga mulai dikembangkan sistem pengereman yang disebut *Regenerative Braking System* (RBS). RBS digunakan untuk mengubah energi kinetik yang terbuang pada saat pengereman menjadi energi listrik yang dapat digunakan untuk pengisian baterai kendaraan listrik dan akan memperlambat kecepatan mobil tersebut [3]. RBS terdiri dari beberapa komponen yang saling mendukung agar sistem tersebut dapat berjalan dengan baik salah satunya adalah sensor yang berupa sensor arus.

Sensor merupakan perangkat penting dalam sistem kontrol yang dapat mensesnsing besaran fisik menjadi besaran fisik lainnya yang dapat diukur [4]. Kesalahan – kesalahan yang terjadi pada sensor akan mengakibatkan sistem yang berjalan tidak

bekerja dengan baik bahkan dapat membahayakan pengguna dari sistem tersebut. Untuk itu diperlukan suatu sistem kendali yang mampu mentoleransi kesalahan yang terjadi pada sensor.

Sistem kendali yang mampu menoleransi gangguan berupa kesalahan pada komponen secara otomatis disebut *Fault Tolerance Control System* (FTCS). FTCS dapat diklasifikasikan dalam 2 tipe yaitu *Active Fault Tolerance Control System* (AFTCS) dan *Passive Fault Tolerance Control System* (PFTCS) [5]. AFTCS terdiri dari 2 tahapan yaitu *Fault Detection and Identification* (FDI) dan *Reconfigurable Control*. FDI digunakan untuk mendeteksi kesalahan pada sistem dan memperkirakan besar dan lokasi kesalahan dari sistem. Sedangkan *reconfigurable control* digunakan untuk mengkompensasi sinyal kendali secara otomatis sehingga sistem tetap stabil [6]. Oleh karena itu pada penelitian ini akan dibuat sistem AFTC RBS pada saat terjadi kesalahan pada sensor.

Tugas akhir ini dilakukan penelitian mengenai rancang bangun RBS yang toleran terhadap kesalahan pada sensor dengan menggunakan metode *Active Fault Tolerant Control System* (AFTCS).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan diatas, maka didapatkan permasalahan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

- Bagaimana merancang *active fault tolerant control system* untuk kesalahan yang terjadi pada sensor pada sistem *regenerative braking system* ?
- Bagaimana performansi dari *regenerative braking system* dengan menggunakan *active fault tolerant control system* setelah diberikan kesalahan pada sensor berupa kesalahan bias dan kesalahan sensitivitas ?

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

- Merancang *active fault tolerant control system* untuk kesalahan yang terjadi pada sensor pada sistem *regenerative braking system*
- Meningkatkan performansi dari *regenerative braking system* dengan menggunakan *active fault tolerant control system* setelah diberikan kesalahan pada sensor berupa kesalahan bias dan kesalahan sensitivitas

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

- Motor yang digunakan adalah tipe *Brushless Direct Current* (BLDC).
- Algoritma kontrol yang diterapkan adalah PI
- Variabel yang dikontrol berupa arus motor BLDC
- Kesalahan yang digunakan adalah kesalahan pada sensor
- Kesalahan yang terjadi pada sensor adalah kesalahan bias dan kesalahan sensitivitas
- AFTC disimulasikan dengan menggunakan software
- Torsi pada saat terjadi *regenerative braking* konstant

1.5 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir adalah sebagai berikut:

- BAB I PENDAHULUAN
Pada bab I ini terdiri dari latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah, dan sistematika laporan.
- BAB II TEORI PENUNJANG
Pada bab II ini dibahas mengenai teori-teori yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan, seperti teori dari *regenerative braking system*, Pemodelan *Brushless Direct Current* (BLDC) Motor, PID Control, Sistem *Fault Tolerant Control System* (FTCS),

- **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Pada bab III ini berisi mengenai rancangan dari penelitian yang dilakukan, metode, dan langkah-langkah dalam penelitian.

- **BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN**

Pada bab IV ini berisi tentang analisis hasil uji controller, hasil uji softsensor, dan hasil perancangan sistem *active fault tolerant control* yang diberikan kesalahan berupa kesalahan bias dan kesalahan sensitivitas .

- **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 *Regenerative Braking System*

Regenerative brakign system adalah sebuah metode pengereman yang menggunakan energi mekanik dari motor dan mengubah energi kinetik menjadi energi listrik yang dikembalikan ke baterai. Pada saat *regenerativ braking* terjadi, motor akan menyebabkan kendaraan melambat. Pada saat terjadi pengereman, kendaraan akan melambat dan motor akan bekerja secara *reverse*. Ketika motor bergerak dengan arah yang salah (*reverse*), motor akan bekerja sebagai generator dan listrik yang dihasilkan akan masuk kedalam inverter sebelum digunakan sebagai pengisian baterai [7] .

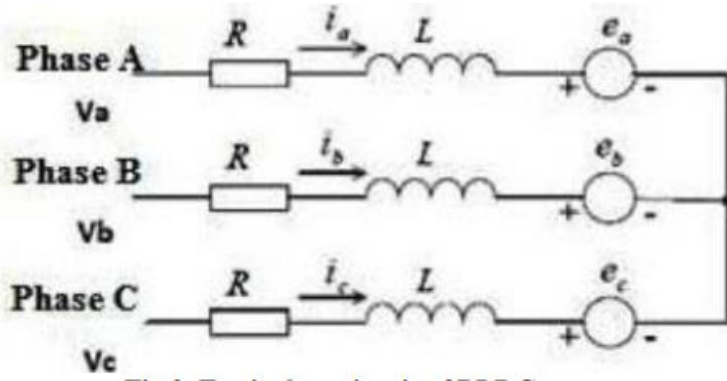
Pada saat motor mendapat supply dari baterai, motor akan berputar maju (*forward*) sehingga daya dari baterai akan berkurang. Pada saat motor menghasilkan listrik (sebagai generator), motor akan berputar mundur (*revers*) sehingga akan memperlambat putaran motor. Hal tersebut disebabkan oleh adanya tegangan balik pada motor atau dikenal dengan *back EMF* (*electromagnetic force*). Untuk menghindari kerusakan pada baterai akibat adanya *back EMF*, maka diperlukan pengendalian pada proses pengereman *regenerative* [8]. Besarnya arus balik/arus pengereman ini dapat dikendalikan dengan menggunakan mode pensaklaran dengan *pulse width modulation* (PWM). PWM berfungsi sebagai pengatur *level* dari pengereman regeneratif dengan variansi *duty cycle* dari sinyal PWM tersebut.

Regenerative braking system menggunakan berbagai macam sensor salah satu sensor yang digunakan adalah sensor arus dan aktuator yang berupa *solid state relay* (SSR).

2.2 *Brushless Direct Current (BLDC) Motor*

Suatu sistem terdiri dari bermacam-macam komponen yang saling berhubungan dalam menjalankan suatu aksi untuk mencapai tujuan yang diinginkan. Motor BLDC termasuk dalam sistem yang terdiri dari komponen elektronik dan mekanik.

Untuk dapat membangun suatu sistem kendali diperlukan suatu kemampuan untuk memodelkan secara matematika dari sistem yang akan dikendalikan. Model matematika dari suatu sistem dapat berupa persamaan diferensial, fungsi alih atau persamaan ruang dan keadaan atau yang biasa disebut *state space* [9].



Gambar 2. 1 Rangkaian motor BLDC [10]

Motor BLDC memiliki magnet permanen pada *rotor* dan kumparan 3 fasa di *stator*nya seperti pada gambar 2.1. 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

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

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

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

Dimana V_a, V_b, V_c adalah tegangan tiap fasa; i_a, i_b, i_c adalah arus tiap fasa; R, L, M adalah hambatan, induktansi, mutual induktansi dari *stator* dan e_a, e_b, e_c adalah back

electromagnetic force (EMF) dari tiap fasanya. 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 = inertia *rotor*

T_l = torsi beban

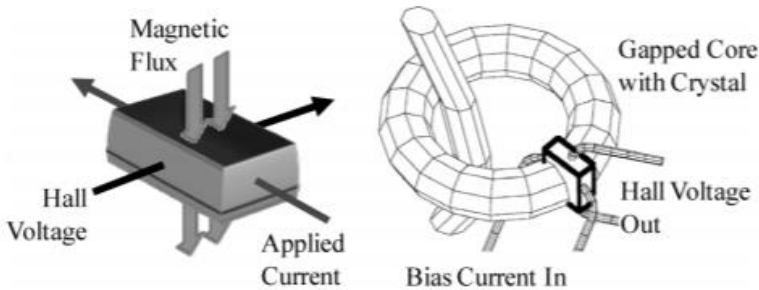
ω_m = Kecepatan sudut

B = konstanta *damping*

2.3 Sensor Arus

Sensor arus merupakan salah satu sensor yang memiliki prinsip kerja dengan menggunakan efek hall atau yang lebih dikenal dengan *hall effect*. *Hall effect* merupakan suatu sifat pada konduktor tertentu yang merupakan efek dari adanya medan magnet disekitarnya. Tegangan potensial atau yang disebut dengan Tegangan hall (V_H) muncul pada konduktor ketika terdapat medan magnet yang memiliki sudut yang sama dengan arus listrik Arah yang dimiliki tegak lurus terhadap medan magnet dan arus listrik.

