

Halaman ini sengaja dikosongkan

Halaman ini sengaja dikosongkan

**PENGATURAN KECEPATAN MOTOR DC PADA
MOBIL LISTRIK MENGGUNAKAN
BIDIRECTIONAL BUCK-BOOST CASCADE
CONVERTER BERBASIS FUZZY LOGIC
CONTROLLER**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui:

Dosen Pembimbing 1

Dosen Pembimbing 2

23/01/15

Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, M.T.
NIP. 196308171990031001

Dr. Dedet Chandra Riawan, S.T., M.Eng.
NIP. 197311192000031001



**SURABAYA
JANUARI, 2015**

**PENGATURAN KECEPATAN MOTOR DC PADA MOBIL
LISTRIK MENGGUNAKAN *BIDIRECTIONAL BUCK-BOOST
CASCADE CONVERTER* BERBASIS *FUZZY LOGIC
CONTROLLER***

Muhammad Taufiq Ramadhan
2208100105

Dosen Pembimbing 1 : Prof.Dr.Ir.Imam Robandi,M.T.

Dosen Pembimbing 2 : Dedet Chandra Riawan,S.T.,M.Eng.Ph.D.

ABSTRAK

Penggunaan mobil listrik secara umum terkendala pada beban, kecepatan aktual, serta efisiensi energi. Pemanfaatan Fuzzy Logic Controller untuk pengaturan kecepatan motor DC pada mobil listrik diperlukan untuk meraih kecepatan aktual yang lebih presisi sehingga diperoleh efisiensi energi. Selain itu perlu juga menggunakan Bidirectional Buck-Boost Cascade Converter untuk pengaturan motor DC secara bidirectional, yakni pengaturan saat *motoring* dan saat pengereman regeneratif (*regenerative braking*). Hal ini berdasar pada energi yang terbuang percuma, baik itu rugi listrik maupun rugi mekanis saat pengereman.

Kata kunci : *bidirectional, Motor DC, electric car, fuzzy logic controller.*

Halaman ini sengaja dikosongkan

DC MOTOR SPEED CONTROL ON ELECTRIC CAR USING BIDIRECTIONAL BUCK-BOOST CASCADE CONVERTER BASED ON FUZZY LOGIC CONTROLLER

Muhammad Taufiq Ramadhan
2208100105

1st Advisor : Prof.Dr.Ir.Imam Robandi,M.T.

2nd Advisor : Dedet Chandra Riawan,S.T.,M.Eng., Ph.D.

ABSTRACT

The use of electric car main problem are on weight, actual speed, and energy efficiency. Fuzzy Logic Controller applied for DC motor speed control is needed to gain actual speed precisely to get energy efficiency. Besides, the importance of Bidirectional Buck-Boost Cascade Converter for DC motor control bidirectionally, that controlling both when motoring and regenerative braking. This point based on wasted energy, both electrical losses and mechanical losses while braking.

Keyword : bidirectional, DC motor, electric car, type-2 fuzzy logic controller.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji syukur penulis haturkan ke hadirat Allah subhanahu wata'ala, berkat rahmat dan hidayah Allah sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul :

Pengaturan Kecepatan Motor DC pada Mobil Listrik Menggunakan *Bidirectional Buck-Boost Cascade Converter* berbasis *Fuzzy Logic Type-2 Controller*.

Tugas Akhir ini ditulis sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) pada bidang studi teknik sistem tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah banyak memberi bantuan serta dukungan dalam penulisan Tugas Akhir, terutama kepada :

1. Kedua orang tua, bapak Bambang Moelyono, ibu Ramlah Maricar, adik Zakya Reyhana, serta keluarga besar dari bapak dan ibu yang tanpa henti memberikan do'a, semangat, motivasi, bimbingan, dan nasehat dalam penulisan Tugas Akhir.
2. Bapak Prof.Dr.Ir.Imam Robandi,M.T. dan bapak Dr.Dedet Chandra Riawan,S.T.,M.Eng. sebagai pembimbing yang telah memberikan ilmu dan arahan sehingga penulis dapat menyelesaikan Buku Tugas Akhir.
3. Bapak Dr.Tri Arief Sardjono,S.T.,M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro ITS dan seluruh dosen, staff, karyawan, serta teman – teman mahasiswa dan alumni Jurusan Teknik Elektro ITS yang telah membantu selama masa perkuliahan.
4. Melati Putri Ferzi, Ayu Ratnasari, Angga Mey Sendra, Anesya Violita, Aprilia Silmi, Romanria Violina Mahardhika, Muhammad Siddiq Basid.
5. Ashari Gau, R. Chandra Ditya Pradana, alm. Aldani Zaafaron, Herryan Syahputra, Alif Januar Rachman, Febby Widiyanto, Subhki Abdul Azis, Tirta Priambadha, Surianta Ikhsan, Awallutfi Andhika, Karina Nurlitasari, Sassia Gezzari, dan Nurul Sardwiyanti.

6. Seluruh alumni dan member aktif Laboratorium *Power System Operation and Control* (PSOC) yang tiada henti memberi dukungan moral sejak penulis aktif menjadi member.
7. Michael Andreas Tanduary, Muhammad Rifki Eka Putra, Agus Suharto, Dudy Priambada, Sulistiani J., Angela H.C., Qadriyah Ramadhani, serta keluarga besar laboratorium kimia (Chemistry Association of Smansa / Chaos) SMAN 1 Makassar yang terus memberi semangat walau jauh.
8. Rian Rachmat, Jeanne Svensky Ligte, serta seluruh rekan bimbingan belajar JILC Makassar kelas E-3 dan kelas ITB 2008.
9. Seluruh alumni, pengurus, dan anggota Ikatan Kekeluargaan Mahasiswa/Pelajar Indonesia (IKAMI) Sulawesi Selatan cabang Surabaya, serta para kanda dari Kerukunan Keluarga Sulawesi Selatan (KKSS).
10. Seluruh rekan Himpunan Mahasiswa Islam (HMI), rekan Lembaga Teknologi Mahasiswa Islam (LTMI) cabang Surabaya, serta para kanda dari Korps Alumni HMI (KAHMI) atas pendidikan informal serta dukungan moral.
11. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan dan telah banyak membantu penulis dalam menyelesaikan studi dan Tugas Akhir.

Semoga buku ini dapat memberikan manfaat dan menjadi kebaikan bagi penulis dan pembaca.

Surabaya, November 2014

Muhammad Taufiq Ramadhan

TABLE OF CONTENT

TITLE	
STATEMENT SHEET	i
APPROVAL SHEET	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
PREFACE	ix
TABLE OF CONTENT	xi
ILLUSTRATIONS	xv
TABLES	xvii
NOMENCLATURE	xix
CHAPTER 1 PREFACE	
1.1 Background	1
1.2 Research Purposes	1
1.3 Issues	1
1.4 Boundary Problems	2
1.5 Research Methods	2
1.6 Writing System	3
1.7 Relevance	3
CHAPTER 2 MODELING SYSTEM AND ALGORITHM	
2.1 Electrical Machines	5
2.1.1 Direct Current Machines	5
2.1.2 Armature Coil	7
2.1.3 Direct Current Generator	8
2.1.4 Direct Current Motor	8
2.1.5 Speed-Torque Characteristics	9
2.1.6 Speed Control	10
2.1.7 Braking	10
2.2 Bidirectional Buck Boost Cascade Converter	10
2.2.1 Operation Mode	11
2.3 Pulse Width Modulation	11
2.4 Fuzzy Logic Controller	12
2.4.1 Fuzzy Logic	13
2.4.1.1 Defuzzifikasi	13

**CHAPTER 3 DESIGN AND MODELLING
BIDIRECTIONAL BUCK-BOOST
CASCADE CONVERTER USING FUZZY
LOGIC CONTROLLER**

3.1 System Configuration	15
3.2 Modelling of Bidirectional Buck-Boost Cascade Converter	17
3.3 Speed Control	19
3.4 Modelling of Fuzzy Logic Controller	19

**CHAPTER 4 SIMULATION RESULTS AND DATA
ANALYSIS**

4.1 Simulation of Motoring/Boost Mode with Constant Torque	23
4.2 Simulation of Motoring/Boost Mode with Torque Changes.....	22
4.3 Simulation of Regenerative Braking.....	30

BAB 5 CLOSING

5.1 Conclusion	33
5.2 Suggestion	33

BIBLIOGRAPHY	xxi
---------------------------	-----

INDEX	xxiii
--------------------	-------

ADDENDUM	xxv
-----------------------	-----

BIOGRAPHY	xxvii
------------------------	-------

DAFTAR TABEL

Daftar Tabel		Halaman
Tabel 3.1	Paramater Motor DC Shunt	16
Tabel 3.2	Parameter Bidirectional Buck Boost Cascade Converter	19

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Daftar Gambar	Halaman
Gambar 2.1 Motor DC	6
Gambar 2.2 Kumparan Tertutup	7
Gambar 2.3 Karakteristik Kecepatan-Kopel Motor DC <i>Shunt</i>	9
Gambar 2.4 Cara Kerja PWM	12
Gambar 3.1 Konfigurasi Sistem	15
Gambar 3.2 Pemodelan Bidirectional Buck Boost Cascade Converter	17
Gambar 3.3 Desain <i>Fuzzy Inference System</i> (FIS)	20
Gambar 3.4 Desain <i>Membership Function</i> untuk <i>Input X</i>	21
Gambar 3.5 Desain <i>Membership Function</i> untuk <i>Input Y</i>	21
Gambar 3.6 Desain <i>Membership Function</i> untuk <i>Output Z</i>	22
Gambar 4.1 Kurva Kecepatan Aktual saat Motoring Kondisi Jalan Datar	24
Gambar 4.2 Sinyal <i>Error</i> saat Motoring Kondisi Jalan Datar	24
Gambar 4.3 Perbandingan Tegangan <i>Input</i> (Vin) Terhadap Tegangan <i>Output</i> (Vout) saat <i>Motoring</i> Kondisi Jalan Datar	25
Gambar 4.4 Perbandingan Arus <i>Input</i> (Iin) Terhadap Arus <i>Output</i> (Iout) saat <i>Motoring</i> Kondisi Jalan Datar	26
Gambar 4.5 Kurva Kecepatan Aktual saat Motoring Kondisi Jalan Mendaki	27
Gambar 4.6 Sinyal <i>Error</i> saat Motoring Kondisi Jalan Mendaki ..	28
Gambar 4.7 Perbandingan Tegangan <i>Input</i> (Vin) Terhadap Tegangan <i>Output</i> (Vout) saat <i>Motoring</i> Kondisi Jalan Mendaki	29
Gambar 4.8 Perbandingan Arus <i>Input</i> (Iin) Terhadap Arus <i>Output</i> (Iout) saat <i>Motoring</i> Kondisi Jalan Mendaki	29
Gambar 4.9 Kurva Kecepatan Aktual saat <i>Regenerative Braking</i> .	30
Gambar 4.10 Sinyal <i>Error</i> saat <i>Regenerative Braking</i>	31
Gambar 4.11 Perbandingan Tegangan <i>Input</i> (Vin) Terhadap Tegangan <i>Output</i> (Vout) saat <i>Regenerative Braking</i> .	31
Gambar 4.12 Perbandingan Arus <i>Input</i> (Iin) Terhadap Arus <i>Output</i> (Iout) saat <i>Regenerative Braking</i>	32

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penggunaan mobil listrik secara umum terkendala pada beban, kecepatan aktual, serta efisiensi energi. Pemanfaatan *Fuzzy Logic Controller* untuk pengaturan kecepatan motor DC pada mobil listrik diperlukan untuk meraih kecepatan aktual yang lebih presisi. Selain itu, menggunakan *Bidirectional Buck-Boost Cascade Converter* untuk pengaturan motor DC secara *bidirectional*, yakni pengaturan saat *motoring* dan saat pengereman regeneratif (*regenerative braking*). Hal ini didasari pada energi yang terbuang percuma, baik itu rugi listrik maupun rugi mekanis saat pengereman [1].

