



PROYEK AKHIR

PENGATURAN KECEPATAN MOTOR BLDC (*BRUSHLESS DIRECT CURRENT*) MENGGUNAKAN DETEKSI TEGANGAN BACK EMF ZERO CROSSING DENGAN METODE SIX STEP COMMUTATION

Muhammad Rizani Rusli
NRP. 1310.131.024

Dosen Pembimbing :

Dr. Arman Jaya, S.T., M.T.
NIP. 19660208. 198903. 1. 002

Endro Wahjono, S.ST., M.T.
NIP. 19681109. 199103. 1. 012

PROGRAM STUDI DIPLOMA IV TEKNIK ELEKTRO INDUSTRI
POLITEKNIK ELEKTRONIKA NEGERI SURABAYA

SURABAYA
2017



PROYEK AKHIR

PENGATURAN KECEPATAN MOTOR BLDC (*BRUSHLESS DIRECT CURRENT*) MENGGUNAKAN DETEKSI TEGANGAN BACK EMF ZERO CROSSING DENGAN METODE SIX STEP COMMUTATION

Muhammad Rizani Rusli
NRP. 1310.131.024

Dosen Pembimbing :

Dr. Arman Jaya, S.T., M.T.
NIP. 19660208. 198903. 1. 002

Endro Wahjono, S.ST., M.T.
NIP. 19681109. 199103. 1. 012

**PROGRAM STUDI DIPLOMA IV TEKNIK ELEKTRO INDUSTRI
POLITEKNIK ELEKTRONIKA NEGERI SURABAYA**

**SURABAYA
2017**

PENGATURAN KECEPATAN MOTOR BLDC (BRUSHLESS DIRECT CURRENT) MENGGUNAKAN DETEKSI TEGANGAN BACK EMF ZERO CROSSING DENGAN METODE SIX STEP COMMUTATION

Oleh:

Muhammad Rizani Rusli

NRP. 1310131024

Proyek Akhir ini Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk
Memperoleh Gelar Sarjana Sains Terapan (S.ST.)
di Politeknik Elektronika Negeri Surabaya

Disetujui oleh:

Tim Penguji Proyek Akhir :

Dosen Pembimbing :

1. Ir. Hendrik Eko Hadi S., M.T.
NIP. 19621122.198701.1.001

1. Dr. Arman Java, S.T., M.T.
NIP. 19660208.198903.1.002

2. Ainur Rofiq Nansur, S.T., M.T.
NIP. 19640713.198903.1.005

2. Endro Wahjono, S.ST., M.T.
NIP. 19681109.199103.1.012

3. Renny Rakhmawati, S.T., M.T.
NIP. 19721024.199903.2.001



Mengetahui,
Kemendikbud RI

Epyk Sunarno, S.ST., M.T.
NIP.19620723.199103.1.002



ABSTRAK

ABSTRAK

Motor BLDC (*brushless direct current*) banyak digunakan dalam kendaraan listrik karena keunggulannya yang memiliki torsi dan efisiensi yang tinggi, biaya perawatan yang rendah, dan respon kecepatan dinamik yang cepat. Pada umumnya, motor BLDC menggunakan sensor posisi (*hall effect sensor*) untuk menentukan komutasi pada inverter, tetapi permasalahan yang sering terjadi pada penggunaan sensor posisi yaitu terletak pada seringnya terjadi kesalahan pada saat konfigurasi dengan *controller*, kesulitan pemasangan apabila terjadi kerusakan, sensitifnya sensor tersebut terhadap temperatur, dan harga sensor yang mahal. Maka dari itu, penggunaan metode *sensorless* (menggunakan deteksi tegangan *back EMF zero crossing*) merupakan solusi alternatif untuk menentukan komutasi inverter pada motor BLDC. Pada proyek akhir ini penggunaan metode *sensorless* terlebih dahulu divalidasi dengan menggunakan simulasi dan kemudian diimplementasikan pada motor BLDC 1 kW 48V. Telah dilakukan pengujian dalam kondisi tanpa beban maupun berbeban dan dilakukan pengamatan terhadap respon kecepatan dan daya input inverter serta gelombang komutasi antara metode *sensored* (menggunakan sensor posisi) dan metode *sensorless*. Hasil pengujian menunjukkan metode *sensorless* menghasilkan kecepatan dan frekuensi komutasi yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan metode *sensored*. Pada tegangan nominal kondisi tanpa beban terdapat selisih kecepatan sebesar 26 rpm sedangkan pada kondisi berbeban terdapat selisih kecepatan sebesar 52 rpm serta terdapat selisih frekuensi komutasi sebesar 12.9 Hz.

Kata kunci : Motor BLDC, *back EMF zero crossing*, *sensorless*



ABSTRACT

ABSTRACT

BLDC (brushless direct current) motors are widely used in electric vehicles because of its advantage of high torque and high efficiency, low maintenance costs, and fast dynamic speed response. In general, BLDC motors use a position sensor (hall effect sensor) to determine the commutation of the inverter, however there are several problems that often occurs in the use of position sensor. They are frequent errors during configuration with the controller, the difficulty of installation in case of damage, temperature sensitive of the sensor, and expensive sensor prices. Therefore, the use of sensorless method (using back EMF zero crossing detection) is an alternative solution to determine the inverter commutation on BLDC motor. In this final project the use of sensorless method is validated by using simulation. Then the method is implemented on BLDC motor 1 kW 48V. It has been tested in no-load or loaded conditions and observed on speed response and power input of the inverter also the signal of commutation between the sensored method (using position sensor) and the sensorless method. The experimental results the sensorless method are produce higher speed and commutation frequency when compared to the sensored method. At nominal voltage and without load condition there is difference of speed equal to 26 rpm whereas at load condition there is difference of speed equal to 52 rpm and there is difference of commutation frequency equal to 12.9 Hz.