Sedangkan besar dari V_H sebanding dengan kerapatan fluks magnetik dan arus [11]



Gambar 2. 2 Sensor Arus [11]

Medan magnet yang ada menyebabkan gradient dari konsentrasi carriers yang ada melintasi konduktor. Besarnya carriers yang ada pada sisi konduktor yang satu yang dibandingkan dengan sisi konduktor yang lainnya menyebabkan terjadinya perbedaan tegangan. Biasanya, Kristal ferit disekitar arus yang terdapat pada konduktor digunakan untuk memusatkan medan magnet dari arus yang ada disekitar sensor. Arus bias yang ada pada sensor dan tegangan hall yang terukur sebanding dengan arus yang terdapat pada konduktor utama.

Sensor Arus memiliki berbagai tipe diantaranya yang sering digunakan pada saat ini adalah sensor arus tipe ACS dan tipe trafo arus. Keduanya memiliki kelebihan serta kekurangan masing – masing diantaranya adalah sensor arus dengan tipe ACS lebih linier dari pada trafo arus namun sensor dengan tipe ACS lebih besar kemungkinan untuk terjadinya loss yang disebabkan karena kesalahan pada saat pemasangan sensor dimana sensor tersebut harus diseri dengan kabel.

Kesalahan yang terjadi pada sensor arus dapat disebabkan berbagai hal diantaranya adalah :

- Adanya kerusakan didalam konduktor dari sensor arus.hal ini data disebabkan karena adanya degradari pada

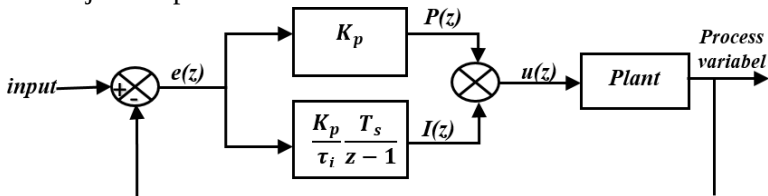
semikonduktor (retakan, korosi). Atau pun kerusakan dari ini dapat mengakibatkan terjadinya bias pada sensor

- Variasi suhu yang ada disekitar sensor dapat menyebabkan perubahan dari inti ferit yang dapat menghasilkan penurunan atau peningkatan induksi magnet.
- Adanya perubahan tegangan supply yang diberikan pada sensor sehingga sensitivitas dari sensor tersebut dapat berkurang.
- Perubahan posisi penempatan dari sensor yang menyebabkan induksi medan magnet berubah – ubah dapat menyebabkan tegangan hall yang dihasilkan berubah – ubah.

2.4 Kontrol PI

Propotional – Integral – Derivativ (PID) Control merupakan algoritma pendekatan yang paling populer untuk pengendalian proses di industri meskipun algoritma kontrol semakin lama semakin berkembang. Hal ini tidak hanya karena strukturnya yang sederhana melainkan juga karena secara konseptual mudah dipahami dan diimplementasikan dalam prakteknya. Sebuah kontrol PID menghitung nilai kesalahan sebagai perbedaan antara variabel proses terukur dan set point yang diinginkan [11] .

Pengendali PI merupakan penggabungan antara dua macam pengendali, yaitu P (*Propotional*) dan I (*Integral*). Pengendali PI merupakan jenis pengendali untuk menentukan suatu kestabilan atau kepresisian sistem instrumentasi dengan adanya *feedback* atau umpan balik pada sistem tersebut. Diagram blok sistem pengendali PI ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Blok Diagram PI Controller [11]

Pengendali P berfungsi untuk mempercepat *rise time* agar respon sistem lebih cepat untuk mencapai *setpoint*, akan tetapi pengendali ini mempunyai kekurangan yaitu meningkatkan *offset*. persamaan pengendali P adalah sebagai berikut:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (2.7)$$

dengan :

$u(t)$: pengendali P

$e(t)$: sinyal *error* yang merupakan selisih antara *setpoint* dan keluaran proses

K_p : *gain* proportional

Kelemahan dari pengendali P dihilangkan dengan cara menggabungkan dengan pengendali I, selain untuk menghilangkan *offset*, kendali ini mampu mengurangi terjadinya *maksimum overshoot* yang terlalu besar, tetapi kendali jenis I menyebabkan lambatnya respon sistem, yang ditutupi oleh pengendali P. Persamaan pengendali I adalah sebagai berikut :

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.8)$$

Sehingga kendali PI menghasilkan respon yang lebih cepat dari pengendali I tapi mampu menghilangkan *offset* yang ditinggalkan pengendali P.

Persamaan pengendali PI adalah sebagai berikut :

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.9)$$

2.5 Active Fault Tolerant Control System (AFTCS)

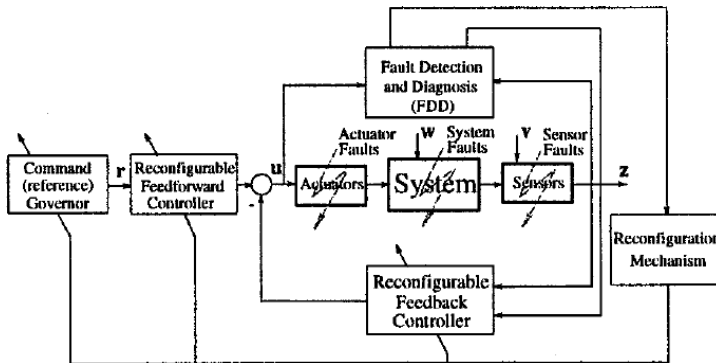
Peningkatan performansi dan keamanan (*safety*) sangat dibutuhkan suatu sistem yang sangat canggih. Desain sistem pengendalian umpan balik (*feedback control design*) dapat mengakibatkan performa buruk atau terkadang kestabilan yang kurang baik yang disebabkan karena kerusakan pada aktuatur, sensor, ataupun komponen penyusun sistem tersebut. Kegagalan

yang diakibatkan oleh komponen pada sistem tersebut dapat mengakibatkan kerusakan pada sistem tersebut. Untuk mengatasi kerusakan tersebut telah dilakukan penelitian terkait dengan desain sistem pengendalian yang mampu memberikan toleransi terhadap kerusakan yang terjadi dengan tetap menjaga stabilitas sistem yang diinginkan. *Fault Tolerant Control* (FTC) adalah sebuah sistem pengendalian control yang prosesnya mampu mengakomodasi kegagalan secara otomatis untuk me-*maintenance* kestabilan dan kinerja saat terjadi kegagalan (*failure*). FTC juga merupakan sistem pengendalian yang mampu mentoleransi kesalahan dalam suatu sistem untuk meningkatkan kehandalan dan kinerja yang diinginkan. Sistem pengendalian ini sering disebut dengan *Fault Tolerant Control System* (FTCS).

FTCS dapat diklasifikasikan pada dua tipe, yaitu *passive fault tolerant control system* (AFTCS) dan *active fault tolerant control system* (PFTCS). PFCTS didesain untuk menjadi sistem pengendalian yang *robust* dari kesalahan suatu komponen sedangkan, AFTCS bereaksi terhadap kesalahan yang terjadi pada suatu komponen dengan merekonfigurasi aksi pengendali sehingga kestabilan dan kinerja pada sistem dapat dijaga. Perbedaan sistem AFTC dan PFTC terletak pada perancangan *Reconfigurable Control* (RC) dan *fault detection and diagnosis* (FDD).

Active Fault Tolerant Control secara umum terdiri atas 4 sub sistem, yaitu:

- a. *Reconfigurable Control* (RC)
- b. *Fault Detection Diagnosis* (FDD) *Scheme*
- c. *Reconfiguration Mechanism*