Konverter tersebut di atas menggunakan dua buah kapasitor sebagai perata tegangan akibat *switching* dan sebuah induktor sebagai kopling *H-bridge*. Pada topologi rangkaian konverter, digunakan sakelar elektrik IGBT (*Insulated Gate Bipolar-Junction Transistor*) sehingga dapat dikontrol dengan mudah [2].

Lebih lanjut, konverter digunakan untuk menaikkan dan menurunkan tegangan baterai yang akan menyuplai daya pada motor DC *brush* dalam aplikasi sebagai penggerak mobil listrik. Kinerja konverter diamati ketika motor diberi kecepatan pada beban torsi yang bervariasi, dan saat pengereman.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai adalah bagaimana kinerja *Bidirectional Buck-Boost Cascade Converter* yang digunakan sebagai pengaturan kecepatan motor DC dan dioptimalkan oleh *Fuzzy Logic* dalam implementasi sebagai penggerak mobil listrik.

1.3 Permasalahan

Permasalahan yang dibahas adalah :

1. Bagaimana merancang *Fuzzy Logic Controller*.
2. Bagaimana proses kerja dari motor DC secara *bidirectional*
3. Pengereman motor DC menggunakan metode pengereman regeneratif.

1.4 Batas Masalah

Batas masalah dalam Tugas Akhir ini antara lain :

1. Tugas Akhir hanya sebatas simulasi
2. Kecepatan motor DC dibatasi pada 2000 rpm.
3. Torsi beban motor DC saat jalan lurus dibatasi pada 6 Nm.
4. Perubahan torsi beban motor DC saat motoring dibatasi dari 6 Nm hingga 9 Nm.
5. Perubahan torsi beban motor DC saat regenerative braking dibatasi dari 6 Nm hingga (-3) Nm.
6. Penggunaan kontroler *Fuzzy Logic*.
7. Faktor ekonomi tidak diperhitungkan.
8. Faktor ripple diabaikan.
9. Efisiensi diabaikan.
10. Rugi daya diabaikan.

1.5 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan pada tugas akhir ini :

1. Studi literatur
Pada tahap ini penulis akan mempelajari literatur tentang motor DC dan cara kerja pengaturan motor listrik yang bekerja secara *bidirectional*. Selain itu, penulis akan mempelajari *Fuzzy Logic Controller* untuk mengoptimalkan pengaturan kecepatan motor DC.
2. Pemodelan dan simulasi
Penulis akan memodelkan *Bidirectional Buck Boost Cascade Converter* dalam bentuk simulasi menggunakan perangkat lunak PSIM 9, memodelkan *Fuzzy Logic Controller* menggunakan perangkat lunak MATLAB 2010, lalu menghubungkan keduanya menggunakan aplikasi SIMULINK-SIMCOUPLER MATLAB 2010.
3. Uji coba
Uji coba simulasi rangkaian *Bidirectional Buck-Boost Cascade Converter* untuk mendapatkan hasil berupa data.
4. Pengumpulan hasil uji coba
Data yang dikumpulkan adalah data hasil uji coba dalam kondisi tanpa *controller*, maupun dengan menggunakan *Fuzzy Logic Controller*.

5. Analisis data

Menganalisis data hasil uji coba yang telah dikumpulkan untuk mendapatkan grafik kestabilan yang optimal. Data yang akan dianalisis adalah respon kecepatan motor, torsi motor, *duty cycle* dan tegangan keluaran konverter pada setiap mode operasi.

6. Kesimpulan

Menarik kesimpulan dari analisis data dan ditulis ke dalam buku Tugas Akhir.

1.6 Sistematika Penulisan

Laporan Tugas Akhir ini disusun dalam suatu sistematika sebagai berikut :

Bab 1 : Pendahuluan membahas latar belakang, tujuan penelitian, permasalahan, batas masalah, metode penelitian, sistematika penulisan, dan relevansi dari Tugas Akhir.

Bab 2 : Pemodelan sistem dan algoritma membahas dasar teori penggunaan *Bidirectional Buck Boost Cascade Converter*, pengaturan kecepatan motor DC secara *bidirectional*, dan *Fuzzy Logic Controller*.

Bab 3 : Penjelasan teori tentang penerapan kontroler *Fuzzy* untuk mengatur kecepatan motor DC secara *bidirectional* pada mobil listrik.

Bab 4 : Hasil pemodelan, simulasi, dan uji coba kontroler *Fuzzy* untuk mengatur perubahan kecepatan motor DC.

Bab 5 : Kesimpulan yang diperoleh dari hasil pembahasan dan saran yang berhubungan dengan pokok – pokok pembahasan.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Dapat menjadi referensi bagi peneliti selanjutnya untuk meningkatkan performa dan efisiensi sistem.
2. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang hendak mengambil masalah yang serupa untuk Tugas Akhir.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

PEMODELAN SISTEM DAN ALGORITMA

2.1 Mesin Listrik

Prinsip dari mesin listrik didasarkan pada Hukum Faraday, yang dapat ditulis dalam bentuk lain sebagai berikut

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.1)$$

Mesin listrik terdiri dari dua bagian utama, yakni:

- Bagian yang menghasilkan fluks Φ , disebut kumparan medan (*field winding*) atau kumparan eksitasi (*excitation winding*) atau medan magnet permanen.
- Bagian yang menghasilkan tegangan e , disebut kumparan jangkar (*armature winding*).

Secara terapan, satu dari kedua kumparan tersebut dalam keadaan diam, sedangkan yang lain berputar. Kumparan yang diam ditempatkan dalam stator, dan yang berputar ditempatkan pada rotor[3].

2.1.1 Mesin Arus Searah (*Direct Current*)

Mesin DC dikenal dalam penggunaan yang beranekaragam. Dengan melakukan berbagai penggabungan lilitan medan yang dirangkai secara *shunt*, seri maupun secara terpisah dapat dirancang suatu mesin yang menampilkan karakteristik *volt-ampere* atau kecepatan-momen-inersia yang bermacam-macam bagi penggunaan baik dalam keadaan dinamik maupun *steady state*. Karena mudah diatur, sistem mesin DC sering digunakan pada pemakaian yang memerlukan rentang kecepatan motor yang lebar atau pengaturan yang teliti pada *output* motor.

Stator memiliki kutub menonjol dan dirangkai oleh satu atau lebih kumparan medan. Pembagian fluks celah udara yang dihasilkan oleh lilitan medan secara simetris berada di sekitar garis tengah kutub medan. Sumbu ini dinamakan sumbu medan atau sumbu langsung.

Ditinjau dari segi medan berputar kecepatan konstan, mesin DC secara umum jauh lebih sesuai untuk keperluan pengaturan kecepatan dibandingkan dengan mesin AC. Alasan utama mengapa pilihan jatuh pada mesin DC dalam industri modern adalah karena kecepatan kerja motor DC mudah diatur dalam suatu rentang kecepatan yang lebar, di samping banyaknya metode yang dapat digunakan.



Gambar 2.1. Motor DC

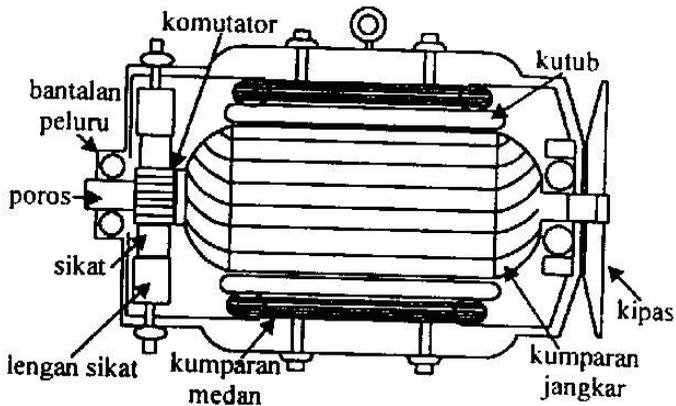
Metode yang banyak digunakan dalam pengaturan kecepatan adalah pengaturan fluks dengan cara mengatur arus medan, pengaturan tahanan yang berhubungan dengan rangkaian kumparan jangkar, dan pengaturan tegangan pada terminal kumparan jangkar.

Pengaturan arus medan (*field current control*) merupakan metode yang paling umum digunakan dan merupakan salah satu keuntungan yang menonjol dari motor *shunt*. Metode ini tentu dapat diterapkan pada motor majemuk. Pengaturan arus medan, yang berarti mengatur fluks dan kecepatan dengan cara mengatur tahanan dari rangkaian medan *shunt*, atau dengan *solid state drive* jika medan dirangkai secara terpisah, merupakan cara yang mudah dikerjakan, murah dan tanpa banyak perubahan pada rugi motor[3].

2.1.2 Kumbaran Jangkar

Kumbaran jangkar adalah bagian dari mesin elektrik yang menginduksi tegangan bila mencakup fluks yang berubah terhadap waktu. Kumbaran jangkar dililit pada inti jangkar. Secara umum kumbaran jangkar diklasifikasi dalam dua bagian:

- Kumbaran tertutup
Kumbaran jangkar dikatakan tertutup bila kumbaran itu berangkat dari suatu titik dan akan kembali ke titik tersebut. Kumbaran tertutup digunakan hanya untuk mesin yang mempunyai komutator seperti mesin DC, dan mesin AC yang dilengkapi dengan komutator.