Keywords: *BLDC Motor, back EMF zero crossing, sensorless*

KATA PENGANTAR



Alhamdulillah, segala puji syukur bagi Allah SWT karena berkat rahmat dan hidayah-Nya, penulis dapat menyelesaikan proyek akhir yang berjudul:

“PENGATURAN KECEPATAN MOTOR BLDC (*BRUSHLESS DIRECT CURRENT*) MENGGUNAKAN DETEKSI TEGANGAN BACK EMF ZERO CROSSING DENGAN METODE SIX STEP COMMUTATION”

Dalam menyelesaikan proyek akhir ini, penulis berpegang pada teori yang pernah penulis dapatkan dan bimbingan dari dosen pembimbing proyek akhir. Serta pihak-pihak lain yang membantu hingga terselesaikannya proyek akhir ini.

Pembuatan dan penyusunan proyek akhir ini diajukan sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan studi Diploma-IV dan memperoleh gelar Sarjana Sains Terapan (S. ST.) di Program Studi D-IV Teknik Elektro Industri, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya.

Penulis berusaha secara optimal dengan segala pengetahuan dan informasi yang didapatkan dalam menyusun laporan proyek akhir ini. Namun, penulis menyadari berbagai keterbatasannya. Karena itu penulis memohon maaf atas keterbatasan materi laporan proyek akhir ini. Penulis sangat mengharapkan masukan berupa saran dan kritik yang membangun demi kesempurnaan laporan proyek akhir ini.

Besar harapan penulis agar laporan proyek akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Surabaya, 25 Agustus 2017

Penulis



**UCAPAN
TERIMAKASIH**

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan penuh rasa syukur kehadiran Allah SWT, dan tanpa menghilangkan rasa hormat yang mendalam, penulis mengucapkan terimakasih kepada pihak-pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan proyek akhir ini. Penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Ayah penulis, Joko Hadi Saroso, S.T., Ibu penulis, Aidah, Kakak penulis, Miftakhul Jannatin, S.Si., M.Si. serta seluruh keluarga besar penulis yang selalu memberi dukungan dan mendoakan dalam kegiatan pembelajaran penulis dan penyelesaian proyek akhir ini.
2. Bapak Dr. Zainal Arief, S.T., M.T. selaku direktur PENS.
3. Bapak Epyk Sunarno, S.ST., M.T. selaku ketua program studi D4 Teknik Elektro Industri PENS
4. Bapak Dr. Arman Jaya, S.T., M.T. dan Bapak Endro Wahjono, S.ST., M.T. selaku dosen pembimbing proyek akhir penulis.
5. Seluruh Bapak dan Ibu dosen Teknik Elektro Industri yang telah membimbing dan membekali ilmu kepada penulis selama menempuh pendidikan.
6. Teman-teman kelas D4 ELIN A 2013, angkatan ELIN22, dan *Memofoution* yang telah banyak memberi dukungan dan doa kepada penulis dalam penyelesaian proyek akhir ini.
7. Seluruh keluarga besar dan pembimbing tim mobil listrik *Electric Vehicle Community* Teknik Elektro Industri PENS dan tim UKM *Mobil Hemat Energi* PENS, serta keluarga CV. Mandiri Teknik telah banyak membekali ilmu kepada penulis selama aktif dalam tim dan penyelesaian proyek akhir ini.
8. Seluruh keluarga *Electric Drive Laboratory* D-103, *Factory Automation Laboratory* D-303, *MOLINA ITS*, dan *Electric Drive Research Group* yang telah banyak memberikan wejangan, bimbingan, dukungan, dan menjadi teman diskusi dalam penyelesaian proyek akhir ini.
9. Semua pihak yang telah membantu penulis hingga terselesaiannya proyek akhir ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Semoga Allah SWT selalu memberikan perlindungan, rahmat, nikmat, dan barokah-Nya bagi kita semua. Amin.

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI

| | |
|---------------------------------|------|
| HALAMAN JUDUL | i |
| HALAMAN PENGESAHAN | ii |
| ABSTRAK..... | iii |
| ABSTRACT..... | iv |
| KATA PENGANTAR..... | v |
| UCAPAN TERIMA KASIH..... | vi |
| DAFTAR ISI..... | vii |
| DAFTAR GAMBAR..... | ix |
| DAFTAR TABEL | xiii |

BAB I. PENDAHULUAN

| | |
|---|---|
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Tujuan..... | 2 |
| 1.2.1. Tujuan Umum..... | 2 |
| 1.2.2. Tujuan Khusus..... | 2 |
| 1.3 Rumusan Masalah | 2 |
| 1.4 Batasan Masalah..... | 2 |
| 1.5 Metodologi..... | 3 |
| 1.5.1. Studi Literatur..... | 3 |
| 1.5.2. Perancangan Sistem | 3 |
| 1.5.3. Perancangan Perangkat Keras | 4 |
| 1.5.4. Perancangan Perangkat Lunak | 4 |
| 1.5.5. Integrasi dan Pengujian Sistem | 4 |
| 1.5.6. Analisa Data | 4 |
| 1.5.7. Penyusunan Buku Laporan | 5 |
| 1.6 Sistematika Pembahasan..... | 5 |
| 1.7 Tinjauan Pustaka | 6 |

BAB II. TEORI PENJUNJANG

| | |
|--|----|
| 2.1 Motor <i>Brushless Direct Current</i> | 9 |
| 2.2 Inverter Tiga Fasa..... | 11 |
| 2.3 Deteksi Tegangan <i>back EMF Zero Crossing</i> | 15 |