d. *Command reference governor.*

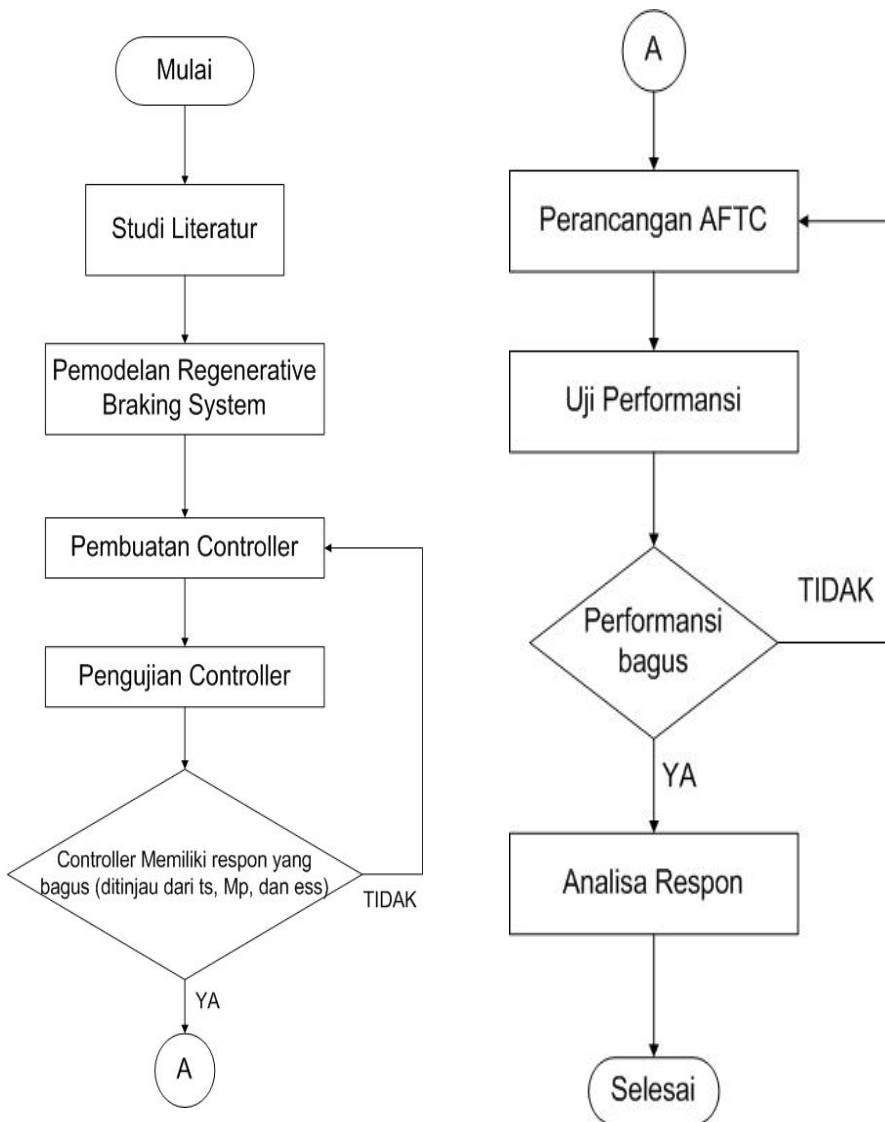
Gambar 2. 4 Struktur umum sistem AFTC [5]

Struktur umum dari AFTC dapat dilihat pada gambar 2.3. Berdasarkan Gambar 2.4 diketahui skema FDD diperlukan untuk mengestimasi state yang tidak terukur seperti kesalahan yang terjadi pada sistem, sehingga diharapkan FDD memiliki sensitivitas yang tinggi terhadap kesalahan, kemudian terdapat mekanisme pengaturan ulang (*Reconfigurable Controller*) yang sebisa mungkin mampu memulihkan performansi sistem setelah terjadi kesalahan walaupun terdapat ketidakpastian dan *time delay* pada FDI. *Reconfigurable control* harus dapat bekerja secara otomatis untuk menjaga stabilitas dan performansi yang diinginkan. *Reconfiguration mechanism* digunakan untuk memperbaiki ulang kesalahan awal pada performansi sistem dan untuk menghindari atau mempertimbangkan akan terjadinya penurunan performansi setelah terjadinya kesalahan. Pada intinya, perancangan sistem yang paling penting dalam AFTC terdiri atas 2 sub sistem yaitu *fault detection and identification* (FDI) dan *reconfigurable control* [5].

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi yang digunakan untuk mencapai tujuan dari tugas akhir ini dijelaskan melalui diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 yang menjelaskan mengenai tahap-tahap penelitian. Dimulai dari studi literature yang didapatkan dari jurnal- jurnal dan buku – buku mengenai *regenerative braking system*, BLDC motor, sistem pada BLDC motor, sistem *Active Fault Toleran Control* yang didalamnya terdapat perancangan *softsensor* dan rekonfigurasion control. Kemudian dilanjutkan dengan pemodelan motor BLDC yang didapatkan dari literature yang telah didapatkan dimana pemodelan dari motor BLDC tersebut disimulasikan dengan menggunakan *software*. Selanjutnya dilakukan perancangan kontroller PI untuk mendapatkan nilai proportional dan integral yang sesuai bagi sistem untuk mendapatkan respon yang baik dengan menggunakan metode *trial and error*. Untuk memastikan kontroller PI yang telah dirancang memiliki respon yang baik dan sesuai kriteria, maka dilakukan uji kontroller dimana dilihat respon keluaran dari sistem tersebut. Setelah itu dilakukan perancangan *softsensor* yang digunakan untuk dapat mengestimasi kesalahan dari sensor. Setelah dilakukan perancangan *softsensor*, maka dilakukan rekonfigurasi control. Uji performansi AFTC dilakukan dengan memberikan kesalahan pada sensor arus berupa kesalahan bias dan sensitifitas sehingga dapat dianalisis respon apakah sesuai dengan kriteria.



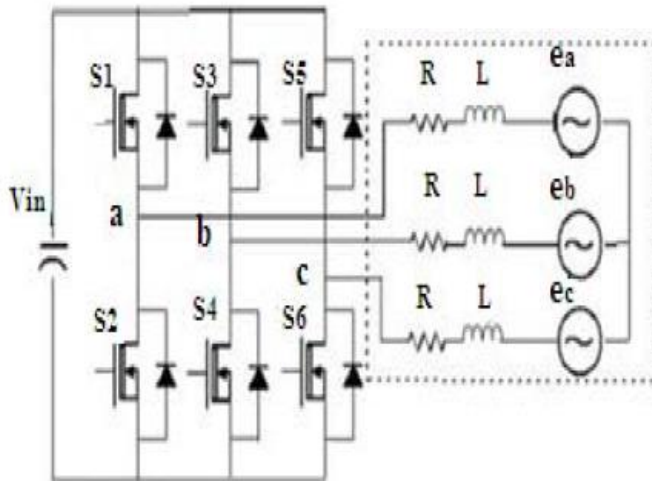
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian Tugas Akhir

3.1 Pemodelan *Regenerative Braking System*

Pemodelan *Regenerative Braking System* dilakukan dengan cara penurunan rumus dari motor *Brushless Direct Current Motor* (BLDC) terlebih dahulu.

- Pemodelan *Brushless Direct Current Motor*

BLDC motor dapat dimodelkan dalam 3 fase ABC variabel yang terdiri dari 2 bagian. Bagian pertama adalah elektrik dimana bagian tersebut menghitung torsi elektromagnetik dan arus dari motor. Bagian kedua adalah mekanik dimana bagian ini menghitung putaran dari motor. Gambar 3.2 menunjukkan pemodelan matematis dari BLDC motor



Gambar 3. 2 Model matematis dari motor BLDC [11]

Dengan menggunakan hukum kirchoff, persamaan tegangan dari gambar 3.2 dapat dituliskan dengan :

$$V_a = R_s i_a + L \frac{di_a}{dt} + M \frac{di_b}{dt} + M \frac{di_c}{dt} + e_a \quad (3.1)$$

$$V_b = R_s i_b + L \frac{di_b}{dt} + M \frac{di_a}{dt} + M \frac{di_c}{dt} + e_b \quad (3.2)$$

$$V_c = R_s i_c + L \frac{di_c}{dt} + M \frac{di_a}{dt} + M \frac{di_b}{dt} + e_c \quad (3.3)$$

dengan :

- L : Induktansi diri setiap fase dari motor
- M : Mutual Induktansi
- R_s : Resistansi setiap fase
- V_a, V_b, V_c : Tegangan yang masuk ke motor
- i_a, i_b, i_c : Arus yang masuk ke motor
- e_a, e_b, e_c : back – EMF yang dihasilkan oleh motor

Jika diubah dalam bentuk matriks maka persamaan 3.1, 3.2, 3.3 menjadi persamaan 3.4

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Dikarenakan persamaan tegangan yang ada kombinasi linier dari persamaan tegangan yang lainnya , maka hanya dibutuhkan dua persamaan tegangan saja. Agar dapat mengeleminasi persamaaan tersebut, maka digunakan persamaan 3.5 :

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (3.5)$$

Sehingga persamaan 3.1, 3.2, dan 3.3 dapat ditulis ulang dengan mensubstitusikan persamaan 3.5 menjadi :

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{R}{L} i_a + \frac{2}{3L} (V_{ab} - e_{ab}) + \frac{1}{3L} (V_{bc} - e_{bc}) \quad (3.6)$$

$$\frac{di_b}{dt} = -\frac{R}{L} i_b - \frac{2}{3L} (V_{ab} - e_{ab}) + \frac{1}{3L} (V_{bc} - e_{bc}) \quad (3.7)$$

Pada sistem BLDC motor, back – EMF yang terjadi pada motor BLDC dapat dituliskan sebagai fungsi dari posisi rotor dan dapat kita ketahui bahwa back – EMF terjadi setiap 120° bergeser dalam sudut fasa. Sehingga persamaan untuk setiap phase dari back – EMF yang terjadi adalah :

$$e_a = k_a f(\theta) \omega_r \quad (3.8)$$

$$e_b = k_b f\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \omega_r \quad (3.9)$$

$$e_c = k_c f\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \omega_r \quad (3.10)$$

Pemodelan dari BLDC motor dan *regenerative braking* tersebut dapat digabungkan dan diubah menjadi persamaan ruang dan waktu yang dapat dituliskan seperti pada persamaan 3.14 dan 3.15 yang di sajikan dalam bentuk state space.

$$\begin{bmatrix} i'_a \\ i'_b \\ \omega'_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\beta}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ \omega_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2}{3L} & \frac{1}{3L} & 0 \\ -\frac{1}{3L} & \frac{1}{3L} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ab} - E_{ab} \\ V_{bc} - E_{bc} \\ T_e - T_l \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ \omega_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ \omega_m \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Dimana nilai mutual induktansi (M) dianggap konstan. Nilai dari resistansi (R) dan induktansi (L) pada motor BLDC dapat diperoleh dari parameter datasheet motor BLDC yang ditunjukkan pada Table 3.1

Table 3. 1 Parameter Motor BLDC

Deskripsi	Nilai	Besaran
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 :

$$\delta(t) = \text{sign}(V_r(t) - V_c(t)) \quad (3.13)$$

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 $\delta(t)$ atau keluaran PWM 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.