Gambar 2.2. Kumbaran tertutup

- Kumbaran terbuka
Kumbaran dikatakan terbuka jika kumbaran tersebut bermula pada suatu terminal yang lain atau pada suatu *slip ring*. Namun perlu dicatat bahwa kumbaran tiga fasa dalam hubungan *delta* (segi tiga) digunakan untuk mesin AC membentuk rangkaian yang tertutup. Kumbaran yang terbuka hanya digunakan untuk mesin AC seperti mesin sinkron dan mesin induksi.

Kumbaran jangkar terdiri dari beberapa bagian, yang dapat diuraikan sebagai berikut:

- Belitan (turn)

Belitan adalah bagian terkecil dari kumparan. Belitan terdiri dari dua konduktor aktif. Konduktor aktif adalah bagian dari belitan yang dihasilkan oleh kutub magnet.

- Koil (coil)
Koil terdiri dari dua belitan atau lebih. Jumlah belitan dalam koil dinyatakan dengan notasi N.
- Kumparan (winding)
Kumparan terdiri dari beberapa koil yang disusun dalam alur inti jangkar dalam satu lapis (*single layer*) atau dua lapis (*double layer*)

2.1.3 Generator arus searah

Generator arus searah berpenguatan sendiri adalah generator searah shunt yang memiliki formula :

$$V_t = I_a R_a \quad (2.2)$$

$$E_a = V_t + I_a R_a \quad (2.3)$$

V_t merupakan tegangan terminal yang dipengaruhi oleh arus jangkar (I_a) dan tahanan jangkar (R_a), serta pengaruh terhadap tegangan ggl (gaya gerak listrik) lawan (E_a)[1].

2.1.4 Motor arus searah

Secara prinsip, mesin listrik dapat berlaku sebagai motor maupun generator. Perbedaan terletak dalam konversi daya. Generator adalah suatu mesin listrik yang mengubah daya *input* mekanis menjadi daya *output* listrik, sedangkan motor mengubah daya *input* listrik menjadi daya *output* mekanis. Maka dengan membalik generator arus searah, sekarang tegangan V_t menjadi sumber dan tegangan jangkar E_a merupakan ggl lawan, sehingga mesin arus searah ini akan berlaku sebagai motor. Oleh karena itu hubungan antara tegangan V_t dan E_a dapat ditulis sebagai[1] :

$$E_a = V_t - I_a R_a \quad (2.4)$$

2.1.5 Karakteristik kecepatan – kopel

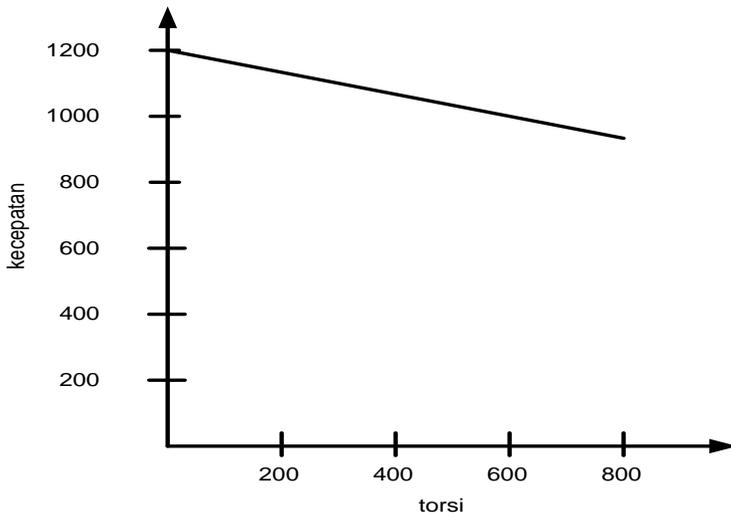
Pada motor shunt, peningkatan kopel (arus) akan menyebabkan pula peningkatan harga fluks (ϕ), karena fluks pada motor shunt merupakan fungsi arus jangkar (I_a). Dari rangkaian motor shunt terlihat bahwa untuk harga arus jangkar sama dengan nol, harga fluks juga nol, sehingga dari persamaan tersebut harga n menuju tak terhingga. Sedangkan untuk harga I_a yang cukup besar, harga n pada persamaan di atas akan mendekati nol. Untuk motor arus searah berlaku hubungan :

$$V_t = E_a + I_a R_a \quad (2.5)$$

$$E_a = Cn\phi \quad (2.6)$$

$$n = \frac{V_t - I_a R_a}{C\phi} \quad (2.7)$$

Dengan demikian karakteristik kecepatan-kopel untuk motor shunt masing – masing dapat dilihat pada gambar berikut[5].



Gambar 2.3. Karakteristik kecepatan-kopel motor DC shunt

2.1.6 Pengaturan kecepatan

Pengaturan kecepatan memegang peranan penting dalam motor arus searah, karena motor arus searah mempunyai karakteristik kopel-kecepatan yang menguntungkan dibanding dengan motor yang lain. Telah diketahui bahwa untuk motor arus searah dapat diturunkan rumus sebagai berikut :

$$E_a = Cn\phi ; E_a = V_t - I_a R_a \quad (2.8)$$

$$n = \frac{V_t - I_a R_a}{C\phi} \quad (2.9)$$

Dari persamaan tersebut, dapat dilihat bahwa kecepatan (n) dapat diatur dengan mengubah besaran ϕ , R_a atau V_t [1].

2.1.7 Pengereman

Suatu motor listrik dapat berhenti dengan adanya geseran yang terjadi. Tetapi tentu saja hal ini membutuhkan waktu yang lama. Untuk dapat menghentikan motor dalam waktu yang relatif singkat, dilakukan pengereman.

Adapun metode pengereman yang dipakai pada penelitian ini adalah pengereman regeneratif. Pada pengereman regeneratif, energi yang tersimpan pada putaran dikembalikan kepada sistem jala – jala. Cara ini biasa dipakai pada kereta listrik. Ketika kereta berjalan menurun, kecepatan motor sangat laju karena $E_a > V_t$ yang mengakibatkan daya dikembalikan kepada sistem jala – jala untuk keperluan lain. Saat daya dikembalikan ke jala – jala, kecepatan menurun dan proses pengereman berlangsung[1].

2.2 *Bidirectional Buck Boost Cascade Converter*

Rangkaian ini merupakan pengembangan dari konverter *bidirectional buck boost* konvensional, dimana terdapat implementasi metode *H-Bridge* menggunakan empat buah *switch* IGBT (*Insulated Gate Bipolar-junction Transistor*) dan kopling induktor.

Pengaturan naik dan turun tegangan sumber untuk mendapatkan tegangan output yang sesuai melalui pengaturan sudut penyalan *switch* IGBT. Aliran daya pada konverter ini bersifat bolak balik, baik dari sumber ke beban, maupun dari beban ke sumber.

Konverter ini menjadi salah satu rujukan untuk implementasi pada mobil listrik[2].

2.2.1 Mode Operasi

Pada konverter ini, pengoperasian terdiri atas dua mode, yaitu mode *motoring* dan mode *generating*. Saat mode *motoring*, tegangan baterai dinaikkan (mode *boost*) sesuai nilai *duty cycle*. Arus dari baterai mensuplai induktor dan motor DC. Pengaturan *duty cycle* hanya pada *switch* S1 IGBT, sementara *switch* yang lain dalam kondisi *off*. Dioda D2 selalu *reverse biased* dan D3 *direct biased* selama pengoperasian. Saat mode *generating*, tegangan baterai diturunkan (mode *buck*) sesuai nilai *duty cycle*. Pengaturan *duty cycle* hanya pada *switch* S3 IGBT, sementara *switch* yang lain dalam kondisi *off*. Dioda D4 selalu *reverse biased* dan D1 *direct biased* selama pengoperasian.

Pengujian *regenerative braking* adalah saat motor DC dalam kondisi *motoring*, kemudian *duty cycle* diubah secara spontan menjadi mode *buck*. Sehingga motor DC yang laju sekali berubah menjadi generator DC dan mensuplai energi ke baterai[2].

2.3 Pulse Width Modulation

Teknologi elektronika modern mensyaratkan suplai daya mempunyai kualitas tinggi, andal, berdimensi kecil dan efisien. Regulator tegangan linier yang prinsip operasi didasari pembagian tegangan dan arus dirasa tidak efisien. Hal ini disebabkan tegangan *output* selalu lebih kecil dari tegangan *input* dan aplikasi terbatas pada level daya rendah. Seiring perkembangan digunakan metode *switching* sebagai pengaturan tegangan. Pada tugas akhir ini menggunakan *pulse width modulation* (PWM) *converter*.

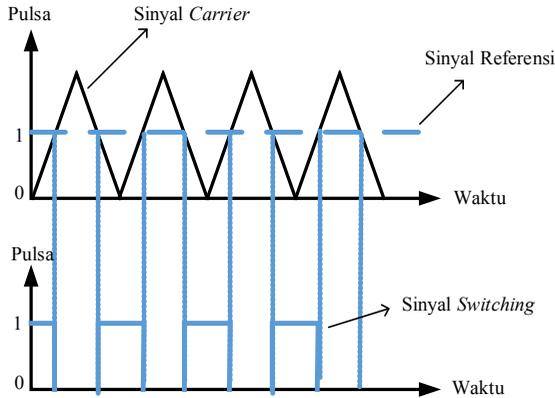
Rangkaian PWM terdiri dari sebuah *comparator* dengan *input* berupa tegangan referensi DC dan sebuah tegangan *carrier* berupa sinyal segitiga dengan frekuensi tertentu. Dengan membandingkan kedua *input* tersebut akan didapat *output duty cycle* yang dapat digunakan untuk mengatur tegangan *output* pada konverter.

Ketika tegangan referensi DC lebih besar dari sinyal *carrier* maka *output comparator* adalah $V_{threshold}$ (*on*). Sedangkan jika tegangan referensi DC lebih rendah dari tegangan *carrier* maka *output comparator* adalah 0 (*off*). *Duty cycle* dihasilkan dari operasi kerja PWM yang ditunjukkan Gambar 2.6. Besar *duty cycle* dapat dihitung dengan persamaan[6] :

$$D = \frac{t_{on}}{T} \times 100\% \quad (2.10)$$

Keterangan :

D = duty cycle (%)
 t_{on} = lama waktu switch on (detik)
 T = periode sinyal gergaji (detik)



Gambar 2.4. Cara kerja PWM

2.4 Fuzzy Logic Controller

Dalam kehidupan sehari – hari, kita tidak dapat memutuskan sesuatu masalah dengan jawaban sederhana, yaitu “Ya” atau “Tidak”. Sebagai contoh, untuk menyatakan seseorang berbadan “tinggi”, amat bersifat relatif.