BAB III. PERENCANAAN DAN PEMBUATAN ALAT

| | |
|--|----|
| 3.1 Blok Diagram Sistem | 21 |
| 3.1.1. Perencanaan dan Pembuatan Rangkaian Inverter Tiga Fasa..... | 22 |

| | | |
|---|---|----|
| 3.1.2. | Perancangan dan Pembuatan Rangkaian Deteksi Tegangan <i>back EMF zero crossing</i> | 25 |
| 3.1.3. | Perancangan dan Pembuatan Rangkaian <i>Driver Inverter</i> Tiga Fasa..... | 29 |
| 3.1.4. | Perancangan dan Pembuatan Modul Sensor Tegangan dan Sensor Arus untuk Masukan Inverter | 30 |
| 3.1.5. | Perancangan dan Pembuatan Modul Mikrokontroller ARM | 32 |
| BAB IV. PENGOLAHAN DATA DAN ANALISIS | | |
| 4.1 | Pengujian Parsial | 36 |
| 4.1.1. | Pengujian Sinyal PWM dari Mikrokontroller ARM | 35 |
| 4.1.2. | Pengujian Rangkaian <i>Driver Inverter</i> Tiga Fasa | 37 |
| 4.1.3. | Pengujian Rangkaian Inverter Tiga Fasa dengan Beban Lampu 12x100 Watt | 39 |
| 4.1.4. | Pengujian Sensor Tegangan dan Sensor Arus | 43 |
| 4.1.5. | Pengujian Rangkaian Deteksi Tegangan <i>back EMF zero crossing</i> | 46 |
| 4.2 | Pengujian Integrasi | 49 |
| 4.2.1. | Pengujian Integrasi Sistem Pengaturan Kecepatan Motor BLDC Menggunakan Metode <i>Sensored</i> dan <i>Sensorless</i> Dalam Kondisi Tanpa Beban | 49 |
| 4.2.2. | Pengujian Integrasi Sistem Pengaturan Kecepatan Motor BLDC Menggunakan Metode <i>Sensored</i> dan <i>Sensorless</i> Kondisi Berbeban | 56 |
| 4.2.3. | Analisa Perbandingan Penggunaan Metode <i>Sensored</i> dan <i>Sensorless</i> | 60 |
| BAB V. PENUTUP | | |
| 5.1 | Kesimpulan | 65 |
| 5.2 | Saran | 66 |
| DAFTAR PUSTAKA | | 67 |



DAFTAR GAMBAR

DAFTAR GAMBAR

| | |
|---|----|
| Gambar 2.1. Sensor <i>hall effect</i> dan <i>encoder</i> pada Motor BLDC... | 10 |
| Gambar 2.2. Sinyal sensor <i>hall effect</i> dan tegangan fasa motor dengan skema metode <i>six step commutation</i> | 10 |
| Gambar 2.3. Rangkaian ekivalen dari motor BLDC..... | 11 |
| Gambar 2.4. Rangkaian inverter tiga fasa | 12 |
| Gambar 2.5. Gelombang komutasi 120° dan tegangan <i>line-to-neutral</i> inverter tiga fasa | 13 |
| Gambar 2.6. Gelombang tegangan back EMF trapezoidal tiga fasa pada motor BLDC..... | 23 |
| Gambar 2.7. Fasa <i>floating</i> pada metode <i>six step commutation</i> | 17 |
| Gambar 2.8. Penggunaan <i>neutral point</i> | 18 |
| Gambar 2.9. Penggunaan <i>virtual neutral point</i> | 19 |
| Gambar 3.1. Blok diagram sistem | 21 |
| Gambar 3.2. Skematik rangkaian inverter tiga fasa parallel tiga mosfet dengan DC <i>link capacitor</i> | 23 |
| Gambar 3.3. Simulasi rangkaian inverter tiga fasa dengan menggunakan PSIM..... | 24 |
| Gambar 3.4. Respon pulsa pensaklaran 6 mosfet untuk inverter tiga fasa | 24 |
| Gambar 3.5.(a) Tegangan luaran <i>line-to-line</i> inverter 3 fasa | 25 |
| Gambar 3.5.(b) Tegangan luaran <i>line-to-neutral</i> inverter 3 fasa .. | 25 |
| Gambar 3.6. Diagram rangkaian deteksi tegangan back EMF zero crossing | 26 |
| Gambar 3.7.(a) Rangkaian pengaturan kecepatan motor BLDC menggunakan <i>hall effect sensor</i> | 27 |
| Gambar 3.7.(b) Rangkaian pengaturan kecepatan motor BLDC menggunakan deteksi tegangan back EMF zero crossing | 28 |
| Gambar 3.8.(a) Perbandingan sinyal sensor <i>hall effect</i> dan deteksi tegangan back EMF zero crossing | 29 |
| Gambar 3.8.(b) Respon putaran motor BLDC menggunakan <i>hall effect sensor</i> dan deteksi tegangan back EMF | 29 |
| Gambar 3.9. Rangkaian IR2110 | 30 |
| Gambar 3.10. Rangkaian sensor arus ACS712-30A | 31 |
| Gambar 3.11. Rangkaian skematik AMC1200..... | 31 |
| Gambar 3.12. Skematik mikrokontroler ARM dan rangkaian sumber tegangan | 32 |

| | |
|--|----|
| Gambar 3.13. Gambar skematik I/O mikrokontroler ARM | 33 |
| Gambar 4.1.(a) Hardware mikrokontroler ARM..... | 36 |
| Gambar 4.1.(b) Skema Pengujian sinyal PWM pada mikrokontroller | 36 |
| Gambar 4.2.(a) Sinyal PWM S1/H1 (warna kuning), S2/L3 (warna biru)..... | 37 |
| Gambar 4.2.(b) Sinyal PWM S3/H2 (warna kuning), S4/L1 (warna biru)..... | 37 |
| Gambar 4.2.(c) Sinyal PWM S5/H3 (warna kuning), S6/L2 (warna biru)..... | 37 |
| Gambar 4.3. <i>Hardware driver</i> MOSFET menggunakan IC TLP 521 dan IR2110 | 37 |
| Gambar 4.4. Test point IC IR2110 | 38 |
| Gambar 4.5.(a) Perbandingan sinyal PWM <i>High</i> dari mikrokontroler dan IR2110 | 39 |
| Gambar 4.5.(b) Perbandingan sinyal PWM <i>Low</i> dari mikrokontroler dan IR2110 | 39 |
| Gambar 4.6. <i>Hardware</i> rangkaian inveter tiga fasa..... | 39 |
| Gambar 4.7. Rangkaian pengujian inverter tiga fasa..... | 40 |
| Gambar 4.8.(a) Respon tegangan luaran inverter fasa C-A | 41 |
| Gambar 4.8.(b) Respon tegangan luaran inverter <i>line-to-neutral</i> fasa B..... | 41 |
| Gambar 4.9.(a) Hardware modul sensor arus dan tegangan | 43 |
| Gambar 4.9.(b) Pengujian sensor arus dan sensor tegangan | 43 |
| Gambar 4.10.(a) Grafik nilai pembacaan ADC terhadap tegangan | 45 |
| Gambar 4.10.(b) Grafik nilai pembacaan ADC terhadap arus | 45 |
| Gambar 4.11.(a) Hardware rangkaian deteksi tegangan <i>back EMF</i> <i>zero crossing</i> | 46 |
| Gambar 4.11.(b) Pengujian rangkaian deteksi tegangan <i>back EMF</i> <i>zero crossing</i> | 46 |
| Gambar 4.12.(a) Blok diagram pengujian secara <i>sensored</i> | 49 |
| Gambar 4.12.(b) Rangkaian pengujian motor BLDC secara <i>sensored</i> dan <i>sensorless</i> tanpa beban..... | 49 |
| Gambar 4.13.(a) Grafik perubahan tegangan input terhadap kecepatan metode <i>sensored</i> kondisi tanpa beban | 51 |
| Gambar 4.13.(b) Grafik daya input terhadap kecepatan metode <i>sensored</i> kondisi tanpa beban | 51 |

| | |
|---|----|
| Gambar 4.14.(a) Gelombang tegangan fasa C motor BLDC saat dioperasikan menggunakan metode <i>sensored</i> | 52 |
| Gambar 4.14.(b) Gelombang tegangan <i>line-to-line</i> fasa C-A saat dioperasikan menggunakan metode <i>sensored</i> | 52 |
| Gambar 4.14.(c) Gelombang sensor <i>hall effect</i> urutan C..... | 52 |
| Gambar 4.15. Blok diagram pengujian secara <i>sensorless</i> pada motor BLDC | 53 |
| Gambar 4.16.(a) Grafik perubahan tegangan input terhadap kecepatan metode <i>sensored</i> dan <i>sensorless</i> kondisi tanpa beban | 53 |
| Gambar 4.16.(b) grafik daya input terhadap kecepatan metode <i>sensored</i> dan <i>sensorless</i> kondisi tanpa beban..... | 53 |
| Gambar 4.17.(a) Gelombang tegangan fasa C motor BLDC saat dioperasikan menggunakan metode <i>sensorless</i> | 55 |
| Gambar 4.17.(b) Gelombang tegangan <i>line-to-line</i> fasa C-A saat dioperasikan menggunakan metode <i>sensorless</i> | 55 |
| Gambar 4.17.(c) Gelombang fasa terhadap <i>virtual neutral</i> (kuning) dan gelombang luaran deteksi tegangan <i>back EMF zero crossing</i> urutan C (biru)..... | 55 |
| Gambar 4.18. Rangkaian pengujian motor BLDC metode <i>sensored</i> dan <i>sensorless</i> dengan beban ban mobil dan penggereman mekanik | 57 |
| Gambar 4.19.(a) Grafik perubahan tegangan input terhadap kecepatan metode <i>sensored</i> kondisi berbeban..... | 58 |
| Gambar 4.19.(b) Grafik daya input terhadap kecepatan metode <i>sensored</i> kondisi berbeban | 58 |
| Gambar 4.20.(a) Grafik perubahan tegangan input terhadap kecepatan metode <i>sensorless</i> kondisi berbeban..... | 59 |
| Gambar 4.20.(b) Grafik daya input terhadap kecepatan metode <i>sensorless</i> kondisi berbeban | 60 |
| Gambar 4.21.(a) Grafik perubahan tegangan input terhadap kecepatan metode <i>sensored</i> dan <i>sensorless</i> kondisi tanpa beban | 61 |
| Gambar 4.21.(b) Grafik daya input terhadap kecepatan metode <i>sensored</i> dan <i>sensorless</i> kondisi tanpa beban..... | 61 |
| Gambar 4.22.(a) Grafik perubahan tegangan input terhadap kecepatan metode <i>sensored</i> dan <i>sensorless</i> kondisi berbeban | 61 |

| | |
|---|----|
| Gambar 4.22.(b) Grafik daya input terhadap kecepatan metode <i>sensored</i> dan <i>sensorless</i> kondisi berbeban | 61 |
| Gambar 4.23.(a) Gelombang sensor <i>hall effect</i> urutan C..... | 63 |
| Gambar 4.23.(b) Gelombang tegangan fasa terhadap <i>virtual neutral</i> (kuning) dan gelombang luaran deteksi tegangan <i>back EMF zero crossing</i> (biru) | 63 |

DAFTAR TABEL

DAFTAR TABEL

| | | |
|-------------------|--|----|
| Tabel 2.1. | Tabel On/off Saklar Inverter untuk Putaran CW Motor BLDC | 14 |
| Tabel 3.1. | Perencanaan input/ output | 33 |
| Tabel 4.1. | Data hasil pengujian inverter tiga fasa dengan beban lampu pijar | 41 |
| Tabel 4.2. | Data hasil pengujian tegangan <i>line to neutral</i> inverter tiga fasa | 42 |
| Tabel 4.3. | Data hasil pengujian sensor tegangan dan sensor arus | 44 |
| Tabel 4.4. | Hasil pengujian rangkaian <i>back EMF zero crossing</i> menggunakan masukan dari <i>function generator</i> | 47 |
| Tabel 4.5. | Hasil pengujian rangkaian deteksi tegangan <i>back EMF zero crossing</i> menggunakan motor BLDC secara <i>sensored</i> | 48 |
| Tabel 4.6. | Data pengujian sistem metode <i>sensored</i> kondisi tanpa beban | 50 |
| Tabel 4.7. | Data pengujian sistem metode <i>sensorless</i> kondisi tanpa beban. | 53 |
| Tabel 4.8. | Data pengujian sistem metode <i>sensored</i> dalam kondisi berbeban | 57 |
| Tabel 4.9. | Data pengujian sistem metode <i>sensorless</i> dalam kondisi berbeban | 59 |

BAB I

PENDAHULUAN

BAB I

PENDAHULUAN

Pada bab ini akan dijelaskan tujuan, latar belakang, rumusan dan batasan masalah serta metodologi diajukannya judul “Pengaturan Kecepatan Motor BLDC (*Brushless Direct Current*) Menggunakan Deteksi Tegangan *Back EMF Zero Crossing* dengan Metode *Six Step Commutation*”

1.1 Latar Belakang

Motor BLDC (*Brushless Direct Current*) telah banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari, seperti untuk penggunaan blower, kompressor, peralatan militer, pesawat tanpa awak, dan kendaraan listrik. Motor BLDC banyak digunakan karena memiliki beberapa keunggulan, yaitu tahan lama, torsi dan efisiensi yang tinggi, handal, perawatan rendah, dan performa yang bagus untuk kecepatan tinggi.

Motor BLDC menggunakan sumber tegangan utama berupa tegangan DC. Untuk dapat bekerja, diperlukan adanya medan putar stator. Untuk mendapatkan medan putar stator diperlukan tegangan AC 3 fasa pada stator motor. Oleh karena itu digunakan inverter 3 fasa untuk mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC 3 fasa.

Metode yang digunakan dalam pengendalian inverter motor BLDC yaitu metode *six step commutation*, dimana gelombang yang dihasilkan berbentuk *square* 6 langkah. Dalam membangkitkan gelombang *square* diperlukan penentuan *komutasi* yang tepat. Terdapat dua metode untuk menentukan *komutasi* pada motor BLDC, yaitu menggunakan sensor *hall effect (sensored)* dan tanpa menggunakan sensor *hall effect (sensorless)*.

Penggunaan sensor untuk penentuan komutasi umumnya menggunakan sensor posisi (*hall effect sensor*). Hal ini memiliki beberapa kelemahan, diantaranya rentan terjadi kesalahan konfigurasi pemasangan ketika integrasi dengan *controller*, harga sensor yang tinggi, tingkat kesulitan pemasangan yang tinggi apabila terjadi kerusakan, dan sensitif terhadap temperatur tinggi.

Untuk mengatasi kelemahan penggunaan sensor posisi ini dapat menggunakan deteksi tegangan *back EMF*, yaitu memanfaatkan tegangan balik rotor saat berputar. Tegangan *back EMF* pada motor BLDC berupa gelombang trapezoidal. Gelombang trapezoidal yang dibangkitkan ini

yang nantinya diolah dan digunakan sebagai *komutasi* pada inverter 3 fasa.

1.2 Tujuan

Tujuan yang harus dicapai dalam Proyek Akhir ini ada dua, yang akan dijelaskan seperti dibawah ini :

1.2.1. Tujuan Umum

Adapun tujuan umum dari pembuatan Proyek Akhir ini adalah sebagai syarat kelulusan dari pendidikan Diploma IV Program Studi Teknik Elektro Industri Politeknik Elektronika Negeri Surabaya.

1.2.2. Tujuan Khusus

Tujuan yang ingin dicapai dalam Proyek Akhir ini adalah merancang dan mengimplementasikan sistem pengaturan kecepatan motor BLDC tanpa menggunakan sensor *hall effect* melainkan menggunakan deteksi tegangan *back EMF*.

1.3 Rumusan Masalah

Adapun permasalahan dalam pelaksanaan Proyek Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana cara menentukan sistem *drive* motor BLDC tanpa menggunakan sensor *hall effect*?
2. Bagaimana cara mendeteksi tegangan *back EMF* pada motor BLDC?
3. Bagaimana cara menaikkan dan menurunkan kecepatan motor BLDC menggunakan deteksi tegangan *back EMF*?

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan-batasan masalah dalam pelaksanaan proyek akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Motor BLDC yang digunakan memiliki daya $\leq 1\text{kW}$ dengan tegangan $\leq 48\text{V}$
2. Tidak membahas konstruksi motor BLDC, karakteristik *battery*, sumber tegangan, dan parameter kualitas daya pada inverter yang digunakan
3. Tidak membahas kondisi mekanik yang akan digunakan

1.5 Metodologi

Dalam penyusunan Proyek Akhir ini diperlukan suatu metodologi untuk mendapatkan hasil yang memuaskan. Rancangan metodologi dalam pengerjaan Proyek Akhir ini antara lain :

1.5.1. Studi Literatur

Studi literatur diperoleh dari jurnal-jurnal, paper-paper *proceeding*, dan buku-buku teks yang sesuai dengan bahasan Proyek Akhir. Pada studi literatur dipelajari mengenai gambaran umum dan dasar teori penunjang yang dipakai untuk merealisasikan baik secara simulasi maupun implementasi, antara lain motor BLDC, inverter tiga fasa, serta rangkaian untuk metode deteksi tegangan *back EMF zero crossing*.

1.5.2. Perancangan Sistem

Setelah mempelajari dan memahami studi literatur yang sudah tersedia, selanjutnya adalah membuat perencanaan dari sistem pengaturan putaran motor BLDC. Perencanaan ini meliputi :

1. Perhitungan daya *output* inverter yang mengacu pada daya motor BLDC yang digunakan.
2. Algoritma dan rangkaian deteksi tegangan *back EMF* pada motor BLDC.
3. Menentukan komponen yang digunakan pada rangkaian inverter tiga fasa, *driver* inverter, dan rangkaian deteksi *back EMF zero crossing*.

1.5.3. Perancangan Perangkat Keras

Pada tahap ini dimulai pembuatan perangkat keras. Perangkat keras yang dibuat meliputi tiga modul yaitu :

1. Satu buah modul kontrol motor BLDC yang meliputi *minimum system* mikrokontroler STM32F407VG, *driver* inverter tiga fasa menggunakan IC IR2110 sejumlah satu buah, dan inverter tiga fasa menggunakan mosfet FDH055N15A sejumlah 24 buah.
2. Satu buah modul deteksi tegangan *back EMF zero crossing* untuk mendeteksi tegangan *back EMF* motor BLDC yang diletakkan pada output inverter tiga fasa.

1.5.4. Perancangan Perangkat Lunak

Setelah perancangan perangkat keras selesai, maka dilakukan perancangan perangkat lunak. Perancangan perangkat lunak adalah membuat algoritma sistem perangkat lunak dengan menggunakan mikrokontroller STM32F407VG (ARM cortex-M4F) sebagai pusat pengontrolan sistem. Perancangan perangkat lunak ini lebih difokuskan pada pembangkitan sinyal luaran PWM *six step* untuk *switching* inverter tiga fasa, algoritma deteksi tegangan *back EMF zero crossing* motor BLDC yang nantinya digunakan sebagai penentu komutasi inverter 3 fasa, dan juga monitoring pembacaan tegangan masukan inverter, arus masukan inverter, dan kecepatan motor.

1.5.5. Integrasi dan Pengujian Sistem

Pada tahap ini dilakukan integrasi sistem dari bagian-bagian yang telah dibuat. Setelah itu dilakukan pengujian sistem yang telah terintegrasi dan dilakukan perbaikan jika terjadi *fault* (kegagalan).

1.5.6. Analisa Data

Setelah dilakukan beberapa pengujian dan perbaikan sistem, diperoleh sistem yang memiliki unjuk kerja yang diinginkan. Analisa dapat dilakukan terhadap data-data yang diperoleh dari pengujian tersebut.

1.5.7. Penyusunan Buku Laporan

Pada tahap ini dilakukan pembuatan atau penulisan laporan Proyek Akhir. Pada laporan tersebut dijelaskan mengenai semua hal yang berkaitan tentang pengerjaan Proyek Akhir, seperti penjelasan tentang komponen yang dipakai, proses pembuatan alat, sistem kerja alat, data-data hasil pengujian alat, dan lain sebagainya. Diharapkan penulisan laporan tersebut dapat bermanfaat sebagai bahan acuan didalam pembuatan alat serupa pada waktu yang akan datang.

1.6 Sistematika Pembahasan

Sistematika pembahasan penyusunan Proyek Akhir ini direncanakan sebagai berikut :

JUDUL

Pada halaman judul ini terdapat judul tugas akhir yang akan dikerjakan.

PENGESAHAN

Pada halaman pengesahan ini terdapat pengesahan atau tanda tangan dari dosen pembimbing dan penguji, sebagai persetujuan.

ABSTRAK

Pada abstrak ini akan dijelaskan tugas akhir ini secara keseluruhan atau bisa dikatakn hasil dari alat yang di uji, seperti kesimpulan.

BAB I PENDAHULUAN

Pada Bab I berisikan latar belakang pembuatan alat pada Proyek Akhir, tujuan yang ingin dicapai, batasan masalah pada Proyek Akhir, serta sistematika pembahasan serta tinjauan pustaka dari Proyek Akhir ini.

BAB II TEORI PENUNJANG

Bab II meliputi literatur-literatur, teori dasar, serta referensi yang berguna sebagai acuan dan landasan dalam perencanaan dan pembuatan Proyek Akhir.

BAB III PERENCANAAN DAN PEMBUATAN

Pada Bab III dilakukan perencanaan dan pembuatan perangkat keras dan perangkat lunak.

BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISA

Pada Bab IV membahas secara keseluruhan dari sistem dan dilakukan pengujian serta analisa pada setiap percobaan perangkat keras. Mengintegrasikan seluruh sistem dan pengujian, kemudian berdasarkan data hasil pengujian dilakukan analisa terhadap keseluruhan sistem.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada Bab V membahas kesimpulan dari pembahasan perancanaan, pengujian dan analisa berdasarkan data hasil pengujian sistem. Untuk meningkatkan hasil akhir lebih baik diberikan saran-saran terhadap hasil pembuatan Proyek Akhir.

1.7 Tinjauan Pustaka

Dalam perngerjaan Proyek Akhir ini penulis menggunakan beberapa literatur yang digunakan sebagai acuan.

1. Paper yang dimuat dalam *Proceeding Annual Conference of IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition 2003* dan disusun oleh Jianwen Shao, D. Nolan, dan T. Hopkins dengan judul “*Improved Direct Back EMF Detection for Sensorless Brushless DC Motor Drives*”. Membahas tentang deteksi tegangan back EMF untuk tegangan rendah maupun tinggi tanpa membutuhkan titik netral motor, sehingga motor mampu berputar dengan metode sensorless dalam kecepatan yang sangat rendah.
2. Paper yang dimuat dalam *Proceeding Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society 2005* dan disusun oleh Tae-Hyung Kim, Hyung-Woo Lee, dan Mehrdad Ehsani dengan judul “*State of The Art and Future Trends in Position Sensorless Brushless DC Motor / Generator Drives*”. Membahas tentang perkembangan terakhir tentang aplikasi dari DSP (*Digital Signal Processor*) dalam pengendalian *sensorless* motor BLDC. Terdapat beberapa metode untuk pengendalian *sensorless*, diantaranya metode konvensional dan perkembangan terakhir beserta prinsip dan kelebihannya.

3. Paper yang dimuat dalam Jurnal *IEEE Transaction on Power Electronics* 2008 dan disusun oleh Yen-Shin Lai dan Yong-Kai Lin dengan judul “*Novel Back EMF Detection Technique of Brushless DC Motor Drives for Wide Range Control Without Using Current and Position Sensors*”. Membahas tentang teknik mendeteksi tegangan *back EMF* menggunakan *zero crossing point* untuk mengatur komutasi inverter.
4. Paper yang dimuat dalam Jurnal *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications* 2010 dan disusun oleh Tzuen-Lih Chern, Ping-Lung Pan, Yu-Lun Chern, dan Der-Min Tsay dengan judul “*Sensorless Speed Control of BLDC Motor Using Six Step Square Wave and Rotor Position Detection*”. Membahas tentang pengendalian motor BLDC tanpa menggunakan sensor *hall effect* dan *speed encoder* yang diterapkan pada motor *air conditioner*. Penggunaan ZCP (*Zero Crossing Point*) digunakan untuk mendeteksi *timing* komutasi atau posisi rotor dan mengestimasi nilai kecepatan.
5. Paper yang dimuat dalam Jurnal *IEEE Transaction on Power Electronics* 2015 dan disusun oleh Chenjun Cui, Gang Liu, Kun Wang, dan Xinda Song dengan judul “*Sensorless Drive for High Speed Brushless DC Motor Based on the Virtual Neutral Voltage*”. Membahas tentang metode kontrol *sensorless* berdasarkan *virtual neutral voltage*. Dalam menentukan sinyal komutasi digunakan *low pass filter* untuk tujuan *phase delay*. Dibahas juga mengenai efisiensi daya saat menggunakan metode pengendalian PAM dan PWM.
6. Paper yang dimuat dalam Jurnal *IEEE Transaction on Power Electronics* 2016 dan disusun oleh Gang Liu, Chenjun Cui, Kun Wang, dan Bangcheng Han dengan judul “*Sensorless Control for High Speed Brushless DC Motor Based on the Line-to-Line Back EMF*”. Membahas tentang pengendalian motor BLDC kecepatan tinggi dengan metode *sensorless* berdasarkan tegangan *line-to-line back EMF* untuk menentukan proses komutasi motor. Terdapat 2 algoritma yang digunakan yaitu algoritma komutasi berdasarkan perubahan *hysteresis* sudut elektrik komutasi dan algoritma yang kedua yaitu penggunaan *virtual neutral voltage* untuk memperbaiki sinyal komutasi yang error.
7. Paper yang dimuat dalam Jurnal *IEEE Transaction on Power Electronics* 2016 dan disusun oleh Gabriel Haines dan Nesimi Ertugrul dengan judul “*Wide Speed Range Sensorless Operation of Brushless Permanent Magnet Motor Using Flux Linkage Increment*”. Membahas tentang metode pengendalian motor BLDC dengan

menggunakan pengukuran tegangan terminal motor untuk mengestimasi *flux linkage increment* yang terbagi dalam 6 sektor yang berbeda dalam setiap siklus elektrik.

8. Paper yang dimuat dalam Jurnal *IEEE Transaction on Power Electronics 2016* dan disusun oleh Xinxiu Zhou, Xi Chen, Fanquan Zeng, dan Jiqiang Tang dengan judul “*Fast Commutation Instant Shift Correction Method for Sensorless Coreless BLDC Motor based on Terminal Voltage Information*”. Membahas tentang penentuan komutasi dengan koreksi pergeseran fasa yang cepat dari tegangan back EMF.

BAB II

TEORI PENUNJANG

BAB II

TEORI PENUNJANG

Teori yang digunakan pada pembuatan proyek akhir ini antara lain adalah :

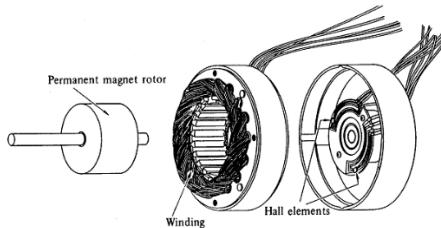
2.1 Motor *Brushless Direct Current*

Motor *Brushless Direct Current* yang disingkat motor BLDC atau dapat disebut juga dengan motor BLAC merupakan motor listrik *synchronous AC* tiga fasa. Perbedaan pemberian nama ini terjadi karena BLDC memiliki tegangan *back EMF* berbentuk trapezoidal sedangkan BLAC memiliki tegangan *back EMF* berbentuk sinusoidal. Walau demikian keduanya memiliki struktur yang sama dan dapat dikendalikan dengan metode *six-step* maupun metode PWM sinusoidal. Dibandingkan dengan motor DC, BLDC memiliki efisiensi lebih tinggi karena *drop* tegangan pada penggunaan alat komutasi elektrik lebih kecil dibanding dengan menggunakan *brush*, biaya perawatan yang lebih rendah karena tidak adanya *brush*, respon kecepatan dinamik yang cepat karena memiliki rotor inertia yang lebih kecil akibat dari penggunaan permanent magnet, dan *lifetime* yang panjang karena tidak adanya *brush* dan *commutator*. Dibandingkan dengan motor induksi, BLDC memiliki efisiensi yang lebih tinggi karena torsi awal yang lebih tinggi dan juga rotor yang terbuat dari magnet permanen, selain itu motor BLDC juga memiliki respon kecepatan dinamik yang cepat pula karena dengan menggunakan permanent magnet di rotornya menghasilkan rotor inertia yang rendah. Walaupun memiliki kelebihan dibandingkan dengan motor DC dan motor induksi, pengendalian BLDC jauh lebih rumit untuk kecepatan dan torsi yang konstan karena tidak adanya *brush* yang menunjang proses komutasi dan harga BLDC jauh lebih mahal.

Secara umum motor BLDC terdiri dari dua bagian yaitu, rotor yang merupakan bagian yang bergerak dan terbuat dari permanen magnet. Stator adalah bagian yang tidak bergerak, yang terbuat dari kumparan tiga fasa. Walaupun merupakan motor listrik *synchronous AC* tiga fasa, motor ini tetap disebut dengan BLDC karena pada implementasinya BLDC menggunakan sumber DC sebagai sumber energi utama yang kemudian diubah menjadi tegangan AC dengan menggunakan inverter tiga fasa. Tujuan dari pemberian tegangan AC tiga fasa pada stator BLDC adalah menciptakan medan magnet putar stator untuk menarik magnet rotor.

Karena tidak adanya *brush* pada motor BLDC, untuk menentukan komutasi yang tepat pada motor ini agar didapatkan torsi dan kecepatan

yang konstan, diperlukan tiga buah sensor *hall effect* atau encoder. Pada Gambar 2.1. berikut merupakan struktur motor BLDC yang dilengkapi dengan sensor *hall effect*.



Gambar 2.1 Sensor *hall effect* dan encoder pada motor BLDC.¹

Pada sensor *hall effect*, komutasi ditentukan dengan cara mendeteksi medan magnet rotor dengan menggunakan tiga buah sensor untuk mendapatkan enam kombinasi timing yang berbeda seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 sedangkan pada encoder, timing komutasi ditentukan dengan cara menghitung jumlah pola yang ada pada encoder.



Gambar 2.2 Sinyal sensor *hall effect* dan tegangan fasa motor dengan skema metode *six step commutation*.²

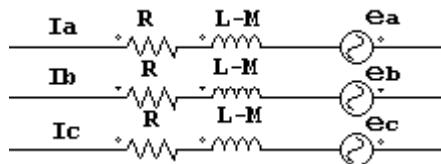
¹ T.Kenjo. *Permanent Magnet and Brushless DC Motors*. Oxford. 1985.

² Reston Condit, Application Note AN1083, "Sensorless BLDC Control with Back EMF Filtering", Microchip Technology Inc.

Pada pemodelan dan rangkaian pengganti motor BLDC resistansi stator pada semua lilitan diasumsikan sama, sedangkan induktansi diri dan induktansi mutual adalah konstan. Sehingga rumus tegangan tiga fasa dapat ditulis seperti persamaan 2.1. berikut.

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.1)$$

R adalah resistansi fasa, L adalah induktansi diri dan M adalah induktansi mutual. Variabel u_A , u_B , u_C adalah tegangan fasa lalu i_A , i_B , i_C adalah arus fasa, sedangkan e_A , e_B dan e_C adalah tegangan fasa *back EMF*. Pada Gambar 2.3. berikut merupakan rangkaian ekivalen dari motor BLDC.



Gambar 2.3. Rangkaian ekivalen dari motor BLDC.

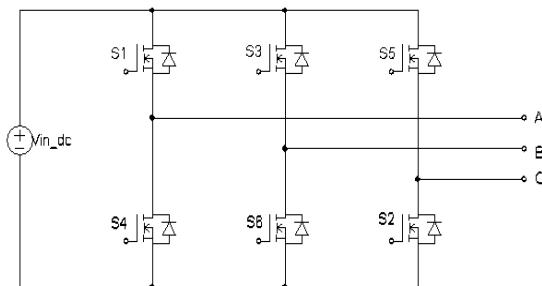
2.2 Inverter Tiga Fasa

Inverter adalah sebuah konverter untuk mengubah tegangan DC menjadi AC, yang mempunyai fungsi untuk mengubah tegangan DC menjadi tegangan *output* AC yang frekuensinya bisa diatur. Tegangan variabel output dapat diatur dengan mengatur tegangan input. Apabila tegangan input konstan, maka kita dapat mengatur tegangan outputnya dengan mengatur gain dari inverter yang biasanya dilakukan dengan kontrol PWM. Gain inverter ini didefinisikan sebagai rasio tegangan output AC terhadap tegangan output DC.

Pembagian inverter berdasarkan jumlah fasanya, dibagi menjadi dua, yaitu inverter satu fasa dan inverter tiga fasa. Inverter satu fasa adalah konverter DC ke AC satu phasa, sedangkan inverter tiga fasa adalah konverter DC ke AC tiga phasa. Berdasarkan masukan yang digunakan, jenis inverter meliputi VSI (*Voltage Source Inverter*) dan CSI (*Current Source Inverter*). Pada VSI sumber masukan berupa tegangan sedangkan pada CSI sumber masukan berupa arus.

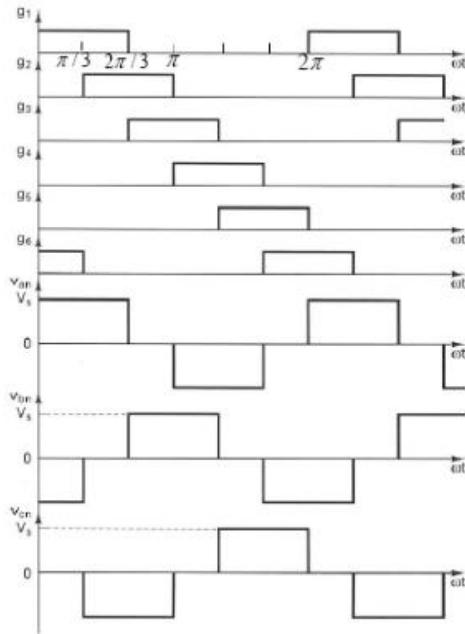
Gelombang luaran sinyal inverter sangat bergantung pada sinyal komutasinya. Sedangkan pengaturan komutasi dibagi menjadi 2 yaitu dengan sinyal komutasi SPWM (*Sinusoidal Pulse Width Modulation*) berbentuk gelombang sinus dan sinyal komutasi *half bridge inverter* (komutasi 180° & komutasi 120°) berbentuk gelombang segi empat (*square wave*). Bentuk gelombang luaran inverter yang ideal adalah sinusoidal, namun dalam kenyataannya, output dari inverter tidaklah sinusoidal murni dan mengandung harmonisa yang cukup tinggi. Untuk daya rendah dan menengah, gelombang output inverter yang berupa simetri atau kotak masih diperbolehkan, namun untuk daya tinggi dibutuhkan gelombang tegangan yang mendekati sinusoidal dan harmonisa yang kecil.

Pengaturan komutasi inverter tiga fasa pada tugas akhir ini menggunakan sinyal komutasi 120° . Rangkaian inverter tiga fasa terlihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Rangkaian inverter tiga fasa.

Yang dimaksud dari pengaturan komutasi 120° adalah setiap saklar/mosfet dari inverter bekerja ON selama 120° dan OFF selama 240° . