



**KENDALI KECEPATAN *BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR*  
MENGUNAKAN *BACK-EMF ZERO CROSSING*  
DENGAN METODE *SIX STEP COMMUTATION***

**SKRIPSI**

Oleh

**Gali Ganatama  
NIM 101910201060**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK ELEKTRO  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS JEMBER  
2014**



**KENDALI KECEPATAN *BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR*  
MENGUNAKAN *BACK-EMF ZERO CROSSING*  
DENGAN METODE *SIX STEP COMMUTATION***

**SKRIPSI**

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Studi Teknik Elektro (S1) dan mencapai gelar Sarjana Teknik

Oleh

**Gali Ganatama  
NIM 101910201060**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK ELEKTRO  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS JEMBER  
2014**

## PERSEMBAHAN

Syukur Alhamdulillah segala puji bagi Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan karunia-Nya kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “**Kendali Kecepatan *Brushless Direct Current Motor* Menggunakan *Back-emf Zero Crossing* dengan Metode *Six Step Commutation*”** dan skripsi ini merupakan gerbang awal dalam mencapai kesuksesan yang lebih baik lagi.

Untuk itu saya ingin mempersembahkan karya ini kepada:

1. Kedua orang tua, Ibu tersayang Maryati dan almarhum bapak tercinta Mukholik serta adik kecil Ghilang Surya Manuril yang selalu menjadi semangat dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Dosen-dosen pembimbing skripsi Bapak Dr. Ir. Bambang Sujanarko M.M. dan Bapak Suprihadi Prasetyono, S.T., M.T. yang telah memberikan pengarahan dan kesabaran untuk membimbing saya demi terselesaikannya skripsi ini.
3. Para pahlawan tak kenal jasa semenjak saya SD, SMP, SMA dan sampai dengan Bapak dan Ibu dosen di perguruan tinggi yang telah banyak memberikan ilmu yang bermanfaat bagi saya.
4. Kawan seperjuangan, Onki, Terry, Yusqi, Angga dan Uyab
5. Keluarga besar Teknik Elektro angkatan 2010, terima kasih atas dukungan dan inspirasinya.
6. Almamater Fakultas Teknik Universitas Jember.
7. Bangsa dan Negaraku Indonesia yang tercinta.

## **MOTTO**

Siapapun orangnya yang membiarkan waktu mengatur dirinya, ia akan mengalami  
hidup sebagai seorang budak

(John Arthorne)

Rencanakanlah yang akan kau lakukan dan lakukanlah yang telah kau rencanakan

(Mario Teguh)

Hiduplah seakan engkau akan mati besok dan belajarlah  
seakan engkau akan hidup selamanya

(Mahatma Gandhi)

Jika anda memiliki keberanian untuk memulai,  
anda juga memiliki keberanian untuk sukses

(David Viscoot)

## PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini

Nama : Gali Ganatama

NIM : 101910201060

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Kendali Kecepatan *Brushless Direct Current Motor* Menggunakan *Back-emf Zero Crossing* dengan *Metode Six Step Commutation*” adalah benar-benar karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah ada disebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi mana pun, serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak mana pun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata dikemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 31 Desember 2014

Yang menyatakan,

Gali Ganatama

NIM. 101910201060

**SKRIPSI**

**KENDALI KECEPATAN *BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR*  
MENGUNAKAN *BACK-EMF ZERO CROSSING*  
DENGAN METODE *SIX STEP COMMUTATION***

Oleh

Gali Ganatama

NIM 101910201060

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Dr. Ir. Bambang Sujanarko M.M.

Dosen Pembimbing Anggota : Surihadi Prasetyono, S.T., M.T.

## PENGESAHAN

Skripsi yang berjudul “**Kendali Kecepatan *Brushless Direct Current Motor* Menggunakan *Back-emf Zero Crossing* dengan Metode *Six Step Commutation*” telah diuji dan disahkan pada:**

hari, tanggal : Rabu, 31 Desember 2014

tempat : Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember

Tim Penguji :