Teori Fuzzy pertama kali diperkenalkan oleh Lotfi Zadeh pada tahun 1965 di California. Teori *fuzzy* dikembangkan untuk mengatasi kekurangan yang dimiliki oleh teori Boolean. Pada teori Boolean hanya dikenal dua keadaan yaitu “0” dan “1”, “besar” dan “kecil”, “panjang” dan “pendek”. Sehingga hanya dapat diketahui nilai ekstrim dari suatu keadaan. Padahal terkadang dibutuhkan suatu keadaan yang betul – betul mempresentasikan keadaan nyata. Teori *fuzzy* memberikan solusi dari masalah ini. Zadeh memodifikasi teori himpunan dimana setiap anggota memiliki derajat keanggotaan yang bernilai kontinu antara “0” sampai “1”. Himpunan ini disebut *Fuzzy set*[7].

2.4.1 Fuzzy Inference System (FIS)

Inferensi logika *fuzzy* memiliki kemiripan dengan penalaran manusia. Inferensi *fuzzy* terdiri atas : (1) Pengetahuan (*knowledge*) : melibatkan penalaran *fuzzy* yang dinyatakan sebagai aturan dalam bentuk : IF (jika) x is A, THEN (maka) y is B, x dan y adalah variabel *fuzzy*, A dan B adalah nilai *fuzzy*. Pernyataan pada bagian premis dapat melibatkan penghubung (*connective*) logika AND dan OR. Contoh : IF x is A AND y is B THEN z is C; (2) Fakta : merupakan *input fuzzy* yang harus dicari inferensi (konklusi) dengan menggunakan aturan *fuzzy*. *Input* fakta tidak harus sama dengan basis pengetahuan; (3) Konklusi : inferensi yang sepadan (*matched*) parsial diperoleh berdasar fakta *fuzzy* dan basis pengetahuan *fuzzy*.

Metode Mamdani yang sering dikenal dengan metode Max-Min. Metode ini diperkenalkan oleh Ebrahim Mamdani pada tahun 1975. Ada enam tahapan yang diperlukan untuk mendapatkan *output* : (1) Variabel *input* dan *output* berupa pembentukan himpunan *fuzzy*; (2) Aturan *fuzzy* (*fuzzy rule*); (3) Operasi *membership function* (operator *fuzzy* yang dipakai adalah AND); (4) Aplikasi fungsi implikasi (*implication*), secara umum fungsi implikasi yang digunakan adalah MIN; (5) Komposisi aturan (*Agregation*); (6) Penegasan (*Defuzzification*)[7].

2.4.2 Defuzzifikasi

Defuzzifikasi adalah proses pemetaan hasil inferensi ke daerah aksi kontrol *nonfuzzy* (*crisp*). Pada implementasi kontrol real time logika *fuzzy*, defuzzifikasi yang digunakan adalah Center of Area (COA).

Defuzzifikasi COA menghasilkan pusat gravitasi dari distribusi aksi kontrol yang dinyatakan pada persamaan (2.1).

$$z^* = \frac{\sum_{k=1}^m V_k \mu_v(V_k)}{\sum_{k=1}^m \mu_v(V_k)} \quad (2.11)$$

Variabel z^* , m , dan V_k didefinisikan sebagai berikut :

z^* adalah nilai output; m adalah tingkat kuantisasi; V_k adalah elemen ke- k dan $\mu_v(V_k)$ adalah *membership degree* elemen pada *fuzzy set* v [7].

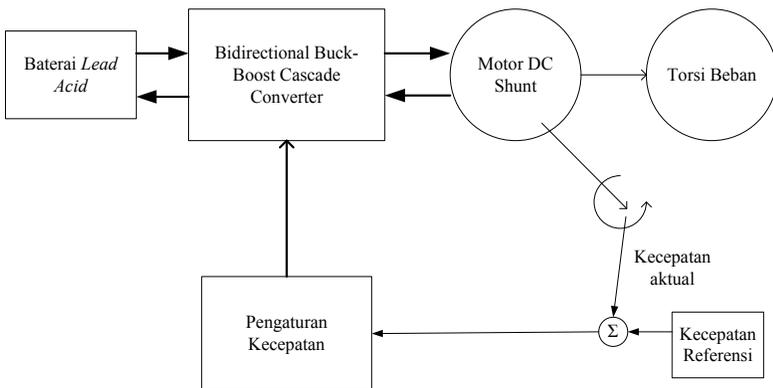
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

PERANCANGAN DAN PEMODELAN *BIDIRECTIONAL BUCK-BOOST CASCADE CONVERTER MENGGUNAKAN FUZZY LOGIC CONTROLLER*

3.1 Konfigurasi Sistem

Konfigurasi sistem yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 merupakan gambaran sederhana sistem kelistrikan pada penelitian yang dilakukan. Gambar ini berupa baterai, konverter, motor DC *shunt*, torsi beban, kecepatan referensi dan pengaturan kecepatan. Konfigurasi sistem nantinya akan dimodelkan pada perangkat lunak PSIM 9 dan SIMULINK SIMCOUPLER pada MATLAB 2010a.



Gambar 3.1. Konfigurasi sistem

Pada penelitian ini sumber dari sistem menggunakan baterai *lead acid*. Kapasitas total tegangan nominal yang dihasilkan bernilai 120 Volt. Beban yang digunakan sebuah motor DC penguatan *shunt* dengan daya *output* 10 HP atau 7640 W, dan *rating* tegangan 240 V. Untuk dapat menyesuaikan *rating* tegangan beban, maka *output* baterai diolah oleh *Bidirectional Buck-Boost Cascade Converter*. Konverter akan menaikkan tegangan ke *rating* 240 V saat *motoring*, dan menurunkan tegangan dibawah *rating* 120 V saat *regenerative braking*.

Penyesuaian nilai tegangan *output* pada konverter dilakukan dengan mengubah nilai *duty cycle* dari *switch* IGBT yang terdapat pada konverter. Nilai *duty cycle* diperoleh dari perhitungan *gain* konverter yang dibutuhkan sistem. Nilai induktor dapat mempengaruhi *ripple* arus pada sistem. Selain itu, penggunaan kapasitor untuk memperhalus nilai tegangan pada beban motor DC.

Beban pada motor merupakan torsi yang memiliki nilai bervariasi. Nilai dan bentuk karakteristik torsi ditentukan pada karakteristik beban mekanis. Motor harus mampu mempertahankan kecepatan walaupun nilai torsi beban diubah, kecuali pada mode *regenerative braking*. Kecepatan pada mode *regenerative braking* akan berkurang, karena merupakan bagian dari proses perlambatan, torsi beban juga akan bernilai negatif.

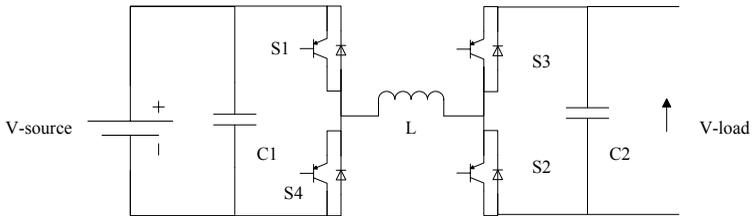
Kecepatan aktual motor digunakan sebagai umpan balik dari kontroler *Fuzzy Logic Controller*. Kecepatan referensi dan kecepatan aktual akan dibandingkan sehingga menghasilkan nilai selisih atau *error*. *Error* tersebut akan digunakan sebagai *input* pada kontroler *Fuzzy*. Proses pembenaran *error* ini akan terus berlangsung walaupun nilai *error* sudah sangat kecil hingga mencapai kondisi *steady state*. Sinyal *output Fuzzy Logic Controller* tersebut akan digunakan sebagai pemicu *switch* IGBT.

Tabel 3.1 Parameter motor DC penguatan *shunt*

Parameter	Nilai
<i>Output Power</i>	10 HP
<i>Speed Rating</i>	2000 RPM atau 209.44 rad/s
<i>Voltage Rating</i>	240 V
<i>Armature Resistance</i>	1,91 Ω
<i>Armature Inductance</i>	0,01 H
<i>Armature Current Rating</i>	69 A
<i>Field Resistance</i>	50 Ω
<i>Field Inductance</i>	0,02 H
<i>Field Current Rating</i>	2,4 A
<i>Moment of Inertia</i>	4,16 N.m

3.2 Pemodelan *Bidirectional Buck-Boost Cascade Converter*

Bidirectional Buck-Boost Cascade Converter dapat beroperasi dengan dua arah yang berbeda. Mode *boost* terjadi ketika motor membutuhkan suplai dari baterai, diasumsikan ketika kendaraan listrik mulai bergerak dari kondisi diam. Sedangkan mode *buck* terjadi ketika terbangkit tegangan dari sisa putaran roda saat turunan tajam dan menyuplai aliran daya ke baterai. Pemodelan rangkaian *Bidirectional Buck-Boost Cascade Converter* tanpa *Fuzzy Logic Controller* dan *Bidirectional Buck-Boost Cascade Converter* dengan *Fuzzy Logic Controller* ditunjukkan oleh gambar berikut.



Gambar 3.2 Pemodelan *Bidirectional Buck-Boost Cascade Converter*

Pada Gambar 3.2 *switch* S1 merupakan *switch* utama ketika konverter beroperasi *motoring*. Kemudian mengatur *switch* S2 pada mode *boost* atau mengatur *switch* S3 pada mode *buck*.

Saat beroperasi *regenerative braking*, *switch* S3 yang aktif. Kemudian mengatur *switch* S4 pada mode *boost* atau mengatur *switch* S2 pada mode *buck*.

Nilai *gain* pada konverter dapat ditingkatkan dengan semakin memperbesar nilai *duty cycle* dari *switch*. Namun *duty cycle* yang diperbolehkan dari setiap *switch* memiliki batasan tertentu. Batasan ini digunakan agar setiap *switch* tidak mengalami *voltage stress* yang berlebih. *Voltage stress* merupakan hal yang wajar dari suatu komponen jika beroperasi sampai kondisi saturasi. *Stress* dari setiap *switch* harus dijaga agar tidak mencapai kondisi saturasi. Jika *stress* mencapai nilai saturasi, maka akan mengakibatkan menurunnya kemampuan *switch* dalam beroperasi. *Voltage stress* berkaitan erat dengan frekuensi

switching yang digunakan. Semakin besar nilai frekuensi menghasilkan *output* tegangan dan arus yang lebih halus, namun kondisi tersebut bertentangan dengan yang terjadi pada *switch*. *Switch* akan bekerja dengan kemampuan ekstra ketika menggunakan frekuensi yang tinggi (diatas 20 kHz), karena waktu saat transien semakin singkat.