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 :

$$\frac{\delta(t)}{V_c(t)} = \frac{G_c}{1 + \frac{sT}{2}} \quad (3.14)$$

Dimana :

$\delta(t)$ = output PWM

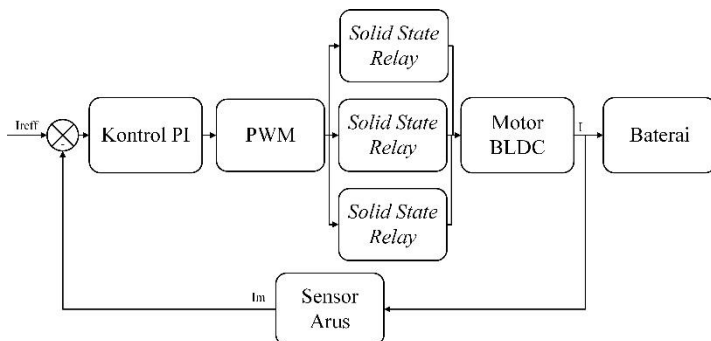
$V_c(t)$ = tegangan keluaran aktual yang dikomparasi

G_c = nilai *gain* kompensator

3.2 Perancangan *Controller*

Pada sistem *regenerative braking* ini dibuat kontrol berupa PI yang dirancang dengan menggunakan simulink dengan diagram blok sistem pengendalian loop tertutup seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.3.

Pembuatan dari kontroler ini bertujuan untuk mengurangi terjadinya *maximum overshoot* pada sistem *regenerative braking*. Untuk mendapatkan respon yang baik maka dilakukan *tunning* nilai P (*Proportional*) dan nilai I (*Integral*) hingga mencapai respon yang diinginkan dengan metode *trial and error*. Sehingga didapatkan nilai P dan I yang didapatkan agar respon sistem tersebut baik berturut – turut adalah 10 dan 10.



Gambar 3. 3 Diagram Blok Sistem Pengendalian Arus pada *Regenerative Braking System*

3.3 Perancangan Active Fault Tolerant Control (AFTC)

Perancangan Active Fault Tolerant Control (AFTC) terdiri dari dua tahap yaitu perancangan *softsensor* dan rekonfigurasi sinyal controller.

- **Perancangan *Softsensor***

Perancangan *softsensor* digunakan untuk mengestimasi pembacaan sensor yang sebenarnya berdasarkan dari pemodelan sistem BLDC motor. Perancangan *softsensor* diawali dengan membuat bentuk state space yang berasal dari bentuk *state space* motor BLDC yang sebelumnya telah dituliskan dengan persamaan (3.11) dan (3.12), sehingga didapatkan persamaan state space untuk *softsensor* yang dituliskan pada persamaan (3.15) dan (3.16) dimana torsi pada saat terjadi regenerative braking dianggap konstant. Nilai dari matriks C dikalikan dengan 0.3334 sebagai gain akibat adanya perubahan arus dari AC menjadi DC.

$$\begin{bmatrix} i'_a \\ i'_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -338.2353 & 0 \\ 0 & -338.2353 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 78.4314 & 39.2157 \\ -39.2157 & 39.2157 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ab} - E_{ab} \\ V_{bc} - E_{bc} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3334 & 0 \\ 0 & 0.3334 \\ -0.3334 & -0.3334 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$A = \begin{bmatrix} -338.2353 & 0 \\ 0 & -338.2353 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 78.4314 & 39.2157 \\ -39.2157 & 39.2157 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0.3334 & 0 \\ 0 & 0.3334 \\ -0.3334 & -0.3334 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Sistem *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) bertujuan untuk mengkompensasi kesalahan yang telah diestimasi oleh *softsensor*. Saat terjadi kesalahan, sinyal pengukuran akan ditambah dengan kesalahan yang dituliskan pada persamaan (3.17)

$$I_m = I + f_s \quad (3.17)$$

dengan :

I : Arus tanpa kesalahan

I_m : Arus hasil pengukuran

f_s : Kesalahan sensor

Dari persamaan (3.17), maka persamaan untuk mengestimasi kesalahan sensor dituliskan pada persamaan (3.18)

$$\hat{f}_s = I_m - \hat{I} \quad (3.18)$$

dengan :

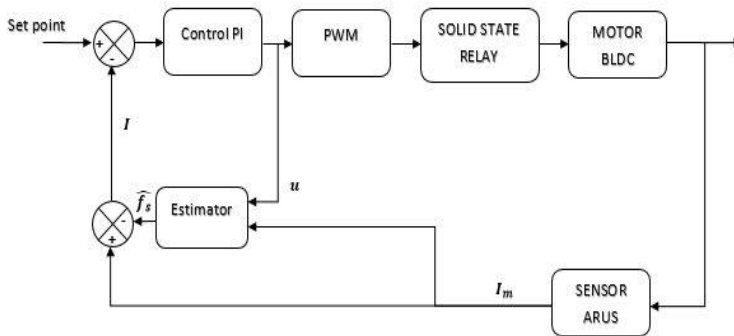
$\hat{I}$: hasil dari softsensor

- **Rekonfigurasi control**

Rekonfigurasi kontrol merupakan tahap akhir dari perancangan AFTC yang bertujuan untuk mengembalikan kestabilansistem ketika terjadi kesalahan. Skema dari rekonfigurasi control ditunjukkan seperti pada Gambar 3.4.

Rekonfigurasi control ini dilakukan dengan menambahkan sinyal kontrol dengan I . Nilai I ini didapatkan dari perhitungan seperti pada persamaan 3.17.

$$I = \hat{f}_s - I_m \quad (3.19)$$



Gambar 3. 4 Skema Rekonfigurasi Kontrol

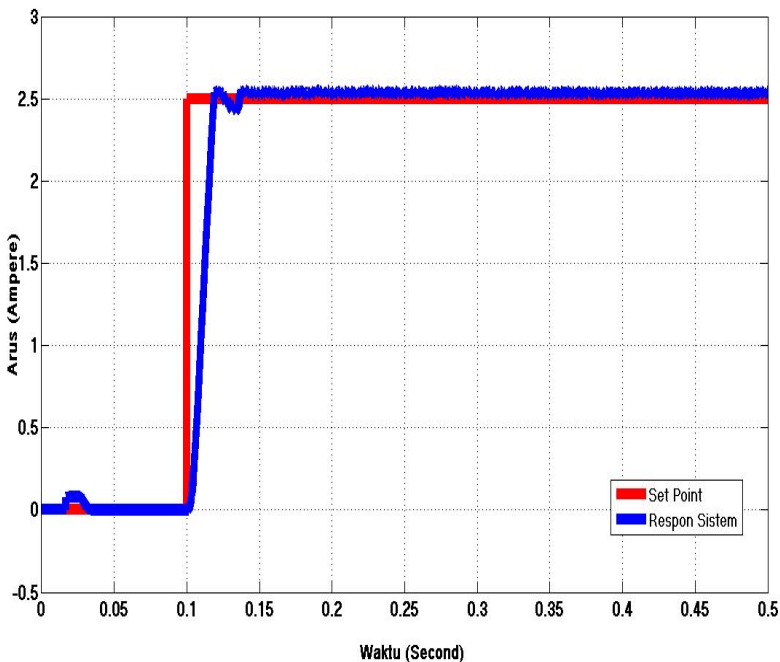
3.4 Uji Performansi AFTC

Uji Performansi dilakukan untuk menguji apakah algoritma AFTC yang telah dirancang dapat berjalan dengan baik dan juga benar. Uji performansi AFTC dilakukan dengan cara memberikan kesalahan yang berupa kesalahan bias dan kesalahan sensitivitas yang terjadi pada sensor. Kesalahan bias dapat disebabkan karena adanya perubahan level nol pada sensor. Kesalahan sensitivitas dapat disebabkan karena umur dari sensor yang sudah tua sehingga terjadi kesalahan pembacaan.

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Uji Sistem *Close loop*

Uji Sistem Close Loop dilakukan untuk mengetahui respon dari pengendalian sudah stabil sesuai dengan set point yang telah ditentukan. Pada simulasi ini, digunakan set point sebesar 2.5 ampere. Gambar 4.1 merupakan hasil respon sistem dengan menggunakan kontroller PI dengan nilai P dan nilai I masing – masing berturut – turut adalah 10 dan 10 yang didapatkan dengan metode *trial and error*.