Pembimbing Utama,

Pembimbing Anggota,

Dr. Ir. Bambang Sujanarko M.M.  
NIP. 19631201 199402 1 002

Supriyadi Prasetyono, S.T., M.T.  
NIP. 19700404 199601 1 001

Penguji 1,

Penguji II,

Dr. Triwahju Hardianto, S.T., M.T.  
NIP. 19700826 199702 1 001

Ir. Widyono Hadi, M.T.  
NIP. 19610414 198902 1 001

Mengesahkan,

Dekan Fakultas Teknik,

Ir. Widyono Hadi, M.T.  
NIP. 19610414 198902 1 001

**KENDALI KECEPATAN *BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR*  
MENGUNAKAN *BACK-EMF ZERO CROSSING*  
DENGAN METODE *SIX STEP COMMUTATION***

**Gali Ganatama**

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember

**ABSTRAK**

Di tengah krisisnya minyak dunia, teknologi transportasi semakin berkembang menuju penggunaan energi yang ramah lingkungan seperti mobil listrik. Secara umum mobil listrik menggunakan motor jenis *brushless direct current* (BLDC) yang memerlukan *hall sensor* sebagai sensor pendeteksi posisi motor untuk melakukan proses pengendalian kecepatan motor. Pengendalian motor pada mobil listrik umumnya menggunakan *six step commutation*. Penggunaan *hall sensor* ini seringkali menjadi masalah dalam proses commutation karena rusak dan perlu usaha lebih dalam menggantinya dengan *hall sensor* yang baru karena letaknya di dalam motor. Oleh karena itu rangkaian *back-emf zero crossing* dipakai menggantikan *hall sensor* untuk meminimalkan kekurangan penggunaan *hall sensor*. Proses pengendalian motor BLDC ini menggunakan metode yang sama yaitu *six step commutation* yang diprogram menggunakan mikrokontroler serta menggunakan inverter dengan parallel mosfet serta untuk kendali kecepatan motor menggunakan PWM analog. Dari penelitian yang telah dilakukan diketahui bahwa dengan parameter yang sama range kecepatan menggunakan *back-emf zero crossing* lebih rendah dari pada *hall sensor* yaitu dari 41.5 rpm s/d 113.1 rpm, sedangkan pada *hall sensor* 28.4 rpm s/d 119.4 rpm. Sehingga penggunaan *hall sensor* masih dianggap lebih baik dari pada penggunaan *back-emf zero crossing* dalam segi kecepatan. Oleh karena *back-emf zero crossing* lebih mudah pemeliharaannya, perlu adanya penelitian lebih lanjut tentang *back-emf zero crossing* untuk memaksimalkan kecepatan motor.

**Kata Kunci:** BLDC, *back-emf zero crossing*, *six step commutation*.



***SPEED CONTROL OF BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR  
USING BACK-EMF ZERO CROSSING  
WITH SIX-STEP COMMUTATION METHOD***

**Gali Ganatama**

*Electrical of Technology Departement, Technology of Faculty, Universitas Jember*

***ABSTRACT***

*Its meltdown in the middle of the world's oil, increasing transportation technology to the use of environmentally friendly energy such as electric cars. Electric cars generally use a motor species of brushless direct current (BLDC) which require a hall sensor position detection sensor as a motor to do the process of controlling the speed of the motor. Motor control on electric cars generally use six step commutation. Use of hall sensor is often a problem in the process of commutation because corrupted and needs to be more effort in replacing them with the new sensor hall located inside the motor. It is therefore a series of back-emf zero crossing worn replace the hall sensor to minimize the lack of use of hall sensors. Process control of BLDC motor using the same method that the six step commutation are programmed using a microcontroller and using the inverter with mosfet and parallel to motor speed control using PWM analogue. From the research that has been done it is known that with the same range of speed parameters using back-emf zero crossing lower than on hall sensors from 41.5 rmp s/d 113.1 rpm, while the hall sensor 28.4 rpm s/d 119.4 rpm. So the use of hall sensors are still considered better than the use of back-emf zero crossing in terms of speed. Because of the back-emf zero crossing easier maintenance, the need for further research concerning the back-emf zero crossing to maximize the speed of the motor.*

***Keywords:*** BLDC, back-emf zero crossing, six step commutation.

## RINGKASAN

**Kendali Kecepatan *Brushless Direct Current Motor* Menggunakan *Back-emf Zero Crossing* dengan Metode *Six Step Commutation*; Gali Ganatama; 101910201060; 2014:77 Halaman; Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik; Universitas Jember.**