Gain rati dan *duty cycle* saat mode *boost* dan mode *buck* pada *Bidirectional Buck Boost Cascade Converter* tanpa *Fuzzy Logic Controller* dapat dituliskan sebagai berikut:

- Mode *boost*

$$Gain = 1 - \frac{D_{cd}}{V_o/V_i} \quad (3.2)$$

- Mode *buck*

$$Gain = \frac{V_o}{V_i} (1 - D_{cu}) \quad (3.3)$$

Pemilihan induktansi induktor didasarkan pada rumus perhitungan sebagai berikut :

$$L = \frac{V_{in} \cdot D_{cu}}{f_s \cdot \Delta I_L} \quad (3.4)$$

Pemilihan kapasitansi kapasitor didasarkan pada rumus perhitungan sebagai berikut:

- Kapasitor 1

$$I_{C_1} = \Delta I_L \cdot \sqrt{\frac{2 D_{cu} + 1}{3 \cdot (1 - D_{cu})}} \quad (3.5)$$

$$C_1 = \frac{1}{V_{C_1}} \int_0^{t_{on}} (i_{C_1})^2 dt_{on} \quad (3.6)$$

- Kapasitor 2

$$I_{C_2} = I_o \cdot \sqrt{\frac{D_{cu}}{1 - D_{cu}}} \quad (3.7)$$

$$C_2 = \frac{1}{v_{c_2}} \int_0^{t_{on}} (i_{c_2})^2 dt_{on} \quad (3.8)$$

Parameter seluruh komponen yang digunakan pada *Bidirectional Buck Boost Cascade Converter* dapat dilihat pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Parameter *bidirectional buck boost cascade converter*

Parameter	Nilai
Kapasitor Sisi Tegangan Rendah	17 mF
Kapasitor Sisi Tegangan Tinggi	148 mF
Induktor	0,84 mH
Frekuensi	20 kHz

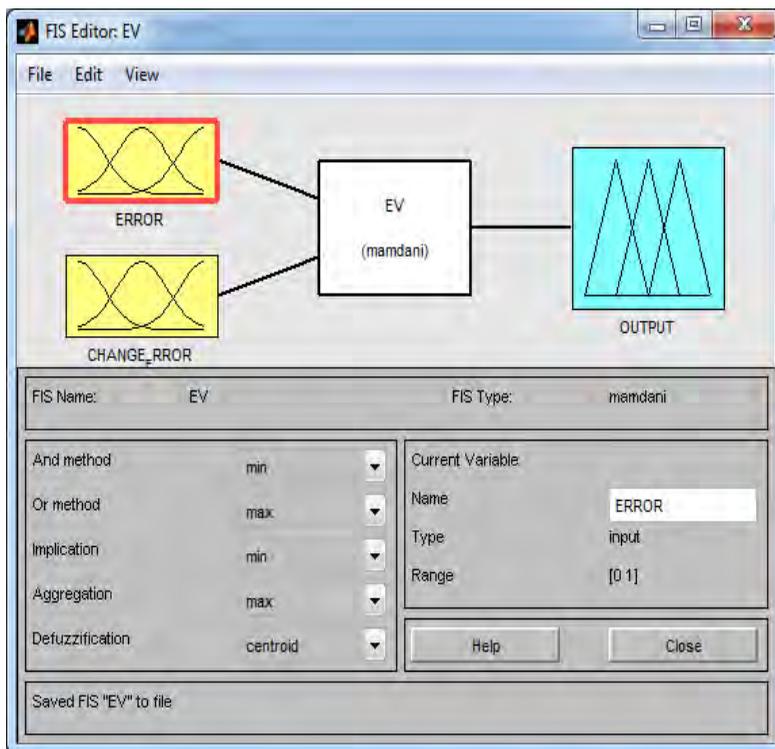
3.3 Pengaturan Kecepatan

Pada pengaturan kecepatan, sinyal referensi yang digunakan diperoleh dari sinyal DC konstan dengan nilai tertentu. Sinyal referensi yang digunakan merupakan sinyal tegangan. Kecepatan aktual dari motor DC disensor terlebih dahulu dengan menggunakan blok *gain* yang isinya merupakan persamaan (3.1). Sehingga ketika dibandingkan kedua sinyal tersebut memiliki satuan yang telah sama. Sebelum dibandingkan pada blok *summary1*, kedua sinyal tersebut memasuki blok *gain* lagi untuk memperkecil nilai amplitude sinyal dengan tujuan agar kontroler *Fuzzy Logic Controller* lebih mudah mengolah data karena nilai *error* yang dihasilkan memiliki *range* yang semakin kecil. *Error* hasil perbandingan diteruskan ke dua jalur yang berbeda. *Output* blok tersebut akan digunakan sebagai sinyal referensi DC pada *comparator*.

3.4 Pemodelan *Fuzzy Logic Controller*

Fuzzy Logic Controller digunakan dalam mengolah sinyal respon kecepatan untuk mendapatkan nominal *duty cycle* yang optimal. *Input* pertama pada *Fuzzy Logic Controller* adalah sinyal *error* yang merupakan selisih respon kecepatan aktual dan kecepatan referensi. *Input* kedua merupakan *delay* yang diberikan untuk mendapatkan evaluasi dari *input* pertama. Setelah didapatkan variabel kecepatan sebagai nilai *input* X dan Y, maka dibuat desain *Fuzzy Inference System* (FIS) untuk mendapatkan *output* Z sebagai nilai *duty cycle*.

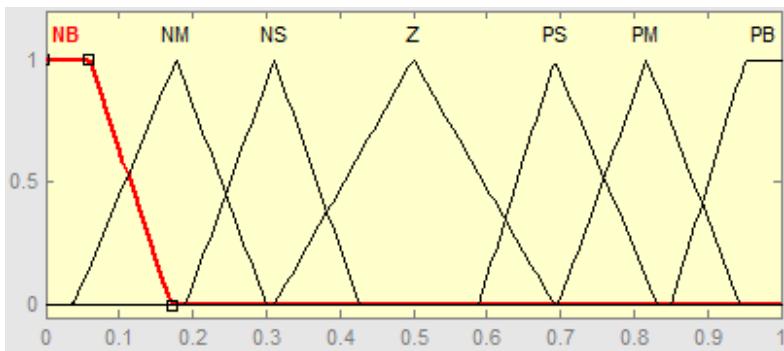
Desain Fuzzy Inference System menggunakan *Graphic User Interface (GUI) Fuzzy Logic Toolbox* dapat dilihat pada gambar 3.3.



Gambar 3.3. Desain *Fuzzy Inference System (FIS)*

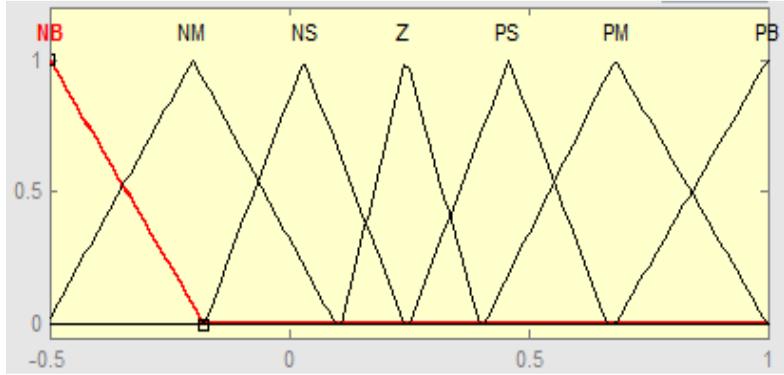
Desain FIS menggunakan parameter : *And method (min)*; *Or method (max)*; *Implication (min)*; *Aggregation (max)*; *Defuzzification (centroid)*.

Pada GUI tersebut terdiri atas beberapa bagian, yaitu : desain *membership function* untuk *input X*, desain *membership function* untuk *input Y*, desain *rule fuzzy*, dan desain *membership function* untuk *output Z*. Desain *membership function* untuk *input X* menggunakan *Graphic User Interface (GUI) Fuzzy Logic Toolbox* dapat dilihat pada gambar 3.4.



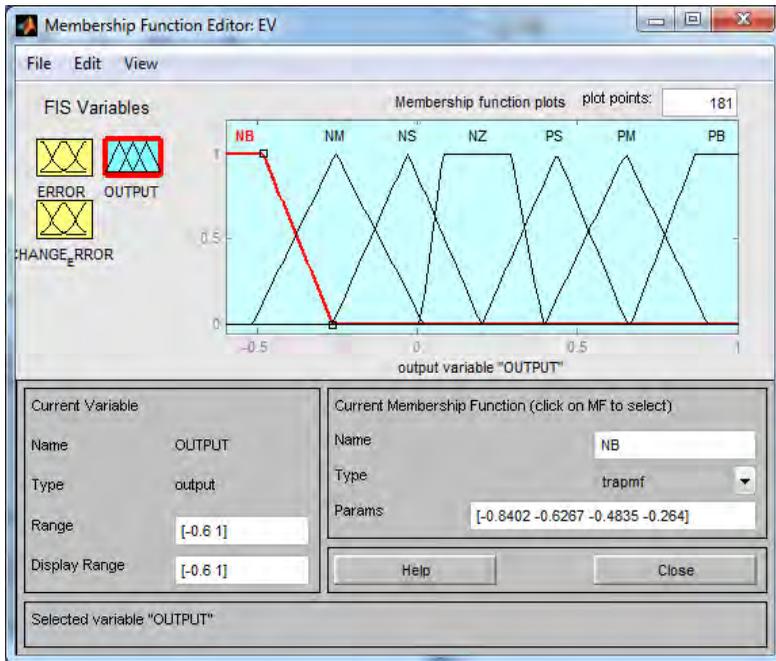
Gambar 3.4. Desain *Membership Function* untuk *input X*

Desain *membership function* untuk *input X* memiliki *range* nominal dari 0 sampai 1, nilai derajat keanggotaan dari 0 sampai 1, dan terdiri atas 7 *membership function* dengan lebar FOU (*Foot Of Uncertainty*) yang bervariasi.



Gambar 3.5. Desain *Membership Function* untuk *input Y*

Desain *membership function* untuk *input Y* memiliki *range* nominal dari -0,5 sampai 1, nilai derajat keanggotaan dari 0 sampai 1, dan terdiri atas 7 *membership function* dengan lebar FOU (*Foot Of Uncertainty*) yang bervariasi.



Gambar 3.6. Desain *Membership Function* untuk *output Z*

Desain *membership function* untuk *output Z* memiliki range nominal dari -0,6 sampai 1, nilai derajat keanggotaan dari 0 sampai 1, dan terdiri atas 7 *membership function* dengan lebar FOU (*Foot Of Uncertainty*) yang bervariasi.

BAB 4

HASIL SIMULASI DAN ANALISIS DATA

Bab ini membahas mengenai hasil simulasi *Bidirectional Buck Boost Cascade Converter* yang terhubung dengan motor DC shunt. Pengujian ini melingkupi cakupan konverter dengan *Fuzzy Logic Controller*. Terdapat tiga pengujian yang dilakukan, yaitu:

1. Pengujian saat *motoring* kondisi jalan datar
2. Pengujian saat *motoring* kondisi menanjak
3. Pengujian *regenerative braking*

Data yang akan dianalisis dari ketiga pengujian tersebut dijabarkan sebagai berikut :

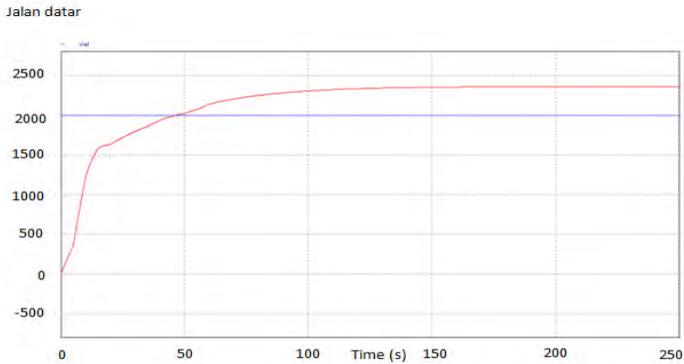
1. Data yang dianalisis pada poin 1 adalah respon kecepatan aktual dan torsi konstan, tegangan *input* dan tegangan *output*, arus *input* dan arus *output*.
2. Data yang dianalisis pada poin 2 adalah respon kecepatan aktual dan torsi berubah, tegangan *input* dan tegangan *output*, arus *input* dan arus *output*.
3. Data yang dianalisis pada poin 3 adalah aliran daya dari motor ke baterai (*storage*) saat terjadi pengereman.

4.1 Simulasi *Motoring* / *Boost Mode* dengan Torsi Konstan

Simulasi *motoring* / *boost mode* dilakukan dengan mengatur Sw1 agar *duty cycle* konstan pada nominal 1, Sw3 agar *duty cycle* konstan pada nominal 0, Sw4 agar *duty cycle* konstan pada nominal 0, dan Sw2 agar *duty cycle* diatur sesuai perhitungan untuk mendapatkan tegangan *input* motor.

Duty cycle diperoleh dari sinyal *output Fuzzy Logic Control* yang telah dibatasi *Limiter*. Hal yang dianalisis dari simulasi ini adalah grafik perubahan kecepatan aktual terhadap kecepatan referensi 2000 rpm.

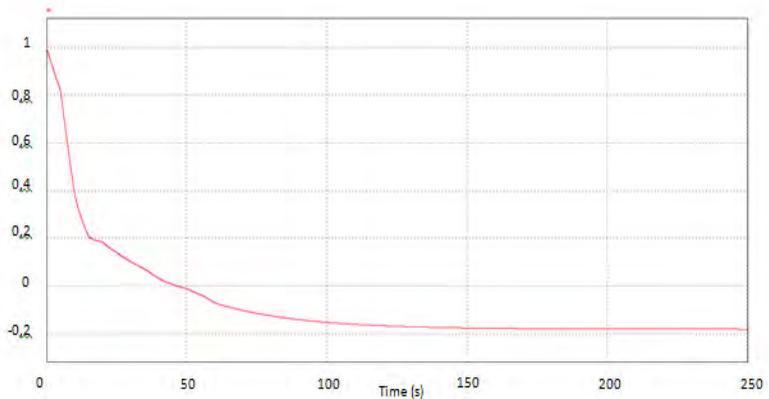
Pada simulasi ini, torsi beban dibatasi konstan pada 6 Nm dengan asumsi jalan datar dan durasi simulasi selama 250 detik. Respon kecepatan aktual terhadap kecepatan referensi saat *motoring* kondisi jalan datar dapat dilihat pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Kurva kecepatan aktual saat *motoring* kondisi jalan datar

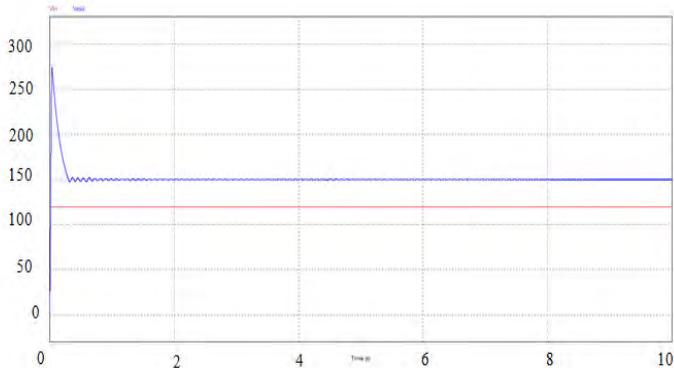
Terlihat Fuzzy Logic Control dapat mengatur kecepatan aktual motor di sekitar kecepatan referensi walau terdapat sedikit *error* kecepatan.

Selisih dari kecepatan referensi dan kecepatan aktual kemudian diskalakan 1:2000 sehingga diperoleh sinyal *error*. Sinyal *error* motoring kondisi jalan lurus dapat dilihat pada gambar 4.2.



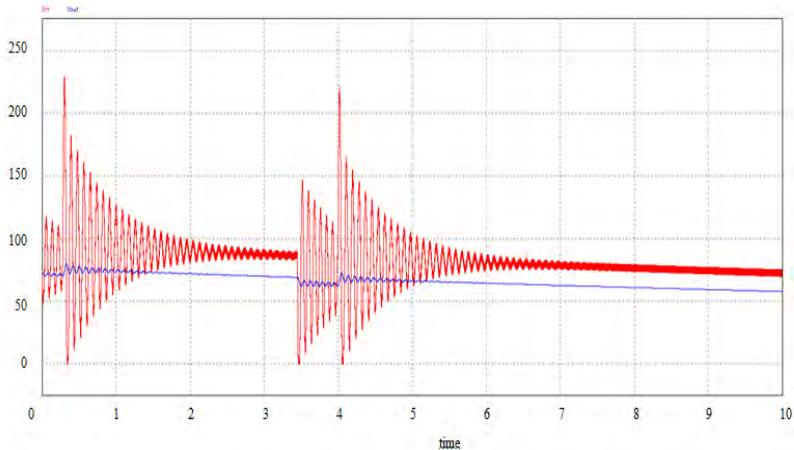
Gambar 4.2 Sinyal *error* saat *motoring* kondisi jalan datar

Sinyal *error* diolah oleh *Fuzzy Logic Control* sebagai sinyal *input* untuk memperoleh sinyal *output* berupa *duty cycle* untuk mengatur saklar pada *Bidirectional Buck-Boost Cascade Converter*. Konverter ini digunakan untuk mengatur tegangan *input* (V_{in}) dari baterai untuk memperoleh tegangan *output* (V_{out}) pada motor. Perbandingan tegangan *input* (V_{in}) terhadap tegangan *output* (V_{out}) *motoring* kondisi jalan datar dapat dilihat pada gambar 4.3.



Gambar 4.3 Perbandingan tegangan *input* (V_{in}) terhadap tegangan *output* (V_{out}) saat *motoring* kondisi jalan datar

Pengaruh aliran daya dari baterai ke motor dipengaruhi oleh pengaturan *Bidirectional Buck-Boost Cascade Converter*. Perbandingan arus *input* (I_{in}) dari baterai terhadap arus *output* (I_{out}) di motor saat *motoring* kondisi jalan datar dapat dilihat pada gambar 4.4



Gambar 4.4 Perbandingan arus *input* (I_{in}) terhadap arus *output* (I_{out}) saat *motoring* kondisi jalan datar

Terlihat *ripple* tegangan dan *ripple* arus sangat dipengaruhi oleh penyaklaran *Bidirectional Buck-Boost Cascade Converter*. *Ripple* tegangan dapat diperhalus menggunakan kapasitor, sedangkan *ripple* arus dipengaruhi oleh induktor pada *Bidirectional Buck-Boost Cascade Converter*.

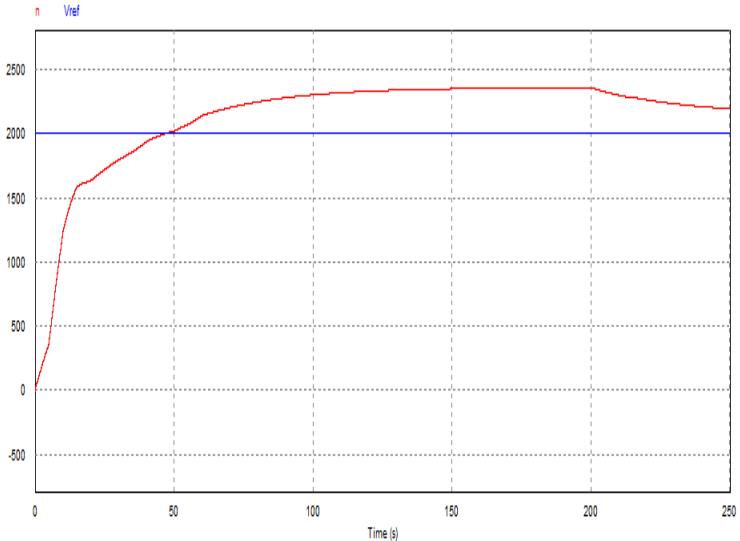
4.2 Simulasi *Motoring / Boost Mode* dengan Perubahan Torsi

Simulasi *motoring / boost mode* dilakukan dengan mengatur Sw_1 agar *duty cycle* konstan pada nominal 1, Sw_3 agar *duty cycle* konstan pada nominal 0, Sw_4 agar *duty cycle* konstan pada nominal 0, dan Sw_2 agar *duty cycle* diatur sesuai perhitungan untuk mendapatkan tegangan *input* motor.

Duty cycle diperoleh dari sinyal *output Fuzzy Logic Control* yang telah dibatasi *Limiter*. Hal yang dianalisis dari simulasi ini adalah grafik perubahan kecepatan aktual terhadap kecepatan referensi 2000 rpm.

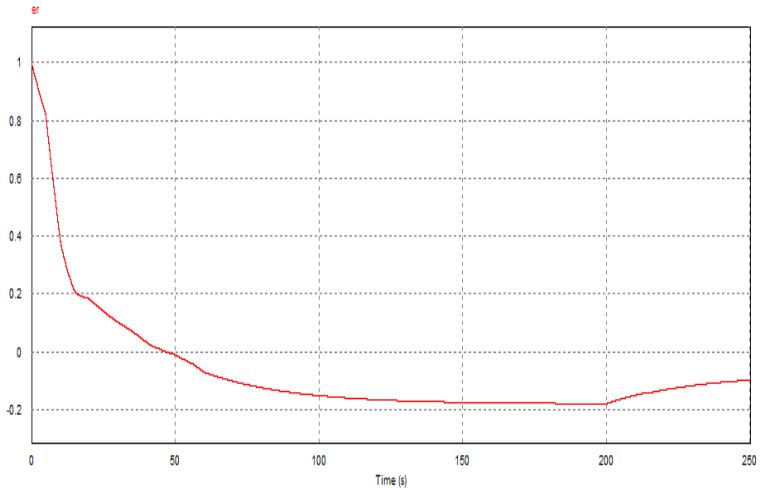
Pada simulasi ini, perubahan torsi beban dibatasi dari 6 Nm ke 9 Nm dengan asumsi perubahan kontur jalan dengan kemiringan mendaki sebesar 30 derajat, dan durasi simulasi selama 250 detik.

Respon kecepatan aktual terhadap kecepatan referensi saat *motoring* kondisi jalan mendaki dapat dilihat pada gambar 4.5.



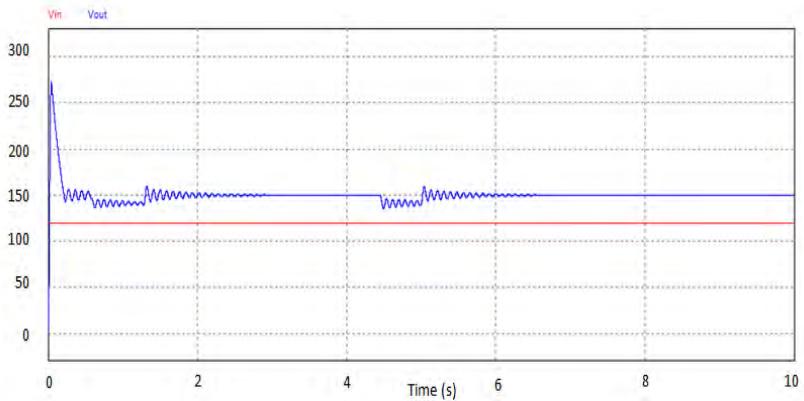
Gambar 4.5 Kurva kecepatan aktual saat *motoring* kondisi jalan mendaki

Walau terdapat perubahan kemiringan jalan, namun *Fuzzy Logic Control* tetap berusaha mengatur kecepatan aktual motor di sekitar kecepatan referensi walau masih terdapat *error* kecepatan. Selisih dari kecepatan referensi dan kecepatan aktual kemudian diskalakan 1:2000 sehingga diperoleh sinyal *error*. Sinyal *error* saat *motoring* kondisi jalan mendaki dapat dilihat pada gambar 4.6.



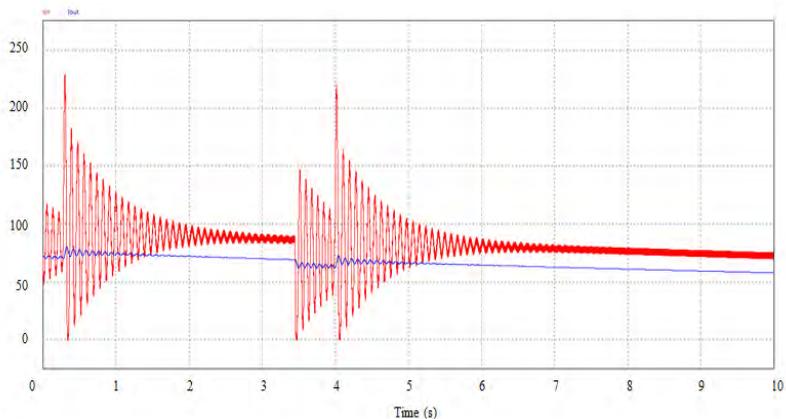
Gambar 4.6 Sinyal *error* saat *motoring* kondisi jalan mendaki

Sinyal *error* diolah oleh *Fuzzy Logic Control* sebagai sinyal *input* untuk memperoleh sinyal *output* berupa *duty cycle* untuk mengatur saklar pada *Bidirectional Buck-Boost Cascade Converter*. Konverter ini digunakan untuk mengatur tegangan *input* (V_{in}) dari baterai untuk memperoleh tegangan *output* (V_{out}) pada motor. Perbandingan tegangan *input* (V_{in}) terhadap tegangan *output* (V_{out}) saat *motoring* kondisi jalan mendaki dapat dilihat pada gambar 4.7.



Gambar 4.7 Perbandingan tegangan *input* (V_{in}) terhadap tegangan *output* (V_{out}) saat *motoring* kondisi jalan mendaki

Pengaruh aliran daya dari baterai ke motor dipengaruhi oleh pengaturan *Bidirectional Buck-Boost Cascade Converter*. Perbandingan arus *input* (I_{in}) dari baterai terhadap arus *output* (I_{out}) di motor saat *motoring* kondisi jalan mendaki dapat dilihat pada gambar 4.8.



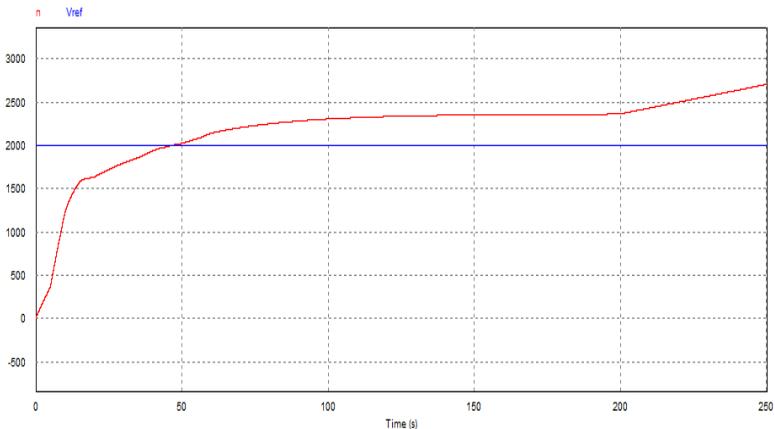
Gambar 4.8 Perbandingan arus *input* (I_{in}) terhadap arus *output* (I_{out}) saat saat *motoring* kondisi jalan mendaki

4.3 Simulasi *Regenerative Braking*

Simulasi *regenerative braking / buck mode* dilakukan dengan mengatur Sw3 agar *duty cycle* konstan pada nominal 1, Sw2 agar *duty cycle* konstan pada nominal 0, Sw4 agar *duty cycle* konstan pada nominal 0, dan Sw1 agar *duty cycle* diatur sesuai perhitungan untuk mendapatkan tegangan *input* motor. *Duty cycle* diperoleh dari sinyal *output Fuzzy Logic Control* yang telah dibatasi *Limiter*.

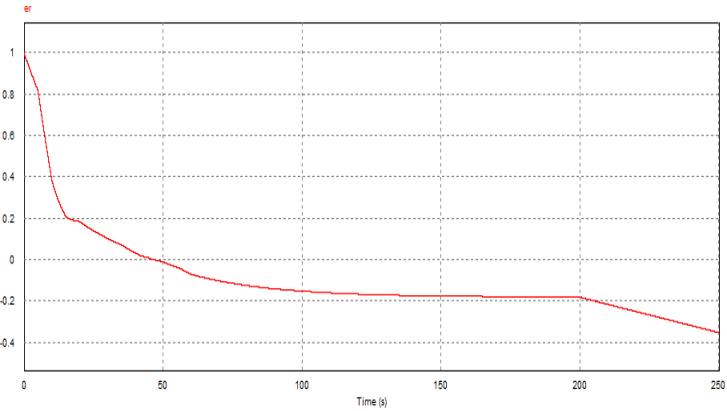
Hal yang dianalisis dari simulasi ini adalah aliran daya dari motor ke baterai sehingga terjadi regeneratif saat diberi pengereman mendadak.

Pada simulasi ini, perubahan torsi beban dibatasi dari 6 Nm ke (-3) Nm dengan asumsi terjadi pengereman mendadak. Respon kecepatan aktual terhadap kecepatan referensi saat *regenerative braking* dapat dilihat pada gambar 4.9.



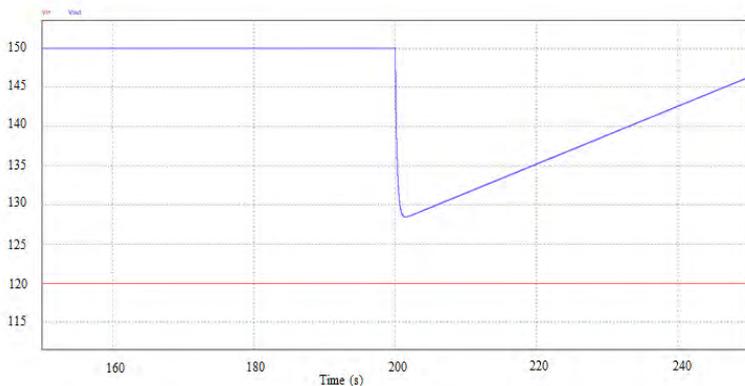
Gambar 4.9 Kurva kecepatan aktual saat *regenerative braking*

Saat terjadi pengereman (*regenerative braking*), kontroler berupaya agar kecepatan aktual berada disekitar kecepatan referensi. Masih terdapat *error* kecepatan karena lambat respon dari shunt motor. Selisih dari kecepatan referensi dan kecepatan aktual kemudian diskalakan 1:2000 sehingga diperoleh sinyal *error*. Sinyal *error* saat *regenerative braking* dapat dilihat pada gambar 4.10.



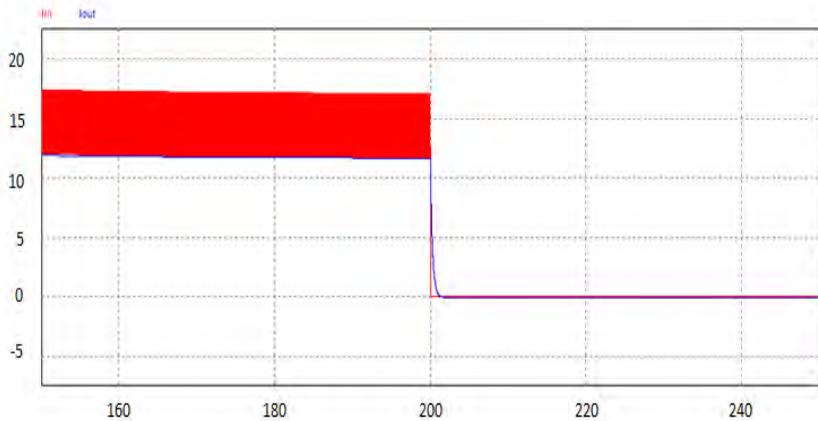
Gambar 4.10 Sinyal *error* saat *regenerative braking*

Sinyal *error* diolah oleh *Fuzzy Logic Control* sebagai sinyal *input* untuk memperoleh sinyal *output* berupa *duty cycle* untuk mengatur saklar pada *Bidirectional Buck-Boost Cascade Converter*. Konverter ini digunakan untuk mengatur tegangan *input* (V_{in}) dari baterai untuk memperoleh tegangan *output* (V_{out}) pada motor. Perbandingan tegangan *input* (V_{in}) terhadap tegangan *output* (V_{out}) saat *regenerative braking* dapat dilihat pada gambar 4.11.



Gambar 4.11 Perbandingan tegangan *input* (V_{in}) terhadap tegangan *output* (V_{out}) saat *regenerative braking*

Pengaruh aliran daya dari baterai ke motor dipengaruhi oleh pengaturan *Bidirectional Buck-Boost Cascade Converter*. Namun saat *regenerative braking*, terbangkit tegangan dari sisa putaran. Energi yang tersimpan pada sisa putaran roda dikembalikan ke baterai. Kondisi ini terjadi saat tegangan terbangkitkan sangat besar dibanding tegangan terminal. Perbandingan arus *input* (I_{in}) dari baterai terhadap arus *output* (I_{out}) di motor saat *regenerative braking* dapat dilihat pada gambar 4.12.



Gambar 4.12 Perbandingan arus *input* (I_{in}) terhadap arus *output* (I_{out}) saat saat *regenerative braking*

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi pada pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

1. Kinerja dari *Bidirectional Buck Boost Cascade Converter* dalam mengatur kecepatan motor DC menjaga kecepatan aktual pada sekitar *rating* 2000 rpm, baik dalam kondisi *motoring* maupun dalam kondisi *regenerative braking*.
2. Pada pengujian pengereman regeneratif, terjadi *charging* walaupun nominal sangat kecil.

5.2 Saran

Saran yang diberikan pada penelitian ini adalah.

1. Dalam menentukan parameter *Fuzzy Logic Controller* agar memperhatikan logika *switching* pada konverter, sehingga *error* yang dihasilkan sangat kecil dan data yang diperoleh menjadi lebih akurat.
2. Dalam menentukan parameter induktor dan kapasitor perlu berdasarkan pada spesifikasi yang ada di pasaran sehingga mudah untuk diaplikasikan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

INDEKS

- A**
Analisis, 23.
Armature Winding, 5
Arus Medan, 6,
Arus Jangkar, 8, 9,
Agregation, 13
- B**
Bidirectional Buck-Boost Cascade Converter, 10, 23, 25, 26, 28, 31, 33.
Buck Mode, 30
Boost Mode, 23, 26
Belitan, 7, 8
Baterai, 1, 11, 15, 17, 23, 25, 28, 29 ,
30, 31, 32
- C**
Charging, 33.
Carrier, 11
Comparator, 11, 19
- D**
DC Motor, 15, 16
Dinamik, 5
Direct Biased, 11
Duty Cycle, 3, 12, 15, 16
- E**
Error, 24, 25, 27, 28, 30, 31, 33.
Excitation Winding, 5
- F**
Frekuensi, 11, 17, 18, 19
Fuzzy Logic Controller, 12, 23, 33.
Fluks, 5, 6, 7, 9,
Field Winding, 5
- G**
Generator, 8, 11
Generating, 11
- H**
Hukum Faraday, 5
- I**
Induktor, 7, 10, 26, 33.
Input, 23, 25, 26, 28, 29, 30, 31, 32.
- K**
Kecepatan aktual, 1, 23, 24, 26, 27, 30,
33.
Kapasitor, 26, 33.
Konverter, 23, 25, 28, 31, 33.
Kumparan Medan, 5
Kumparan Jangkar, 5, 6, 7
Kumparan Tertutup, 7
Kutub Menonjol, 5
Kutub Medan, 5
Komutator, 7
- L**
Lilitan Medan, 5
- M**
Mesin Listrik, 5, 7
Motor DC, 23,
Motoring, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29,
33.
Mobil Listrik, 11.
Medan Magnet, 5
Metode, 1, 2, 3, 6
- N**
Nominal, 23, 26, 30, 33.
- O**
Output, 23, 25, 26, 28, 29, 30, 31, 32.
- P**
Pengereman Regeneratif, 10, 33.
Parameter, 33.
- R**
Regenerative Braking, 11, 23, 31, 33.
Rating, 33.
- S**
Simulasi, 23, 26, 30.
Switching, 33.
Spesifikasi, 33.

Shunt, 5, 6, 9, 23

Storage, 23

T

Tegangan, 5, 6, 8, 10, 11, 15, 16, 19,
31.

Torsi, 1, 2, 23

INDEKS

- A**
Analisis, 23.
Armature Winding, 5
Arus Medan, 6,
Arus Jangkar, 8, 9,
Agregation, 13
- B**
Bidirectional Buck-Boost Cascade Converter, 10, 23, 25, 26, 28, 31, 33.
Buck Mode, 30
Boost Mode, 23, 26
Belitan, 7, 8
Baterai, 1, 11, 15, 17, 23, 25, 28, 29 ,
30, 31, 32
- C**
Charging, 33.
Carrier, 11
Comparator, 11, 19
- D**
DC Motor, 15, 16
Dinamik, 5
Direct Biased, 11
Duty Cycle, 3, 12, 15, 16
- E**
Error, 24, 25, 27, 28, 30, 31, 33.
Excitation Winding, 5
- F**
Frekuensi, 11, 17, 18, 19
Fuzzy Logic Controller, 12, 23, 33.
Fluks, 5, 6, 7, 9,
Field Winding, 5
- G**
Generator, 8, 11
Generating, 11
- H**
Hukum Faraday, 5
- I**
Induktor, 7, 10, 26, 33.
Input, 23, 25, 26, 28, 29, 30, 31, 32.
- K**
Kecepatan aktual, 1, 23, 24, 26, 27, 30,
33.
Kapasitor, 26, 33.
Konverter, 23, 25, 28, 31, 33.
Kumparan Medan, 5
Kumparan Jangkar, 5, 6, 7
Kumparan Tertutup, 7
Kutub Menonjol, 5
Kutub Medan, 5
Komutator, 7
- L**
Lilitan Medan, 5
- M**
Mesin Listrik, 5, 7
Motor DC, 23,
Motoring, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29,
33.
Mobil Listrik, 11.
Medan Magnet, 5
Metode, 1, 2, 3, 6
- N**
Nominal, 23, 26, 30, 33.
- O**
Output, 23, 25, 26, 28, 29, 30, 31, 32.
- P**
Pengereman Regeneratif, 10, 33.
Parameter, 33.
- R**
Regenerative Braking, 11, 23, 31, 33.
Rating, 33.
- S**
Simulasi, 23, 26, 30.
Switching, 33.
Spesifikasi, 33.

Shunt, 5, 6, 9, 23

Storage, 23

T

Tegangan, 5, 6, 8, 10, 11, 15, 16, 19,
31.

Torsi, 1, 2, 23

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Zuhail, “Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya”, Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 1993
- [2] Ashari Mochamad, “Sistem Konverter DC, Desain Rangkaian Elektronika Daya”, ITS Press, Surabaya, 2012
- [3] Caricchi, F., Crescimbeni, F., “Study of Bi-Directional Buck-Boost Converter Topologies for Application in Electrical Vehicle Motor Drives”, IEEE, 1998.
- [4] K. I. Hwu dan Y.T.Yau, “*High Step-Up Converter Based on Charge Pump and Boost Converter*”, IEEE Transactions On Power Electronics Vol. 27, No. 5, May 2012
- [5] Rashid M.H, “*Power Electronics Handbook*”, Academic Press, USA, 2001
- [6] “*Basic Calculation of a Boost Converter's Power Stage*”, Texas Instruments, November 2009
- [7] P.C. Krause, “*Analysis of Electric Machinery and Drive System, 2nd*”, IEEE Press, 2002
- [8] Jimmie J. Cathey, “Electricmachines – Analysis and Design applying MATLAB”, McGraw-Hill, 2001.

Halaman ini sengaja dikosongkan

RIWAYAT HIDUP



Muhammad Taufiq Ramadhan lahir di Makassar pada tanggal 31 Maret 1990. Penulis adalah anak pertama dari dua bersaudara pasangan Bambang Moelyono dan Ramlah Maricar. Penulis mengawali kegiatan akademis di SDN Monginsidi 1 Makassar pada tahun 1996, kemudian melanjutkan ke SMP Islam Athirah pada tahun 2002, dan SMAN 1 Makassar pada tahun 2005. Tahun 2008 penulis melanjutkan program pendidikan S1 di Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember dengan bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Selama dalam perkuliahan, penulis aktif berorganisasi di Himpunan Mahasiswa Islam (HMI) komisariat Elektro Sepuluh Nopember cabang Surabaya sebagai sekretaris umum, di Lembaga Teknologi Mahasiswa Islam (LTMI) HMI cabang Surabaya sebagai Direktur Rekayasa Teknologi, dan di Ikatan Kekeluargaan Mahasiswa/Pelajar Indonesia (IKAMI) Sulawesi Selatan cabang Surabaya. Penulis juga aktif sebagai member di Laboratorium Power System Operation and Control (PSOC). Penulis dapat dihubungi melalui alamat e-mail : atreides_03@yahoo.com

Halaman ini sengaja dikosongkan