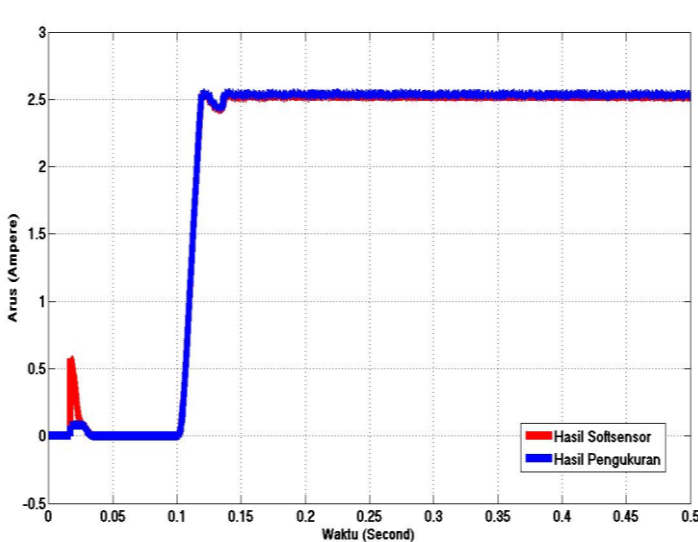
Gambar 4. 1 Hasil Uji Sistem *Close loop*

Gambar 4.1 menunjukkan dua grafik yang berupa grafik berwarna merah yang merepresentasikan nilai *set point* dan grafik

bewarna biru merepresentasian hasil respon dari sistem dengan kontroler yang telah ditentukan. Dari grafik tersebut terlihat bahwa respon dari sistem tersebut menunjukkan bahwa karakteristik dari sistem tersebut memiliki nilai maximum overshoot sebesar 2 % dengan settling time sebesar 0.118 detik dan error steady state sebesar 1,2 %. Dari gambar 4.1 dapat diketahui bahwa kontroler dapat bekerja dengan baik dikarenakan respon dari sistem tersebut hampir mengikuti set point yang telah diberikan.

4.2 Hasil Uji Estimasi Softsensor

Hasil uji estimasi softsensor dilakukan untuk menganalisa *softsensor* yang telah dirancang apakah sudah mampu untuk mengestimasi kesalahan yang terjadi pada sensor. Hasil uji estimasi softsensor dilakukan dengan cara membandingkan antara arus hasil pengukuran dengan arus estimasi yang digunakan untuk mengestimasi kesalahan. Hasil dari uji estimasi *softsensor* dapat dilihat pada Gambar 4.2



Gambar 4. 2 Hasil Uji Estimasi *Softsensor*

Pada Gambar 4.2 dapat dilihat bahwa garis biru menunjukkan arus hasil pengukuran. Sedangkan garis merah menunjukkan arus estimasi keluaran dari softsensor. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa arus hasil pengukuran mengikuti arus dari hasil estimasi dari softsensor. Sehingga dapat diketahui bahwa softsensor yang telah dirancang dapat bekerja dengan baik.

4.3 Uji Performansi Kesalahan Sensor

Uji performansi dilakukan untuk mengetahui algoritma *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) yang telah dibuat dapat bekerja dengan baik atau tidak ketika sistem diberikan kesalahan. Pengujian dilakukan dengan memberikan kesalahan berupa kesalahan bias dan kesalahan sensitivitas pada sensor.

- **Uji Kesalahan Bias Sensor**

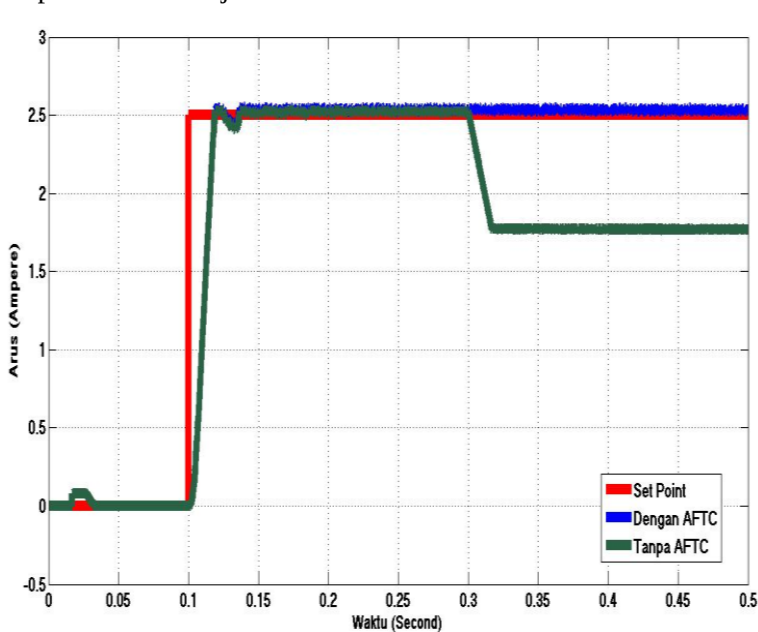
Kesalahan sensor yang diberikan berupa kesalahan bias. Kesalahan bias adalah penyimpangan nilai dari perhitungan nilai sebelumnya. Parameter yang digunakan untuk menilai performansi AFTC yang telah dibuat diantaranya adalah *maximum overshoot*, *settling time*, dan *error steady state*. Penilaian uji dilakukan pada saat diberikan kesalahan pada detik ke 0.3. Besar nilai kesalahan bias yang diberikan adalah 30%, 60%, dan 100%

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan bias sebesar 30 % pada sensor pada detik ke 0.3, dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 4.3 dengan parameter performansi ditunjukkan pada tabel 4.1

Tabel 4. 1 Performansi sistem dengan kesalahan bias 30%

Parameter	Set Point = 2,5 Ampere	
	Tanpa AFTC	AFTC
<i>Maximum Overshoot</i>	30%	2%
<i>Error Steady State</i>	29%	1%
<i>Settling Time</i>	0.118 s	0.118 s

Pada Gambar 4.3 respon sistem tanpa AFTC ditunjukkan oleh grafik berwarna hijau, sistem dengan AFTC ditunjukkan grafik berwarna biru sedangkan *set point* ditunjukkan dengan grafik berwarna merah. Kedua sistem dengan AFTC dan tanpa AFTC memiliki nilai settling time 0.118 s. Ketika diberi kesalahan bias sebesar 30 % pada detik ke – 0,3, respon dari sistem tanpa AFTC memiliki *maximum overshoot* sebesar 30 % dan *error steady state* sebesar 29%. Sedangkan sistem menggunakan AFTC memiliki nilai *maximum overshoot* sebesar 2 % dan *error steady state* sebesar 1 %. Dari percobaan yang telah dilakukan menunjukkan sistem tanpa menggunakan AFTC dengan kesalahan bias 30% tidak stabil. Setelah sistem tersebut diberikan AFTC, sistem tersebut bisa mengakomodasi kesalahan yang diberikan sehingga respon sistem menjadi stabil.

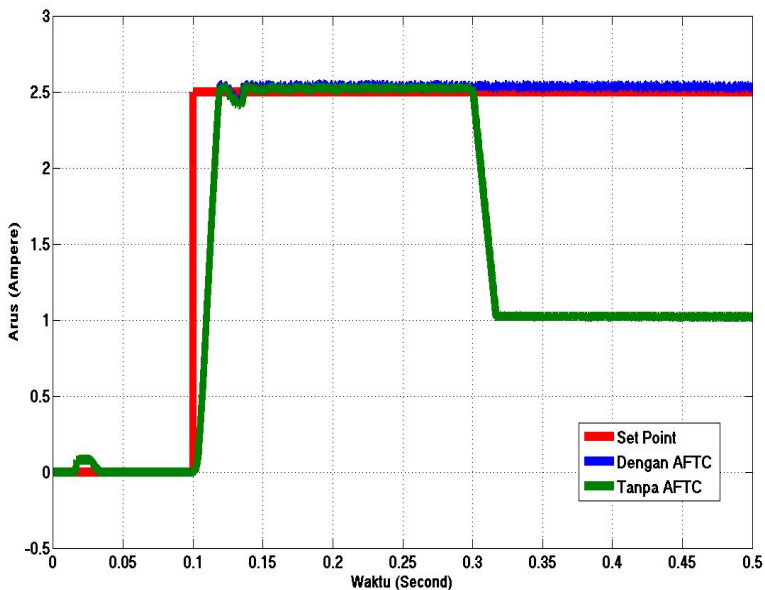


Gambar 4. 3 Hasil Uji Respon dengan kesalahan bias 30 %

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan bias sebesar 60 % pada sensor pada detik ke 0.3, dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 4.4 dengan parameter performansi ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Performansi sistem dengan kesalahan bias 60 %

Parameter	Set Point = 2,5 Ampere	
	Tanpa AFTC	AFTC
<i>Maximum Overshoot</i>	64%	2%
<i>Error Steady State</i>	60%	1%
<i>Settling Time</i>	0.118 s	0.118 s



Gambar 4. 4 Hasil Uji Respon dengan kesalahan bias 60 %

Pada Gambar 4.4 respon sistem tanpa AFTC ditunjukkan oleh grafik berwarna hijau, sistem dengan AFTC ditunjukkan grafik berwarna biru sedangkan *set point* ditunjukkan dengan grafik berwarna merah. Kedua sistem dengan AFTC dan tanpa AFTC memiliki nilai settling time 0.118 s. Ketika diberi kesalahan bias sebesar 60 % pada detik ke – 0.3, respon dari sistem tanpa AFTC memiliki *maximum overshoot* sebesar 64 % dan *error steady state* sebesar 60 %. Sedangkan sistem menggunakan AFTC memiliki nilai *maximum overshoot* sebesar 2 % dan *error steady state* sebesar 1 %. Dari percobaan yang telah dilakukan menunjukkan sistem tanpa menggunakan AFTC dengan kesalahan bias 60% tidak stabil. Setelah sistem tersebut diberikan AFTC, sistem tersebut bisa mengakomodasi kesalahan yang diberikan sehingga respon sistem menjadi stabil.

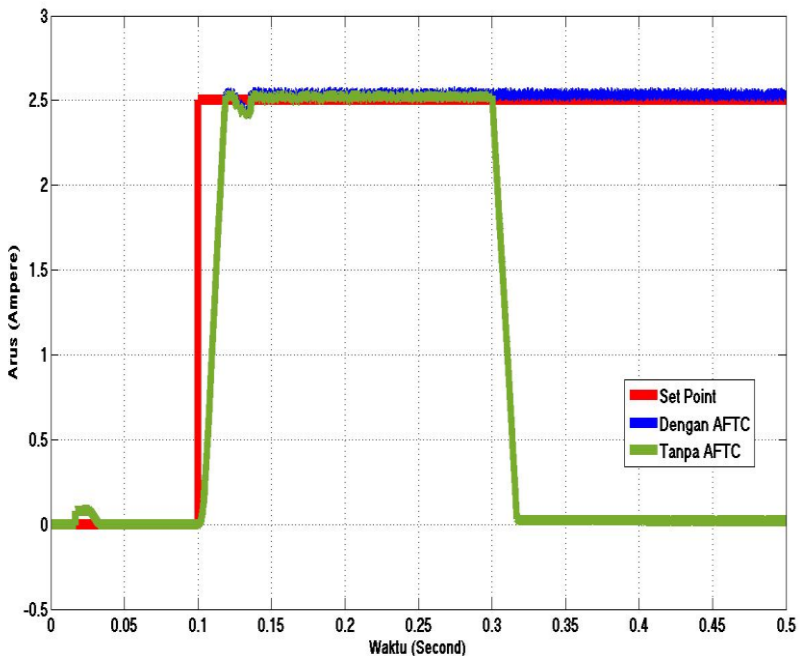
Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan bias sebesar 100 % pada sensor pada detik ke 0.3, dapat ditunjukkan seperti pada gambar 4.5 dengan parameter performansi ditunjukkan pada Tabel 4.3

Tabel 4. 3 Performansi sistem dengan kesalahan bias 100 %

Parameter	Set Point = 2,5 Ampere	
	AFTC	Tanpa AFTC
<i>Maximum Overshoot</i>	0%	2%
<i>Error Steady State</i>	100%	1%
<i>Settling Time</i>	0.118 s	0.118 s

Pada gambar 4.5 respon sistem tanpa AFTC ditunjukkan oleh grafik berwarna hijau, sistem dengan AFTC ditunjukkan grafik berwarna biru sedangkan *set point* ditunjukkan dengan grafik berwarna merah. Kedua sistem dengan AFTC dan tanpa AFTC memiliki nilai settling time 0.118 s. Ketika diberi kesalahan bias sebesar 100 % pada detik ke – 0.3, respon dari sistem tanpa AFTC memiliki *maximum overshoot* sebesar 0 % dan *error steady state* sebesar 100 %. Sedangkan sistem menggunakan AFTC memiliki

nilai *maximum overshoot* sebesar 2 % dan *error steady state* sebesar 1 %. Dari percobaan yang telah dilakukan menunjukkan sistem tanpa menggunakan AFTC dengan kesalahan bias 100% tidak stabil. Setelah sistem tersebut diberikan AFTC, sistem tersebut bisa mengakomodasi kesalahan yang diberikan sehingga respon sistem menjadi stabil



Gambar 4. 5 Hasil Uji Respon dengan kesalahan bias 100 %

- **Uji Kesalahan Sensitifitas Sensor**

Selain kesalahan sensor yang berupa kesalahan bias, kesalahan yang diberikan juga berupa kesalahan sensitifitas. Kesalahan sensitifitas adalah kesalahan yang disebabkan karena kepekaan dari sensor berkurang sehingga sinyal yang dihasilkan oleh sensor menuju controller menjadi tidak seharusnya. Besar

nilai kesalahan bias yang diberikan adalah 30 %, 60 % dan 100 % yang diberikan pada detik ke 0.3.

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan sensitifitas sebesar 30 %, 60 %, dan 100 % pada sensor pada detik ke 0.3, dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 4.6 dengan parameter performansi ditunjukkan pada Table 4.4.

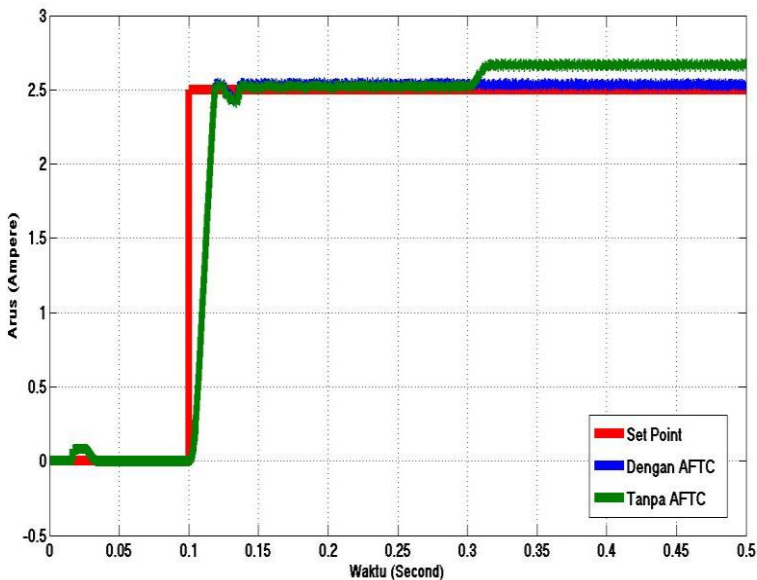
Tabel 4. 4 Performansi sistem dengan kesalahan sensitifitas 30%, 60%, dan 100%

Parameter	Set Point = 2,5 Ampere	
	Tanpa AFTC	AFTC
<i>Maximum Overshoot</i>	15%	2%
<i>Error Steady State</i>	7,2%	1%
<i>Settling Time</i>	0.118 s	0.118 s

Pada Gambar 4.6 respon sistem tanpa AFTC ditunjukan oleh grafik berwarna hijau, sistem dengan AFTC ditunjukan grafik berwarna biru sedangkan *set point* ditunjukan dengan grafik berwarna merah. Kedua sistem dengan AFTC dan tanpa AFTC memiliki nilai settling time 0.118 s. Ketika diberi kesalahan sensitifitas sebesar 30 %, 60 %, dan 100 % yang diberikan pada detik ke – 0.3, respon dari sistem tanpa AFTC memiliki *maximum overshoot* sebesar 15 % dan *error steady state* sebesar 7.2 %. Sedangkan sistem menggunakan AFTC memiliki nilai *maximum overshoot* sebesar 2 % dan *error steady state* sebesar 1 %. Dari percobaan yang telah dilakukan menunjukkan sistem tanpa menggunakan AFTC dengan kesalahan bias 30%, 60%, dan 100% tidak stabil. Setelah sistem tersebut diberikan AFTC, sistem tersebut bisa mengakomodasi kesalahan yang diberikan sehingga respon sistem menjadi stabil.

Kesalahan sensitifitas 30 %, 60%, dan 100 % memiliki respon yang sama dalam keadaan tanpa menggunakan AFTC dimana nilai arus yang naik pada saat detik ke 0.3 steady pada saat arus yang dihasilkan sebesar 2,67 ampere. Respon yang sama tersebut disebabkan karena motor dengan parameter seperti pada Tabel 3.1

hanya dapat menghasilkan arus maksimum sebesar 2,67 ampere. Untuk menguji kemampuan dari AFTC yang telah dirancang apakah dapat mentoleransi kesalahan sensitifitas, maka dilakukan pengujian dengan kesalahan sensitifitas yang sama. Namun set point dari sistem tersebut diubah menjadi 1.5 ampere dengan parameter motor BLDC yang sama seperti pada Tabel 3.1

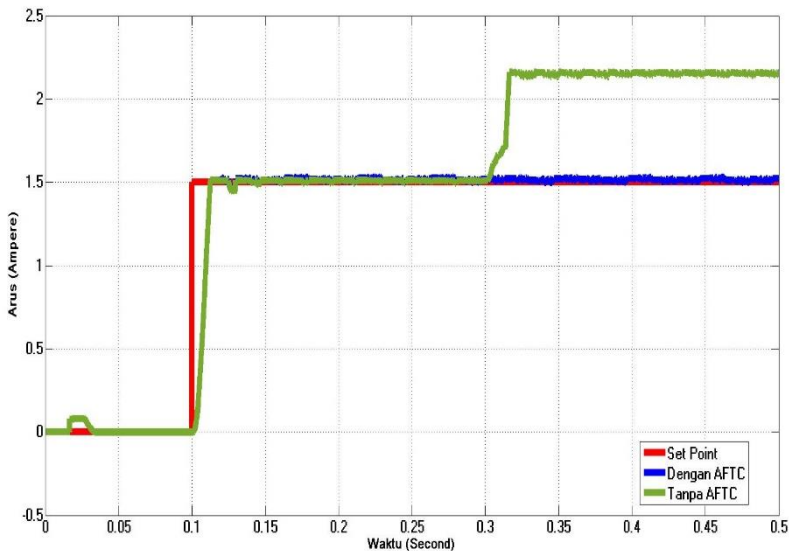


Gambar 4. 6 Hasil Uji Respon dengan kesalahan sensitifitas 30%, 60 %, dan 100 %

Hasil penguji respon sistem terhadap kesalahan sensitifitas sebesar 30 % pada sensor dengan set point sebesar 1.5 ampere pada detik ke 0.3, dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 4.7 dengan parameter performansi ditunjukkan pada Tabel 4.5

Tabel 4. 5 Performansi sistem dengan kesalahan sensitifitas 30%

Parameter	Set Point =1,5 Ampere	
	Tanpa AFTC	AFTC
<i>Maximum Overshoot</i>	28%	1,2%
<i>Error Steady State</i>	14,4%	0,6%
<i>Settling Time</i>	0.118 s	0.118 s

**Gambar 4. 7** Hasil Uji Respon dengan kesalahan sensitifitas 30%

Pada Gambar 4.7 respon sistem tanpa AFTC ditunjukkan oleh grafik berwarna hijau, sistem dengan AFTC ditunjukkan grafik berwarna biru sedangkan *set point* ditunjukkan dengan grafik berwarna merah. Kedua sistem dengan AFTC dan tanpa AFTC memiliki nilai settling time 0.118 s. Ketika diberi kesalahan sensitifitas sebesar 30 % pada detik ke 0.3, respon dari sistem tanpa

AFTC memiliki *maximum overshoot* sebesar 28 % dan *error steady state* sebesar 14,4 %. Sedangkan sistem menggunakan AFTC memiliki nilai *maximum overshoot* sebesar 1,2 % dan *error steady state* sebesar 0,6 %. Dari percobaan yang telah dilakukan menunjukkan sistem tanpa menggunakan AFTC dengan kesalahan bias 30% tidak stabil. Setelah sistem tersebut diberikan AFTC, sistem tersebut bisa mengakomodasi kesalahan yang diberikan sehingga sistem menjadi stabil.

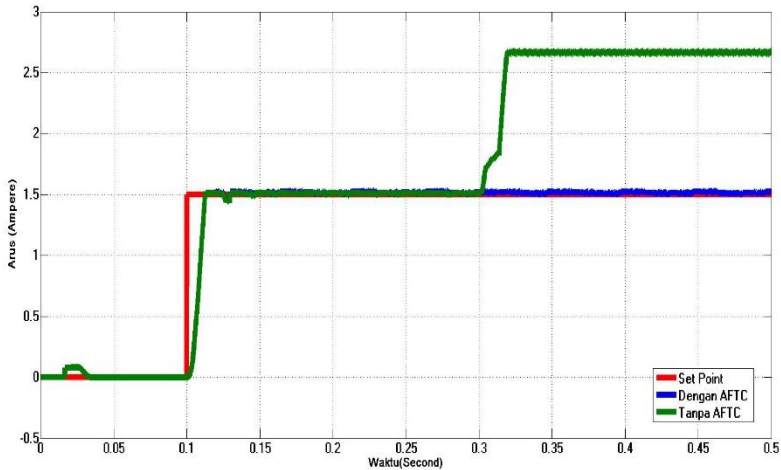
Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan sensitifitas sebesar 60 % pada sensor pada detik ke 0.3, dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 4.8 dengan parameter performansi sesuai dengan pada Tabel 4.6.

Tabel 4. 6 Performansi sistem dengan kesalahan sensitifitas 60%

Parameter	Set Point = 2,5 Ampere	
	Tanpa AFTC	AFTC
<i>Maximum Overshoot</i>	80%	1,2%
<i>Error Steady State</i>	78,6%	0,6%
<i>Settling Time</i>	0.118 s	0.118 s

Pada Gambar 4.8 respon sistem tanpa AFTC ditunjukkan oleh grafik berwarna hijau, sistem dengan AFTC ditunjukkan grafik berwarna biru sedangkan *set point* ditunjukkan dengan grafik berwarna merah. Kedua sistem dengan AFTC dan tanpa AFTC memiliki nilai settling time 0.118 s. Ketika diberi kesalahan sensitifitas sebesar 60 % pada detik ke 0,3, respon dari sistem tanpa AFTC memiliki *maximum overshoot* sebesar 80 % dan *error steady state* sebesar 78,6 %. Sedangkan sistem menggunakan AFTC memiliki nilai *maximum overshoot* sebesar 1 % dan *error steady state* sebesar 0,6 %. Dari percobaan yang telah dilakukan menunjukkan sistem tanpa menggunakan AFTC dengan kesalahan bias 60% tidak stabil. Setelah sistem tersebut diberikan AFTC,

sistem tersebut bisa mengakomodasi kesalahan yang diberikan sehingga sistem menjadi stabil.



Gambar 4. 8 Hasil Uji Respon dengan kesalahan sensitifitas 60%

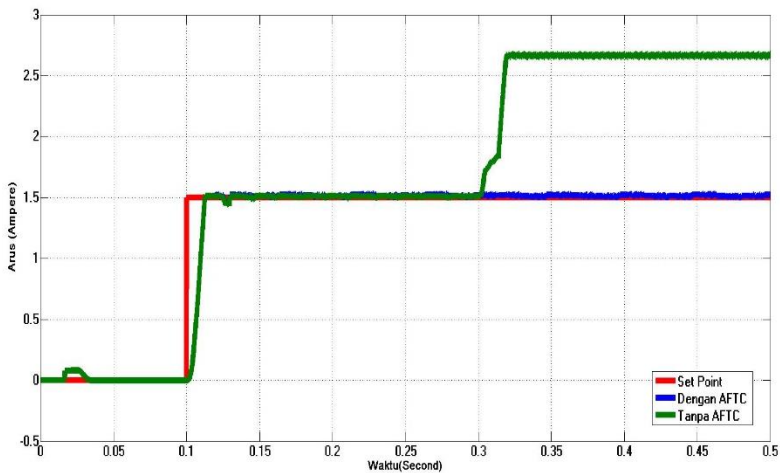
Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan sensitifitas sebesar 100 % pada sensor pada detik ke 0.3, dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 4.9 dengan performansi seperti pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 7 Performansi sistem dengan kesalahan sensitifitas 100%

Parameter	Set Point = 2,5 Ampere	
	Tanpa AFTC	AFTC
<i>Maximum Overshoot</i>	80%	1,2%
<i>Error Steady State</i>	78,6%	0,6%
<i>Settling Time</i>	0.118 s	0.118 s

Pada Gambar 4.9 respon sistem tanpa AFTC ditunjukkan oleh grafik berwarna hijau, sistem dengan AFTC ditunjukkan grafik

bewarna biru sedangkan *set point* ditunjukan dengan grafik bewarna merah. Kedua sistem dengan AFTC dan tanpa AFTC memiliki nilai settling time 0.118 s. Ketika diberi kesalahan sensitifitas sebesar 100 % pada detik ke – 0,3, respon dari sistem tanpa AFTC memiliki *maximum overshoot* sebesar 80 % dan *error steady state* sebesar 78,6 %. Sedangkan sistem menggunakan AFTC memiliki nilai *maximum overshoot* sebesar 1 % dan *error steady state* sebesar 0,6 %. Dari percobaan yang telah dilakukan menunjukkan sistem tanpa menggunakan AFTC dengan kesalahan bias 100% tidak stabil. Setelah sistem tersebut diberikan AFTC, sistem tersebut bisa mengakomodasi kesalahan yang diberikan sehingga sistem menjadi stabil.



Gambar 4. 9 Hasil Uji Respon dengan kesalahan sensitifitas 100%

“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 *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) pada *regenerative braking system* dengan kesalahan pada sensor adalah sebagai berikut :

- Telah dilakukan perancangan algoritma AFTC berupa perancangan *softsensor* untuk mengestimasi kesalahan dan menghasilkan *state* yang benar. AFTC yang dibuat mampu mengestimasi kesalahan yang terjadi pada sensor dan mampu menjaga performansinya untuk tetap pada *set point*.
- Sistem dengan algoritma AFTC dengan memberikan nilai kesalahan detik ke - 0.3 dapat mengestimasi kesalahan bias sebesar 30%, 60%, dan 100% dengan parameter performansi yang lebih sesuai dengan setpoint dibandingkan dengan sistem tanpa AFTC. Pada saat diberikan kesalahan 30%, tanpa menggunakan AFTC didapatkan *error steady state* sebesar 29% dan *maximum overshoot* sebesar 30%. Pada saat diberikan kesalahan 100%, tanpa menggunakan AFTC didapatkan *error steady state* sebesar 100% dan *maximum overshoot* sebesar 0%. Pada saat menggunakan AFTC dengan kesalahan 30% dan 100% didapatkan *error steady state* sebesar 1% dan *maximum overshoot* sebesar 2%.
- Sistem dengan algoritma AFTC dengan memberikan nilai kesalahan pada detik ke - 0.3 dapat mengestimasi kesalahan sensitifitas sebesar 30%, 60% dan 100% dengan set point parameter performansi yang lebih sesuai dengan set point dibandingkan dengan sistem tanpa AFTC. Pada saat diberikan kesalahan 30%, tanpa menggunakan AFTC didapatkan *error steady state* sebesar 14,4% dan *maximum overshoot* sebesar 28%. Pada saat diberikan kesalahan 100%, tanpa menggunakan AFTC didapatkan *error steady state* sebesar 78,6% dan *maximum overshoot* sebesar 80%. Pada saat menggunakan AFTC dengan kesalahan 30% dan 100%

didapatkan *error steady state* sebesar 0,6% dan *maximum overshoot* sebesar 1,2%.

5.2 Saran

Dari tugas akhir ini terdapat saran yang dapat digunakan untuk penelitian selanjutnya, yakni pengembangan algoritma AFTC dapat dilakukan dengan cara menambah beberapa inputan lainnya seperti kecepatan dari motor

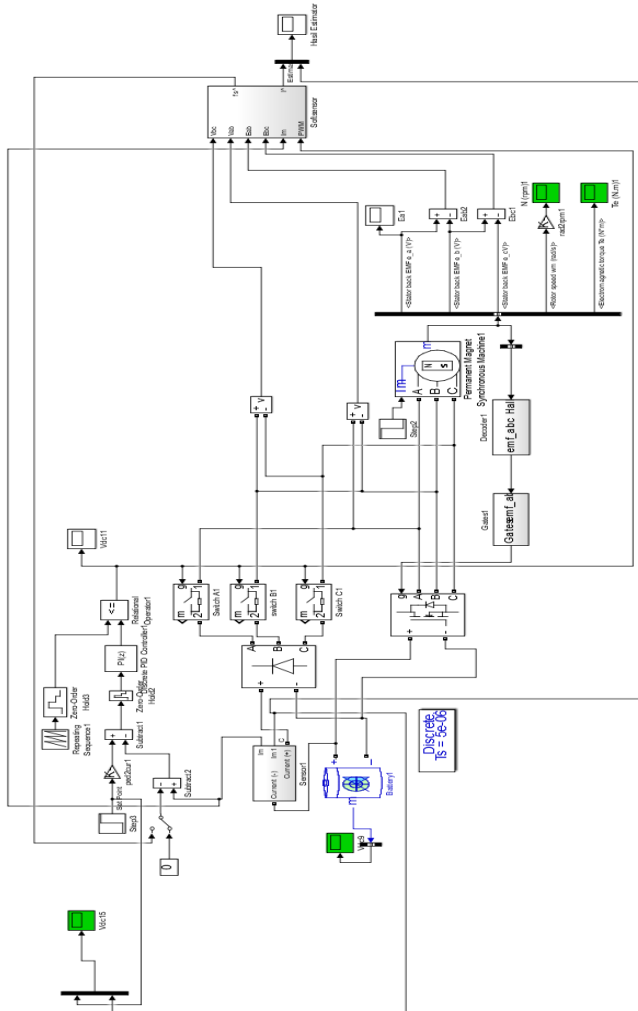
DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Ehsani, Y. Gao and dkk, Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles, vol. 49, Washington, D.C.: CRC Press, 2004.
- [2] G. A. Chandak and A. B. A, "A Review on Regenerative Braking in Electric Vehicle," 2017.
- [3] M. Boisvert, D. Mammosser and dkk, "Comparison of two strategies for optimal regenerative braking, with their sensitivity to variations in mass, slope and road condition," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 46, no. 21, pp. 626-630, 2013.
- [4] J. P. Bentley, Principle of Measurement System, Middlesbrough and Darlington: Prentice Hall, 2005.
- [5] Y. Zhang and J. Jiang, "Bibliographical Review on Reconfigurable Fault-Tolerant Control Systems," *Annual Reviews in Control* vol 32 (no.2), pp. 229-252, 2008.
- [6] X. Li and I. Kao, "Analytical Fault Detection and Diagnosis (FDD) for Pneumatic Systems in Robotics and Manufacturing Automation," *IEEE*, 2005.
- [7] M. R. H and A. H. R, "Regenerative Braking System in Electric Vehicles," 2016.
- [8] J. P. Wen and C. W. Zhang, "Research on Modeling and Control of Regenerative Braking for Brushless DC Machines Driven Electric Vehicles," *Mathematical Problems in Engineering*, 205.
- [9] K. Ogata, Modern Control Engineering 3rd ed, London: Prentice Hall International, 1997.
- [10] S. V. Gandewar and A. M. Jain, "Modelling and Simulation of Three Phase BLDC Motor for Electric

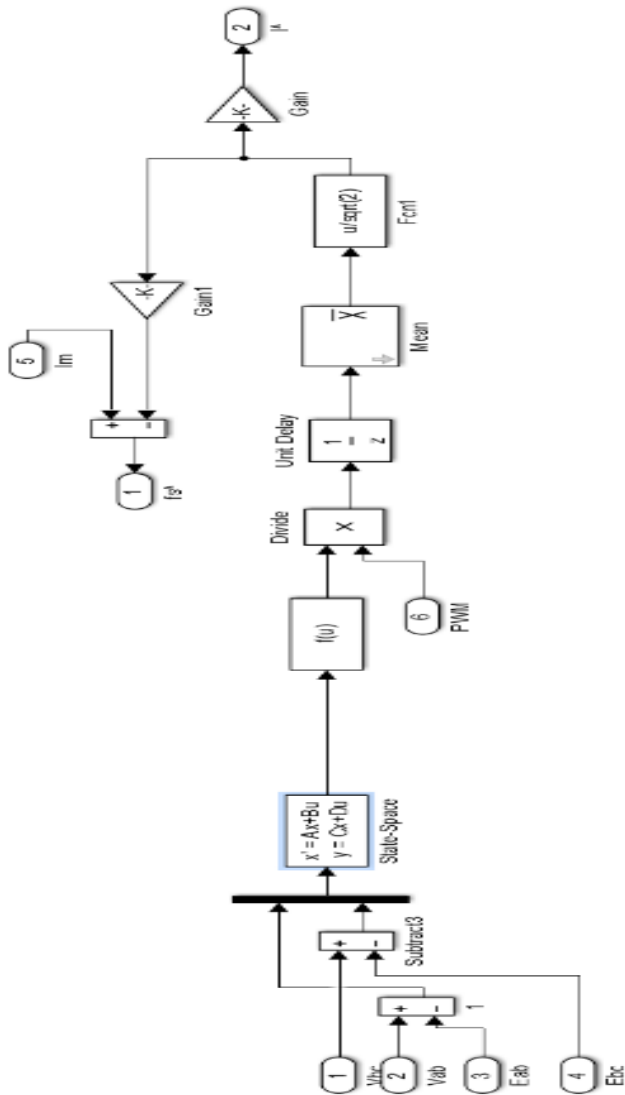
- Braking Using Matlab/Simulink," 2017.
- [11] E. Balaban, "Modeling, Detection, and Disambiguation of Sensor Faults for Aerospace Applications," *Sensor Journal*, vol. 9, 2009.
- [12] K. Ogata, System Dynamic, New Jearsy: Pearson Education.
- [13] T. Murali and C. R. Chandran, "Four Quadrant Operation and Control of Three Phase BLDC Motor without Loss of Power," 2017.

LAMPIRAN

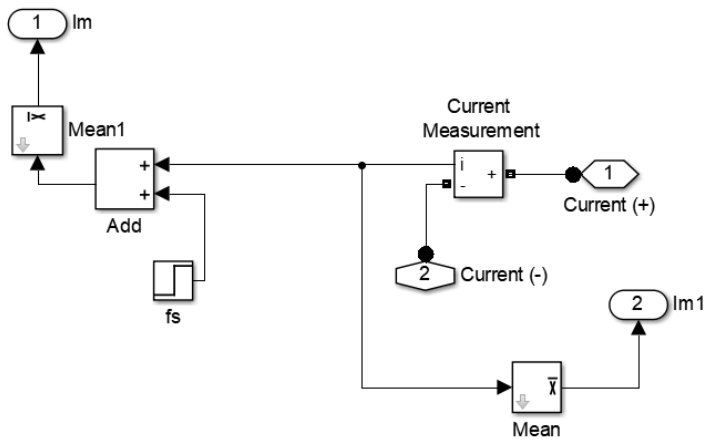
a. Simulasi sistem AFTC pada RBS



b. Perancangan *Softsensor*



c. Sensor Arus



BIODATA PENULIS



Irvandhi Hito Hageshi merupakan nama lengkap penulis dengan nama panggilan Hito. Penulis dilahirkan di Semarang pada tanggal 1 April 1996 sebagai anak pertama dari lima bersaudara dari ayah bernama Jihat Irianto dan ibu Reni Aprijanti. Riwayat pendidikan penulis adalah SD Islam AL – Azhar 17 Pontianak (2002 – 2008), SMPN 3 Pontianak (2008 – 2011), SMAN 1 Pontianak (2011 – 2014). Penulis diterima sebagai mahasiswa S1 Teknik Fisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2014. Semasa perkuliahan, penulis aktif organisasi kemahasiswaan di Himpunan Mahasiswa Teknik Fisika (HMTF), Laboratorium Pengukuran Fisis Departemen Teknik Fisika ITS, dan ITS Team Sapuangin. Penulis fokus pada bidang minat rekayasa instrumentasi dan kontrol untuk menyelesaikan tugas akhirnya. Penulis dapat dihubungi melalui email : hitohageshi1112@gmail.com