Saat ini, perkembangan teknologi semakin pesat dari teknologi informasi maupun teknologi transportasi. Teknologi transportasi kini pun terus mengalami perkembangan dalam penggunaan energi yang ramah lingkungan mengingat kondisi minyak dunia yang semakin menurun jumlahnya. Para pengembang teknologi transportasi ini mulai melirik penggunaan listrik sebagai energi penggerak mobil listrik karena bersifat ramah lingkungan. Secara umum mobil listrik yang dikembangkan sekarang ini menggunakan jenis motor tanpa sikat dan bersumber tegangan DC yaitu yang sering disebut *brushless direct current* (BLDC). Penggunaan motor BLDC ini pun juga memerlukan adanya kendali untuk mengatur kecepatan putarnya. Pengendalian ini umumnya menggunakan sensor hall yang susah dalam pemeliharaannya karena letaknya yg ada di dalam stator motor.

Berdasarkan permasalahan di atas maka dirasa perlu untuk melakukan studi untuk dapat membuat meminimalkan masalah penggunaan sensor hall sebagai sensor pendeteksi posisi rotor. *Back-emf* motor BLDC menjadi pilihan alternatif penggantian penggunaan sensor hall karena lebih murah dan letaknya yang fleksibel memudahkan pemeliharaannya. Studi tersebut akan dilaksanakan di Laboratorium Fakultas Teknik. Perancangan blok diagram sistem dari pokok bahasan studi skripsi ini ada 5 poin utama yaitu sumber yang menggunakan aki 12 volt, Motor BLDC berkapasitas 500 watt, inverter tiga fasa dan driver motor beserta pengendali berupa PWM analog serta rangkaian pendeteksi *back-emf zero crossing*.

Dari pengujian sistem, didapatkan ada perbedaan hasil kecepatan yang dikendalikan pada penggunaan *back-emf zero crossing* dan penggunaan *hall sensor*. Sesuai pengujian yang dilakukan bahwa dengan parameter yang sama range kecepatan menggunakan *back-emf zero crossing* lebih rendah dari pada *hall sensor* yaitu dari 41.5 rpm s/d 113.1 rpm, sedangkan pada *hall sensor* 28.4 rpm s/d 119.4 rpm. Hal ini menandakan bahwa dari segi kecepatan sensor hall masih lebih unggul dari pada penggunaan *back-emf zero crossing*.

## PRAKATA

*Bismillahirrohmanirrohim*

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya serta shalawat dan salam kepada junjungan Nabi besar Muhammad SAW sebagai motivasi dan inspirasi untuk terus melangkah kedepan dengan penuh optimis sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "**Kendali Kecepatan *Brushless Direct Current Motor Menggunakan Back-emf Zero Crossing dengan Metode Six Step Commutation***". Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Terselesaikannya skripsi ini tidak lepas dari bantuan serta dukungan dari berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua, Ibu tersayang Maryati dan almarhum bapak tercinta Mukholik serta adik kecil Ghilang Surya Manuril yang selalu menjadi semangat dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Dosen-dosen pembimbing skripsi Bapak Dr. Ir. Bambang Sujanarko M.M. dan Bapak Suprihadi Prasetyono, S.T., M.T. yang telah memberikan pengarahan dan kesabaran untuk membimbing saya demi terselesaikannya skripsi ini.

Kritik dan saran diharapkan terus mengalir untuk lebih menyempurnakan tugas akhir ini dan diharapkan dapat dikembangkan untuk penelitian-penelitian selanjutnya.

Jember, 31 Desember 2014

Penulis

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>PERSEMBAHAN</b> .....	ii
<b>MOTTO</b> .....	iii
<b>PERNYATAAN</b> .....	iv
<b>SKRIPSI</b> .....	v
<b>PENGESAHAN</b> .....	vi
<b>ABSTRAK</b> .....	vii
<b>RINGKASAN</b> .....	ix
<b>PRAKATA</b> .....	xi
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xv
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xvi
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xix
<b>BAB 1. PENDAHULUAN</b> .....	1
<b>1.1 Latar Belakang</b> .....	1
<b>1.2 Rumusan Masalah</b> .....	2
<b>1.3 Batasan Masalah</b> .....	2
<b>1.4 Tujuan</b> .....	3
<b>1.5 Manfaat</b> .....	3
<b>1.6 Sistematika Pembahasan</b> .....	3
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	4
<b>2.1 Motor Brushless Direct Current (BLDC)</b> .....	4
2.1.1 Gambaran Umum Motor BLDC .....	4
2.1.2 Model Sistem Motor BLDC .....	5
2.1.3 Prinsip Kerja BLDC .....	6

2.2 Inverter .....	8
2.3 Metode <i>Six Step Commutation</i> .....	9
2.4 Sensor Hall .....	10
2.5 Mikrokontroler .....	11
2.6 Back-emf dan Zero Crossing .....	14
2.7 Pulse Width Modulation (PWM) .....	18
2.7.1 Dasar Pembangkitan PWM .....	18
2.7.2 Pengaturan Kecepatan dengan Kontrol PWM .....	21
<b>BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	24
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian .....	24
3.1.1 Tempat Penelitian .....	24
3.1.2 Waktu Penelitian .....	24
3.2 Alat dan Bahan .....	24
3.3 Diagram Alir Penelitian .....	25
3.4 Blok Diagram Sistem .....	27
3.4.1. Motor BLDC .....	28
3.4.2. Sumber Energi .....	29
3.4.2.1. Baterai .....	29
3.4.2.2. <i>Power Supply</i> .....	29
3.4.3. Inverter 3 Fasa dan Driver Mosfet .....	30
3.4.4. Filter Pendeteksi Sinyal Back-emf .....	33
3.4.5. <i>Controller</i> (Pusat Kendali) .....	35
3.5 Metode <i>Six Step Commutation</i> .....	38
<b>BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	42
4.1 Pengujian Rangkaian Filter <i>Back-emf Zero Crossing</i> .....	42
4.2 Pengujian Rangkaian Digital .....	44
4.3 Pengujian dan Analisa Sinyal PWM .....	46
4.4 Pengujian dan Analisa Kecepatan Motor .....	50
4.4.1 Pengujian pada PWM 5.14 KHz .....	50
4.4.2 Pengujian pada PWM 14.51 KHz .....	52

4.4.3	Pengujian pada PWM 26.36 KHz .....	55
4.4.4	Pengujian pada <i>Duty Cycle</i> 25% .....	58
4.4.5	Pengujian pada <i>Duty Cycle</i> 40% .....	59
4.4.6	Pengujian pada <i>Duty Cycle</i> 70% .....	61
4.4.7	Pengujian pada <i>Duty Cycle</i> 100% .....	63
<b>BAB 5. PENUTUP</b> .....		66
<b>5.1 Kesimpulan</b> .....		66
<b>5.2 Saran</b> .....		66
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....		67
<b>LAMPIRAN</b> .....		69

## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Spesifikasi Motor BLDC .....	28
Tabel 3.2 Tabel Logika Sistem <i>Switching</i> pada Inverter BLDC.....	38
Tabel 3.3 Penyederhanaan Menggunakan Peta <i>Karnaugh</i> .....	40
Tabel 4.1 Hasil Pengujian Rangkaian <i>Filter Back-emf</i> dengan <i>Zero Crossing</i> .....	41
Tabel 4.2 Pengujian Rangkaian Digital .....	45
Tabel 4.3 Hubungan Frekuensi PWM, D dan Bentuk Sinyal PWM .....	46
Tabel 4.4 Hasil Pengukuran Kecepatan Motor BLDC pada PWM 5.14 KHz.....	50
Tabel 4.5 Hasil Pengukuran Kecepatan Motor BLDC pada PWM 14.51 KHz.....	52
Tabel 4.6 Hasil Pengukuran Kecepatan Motor BLDC pada PWM 26.36 KHz.....	55
Tabel 4.7 Hasil Pengukuran Kecepatan Motor BLDC pada <i>Duty Cycle</i> 25%.....	57
Tabel 4.8 Hasil Pengukuran Kecepatan Motor BLDC pada <i>Duty Cycle</i> 40%.....	59
Tabel 4.9 Hasil Pengukuran Kecepatan Motor BLDC pada <i>Duty Cycle</i> 70%.....	61
Tabel 4.10 Hasil Pengukuran Kecepatan Motor BLDC pada <i>Duty Cycle</i> 100%....	63



## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Bagian Utama Motor.....	4
Gambar 2.2 Rangkaian Ekuivalen dari Motor BLDC.....	5
Gambar 2.3 Tegangan Stator BLDC.....	7
Gambar 2.4 Inverter 3 Fasa.....	8
Gambar 2.5 Mode Konduksi $120^0$ .....	9
Gambar 2.6 Algoritma PWM <i>Six Step</i> .....	10
Gambar 2.7 Gelombang <i>Trapezoid</i> 3 Fasa.....	10
Gambar 2.8 Penempatan Sensor Hall pada Stator .....	11
Gambar 2.9 Konfigurasi Port Mikrokontroler AVR ATmega16.....	14
Gambar 2.10 Fasa Floating pada Metode <i>Six Step</i> .....	16
Gambar 2.11 Penggunaan <i>Neutral Point</i> .....	17
Gambar 2.12 Penggunaan <i>Virtual Neutral Point</i> .....	17
Gambar 2.13 Blok Diagram Pembangkit Sinyal PWM .....	19
Gambar 2.14 Proses Pembangkitan Sinyal .....	19
Gambar 2.15 <i>Clear Up</i> dan <i>Clear Down</i> .....	20
Gambar 2.16 Sinyal PWM dengan Variasi <i>Duty Cycle</i> .....	21
Gambar 2.17 <i>Upper Phase</i> PWM .....	22
Gambar 2.18 <i>Lower Phase</i> PWM .....	22
Gambar 2.19 <i>Pre-sixty Degree</i> PWM.....	23
Gambar 2.20 <i>Post-sixty Degree</i> PWM.....	23
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian .....	25
Gambar 3.2 Blok Diagram Sistem .....	27
Gambar 3.3 Motor BLDC .....	29
Gambar 3.4 Baterai Aki .....	29
Gambar 3.5 Rangkaian <i>Power Supply</i> .....	30

Gambar 3.6 IC <i>Otocouple</i> .....	30
Gambar 3.7 Rangkaian Skematik Driver Mosfet .....	31
Gambar 3.8 Rangkaian Driver Mosfet .....	31
Gambar 3.9 Rangkaian Skematik Inverter Tiga Fasa .....	32
Gambar 3.10 Rangkaian Inverter Tiga Fasa .....	32
Gambar 3.11 <i>Zero Crossing</i> dengan Titik Netral Fasa Motor .....	33
Gambar 3.12 <i>Zero Crossing</i> dengan Titik <i>Virtual Neutral</i> Fasa Motor .....	34
Gambar 3.13 Rangkaian Skematik <i>Filter Back-emf Zero Crossing</i> .....	34
Gambar 3.14 Rangkaian Skematik <i>Virtual Neutral Point</i> .....	35
Gambar 3.15 Rangkaian <i>Filter Back-emf Zero Crossing</i> .....	35
Gambar 3.16 Skematik Sistem Minimum.....	36
Gambar 3.17 Pembentuk Gelombang PWM.....	37
Gambar 3.18 Urutan <i>Switch</i> Q1-Q6.....	39
Gambar 4.1 PWM Beda Frekuensi .....	48
Gambar 4.2 Pada Frekuensi 14.09911 KH Duty Cycle 20% .....	49
Gambar 4.3 Pada Frekuensi 14.09911 KH Duty Cycle 60% .....	49
Gambar 4.4 Grafik Hubungan VL, IL dan RPM pada PWM 5.14 KHz.....	51
Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Penggunaan <i>Back-emf</i> dan <i>Hall Sensor</i> pada PWM 5.14 KHz.....	52
Gambar 4.6 Grafik Hubungan VL, IL dan RPM pada PWM 14.51 KHz.....	54
Gambar 4.7 Grafik Perbandingan Penggunaan <i>Back-emf</i> dan <i>Hall Sensor</i> pada PWM 14.51 KHz.....	54
Gambar 4.8 Grafik Hubungan VL, IL dan RPM pada PWM 26.36 KHz.....	56
Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Penggunaan <i>Back-emf</i> dan <i>Hall Sensor</i> pada PWM 26.36 KHz.....	57
Gambar 4.10 Grafik Perbandingan Penggunaan <i>Back-emf</i> dan <i>Hall Sensor</i> pada D 25% .....	59
Gambar 4.10 Grafik Perbandingan Penggunaan <i>Back-emf</i> dan <i>Hall Sensor</i> pada D 40% .....	61
Gambar 4.10 Grafik Perbandingan Penggunaan <i>Back-emf</i> dan <i>Hall Sensor</i>	

pada D 70% .....	63
Gambar 4.10 Grafik Perbandingan Penggunaan <i>Back-emf</i> dan <i>Hall Sensor</i>	
pada D 100% .....	65

## DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
A Data Sheet Komponen.....	69
B Listing Program di Mikrokontroler ATmega16.....	71
C Dokumentasi Alat.....	74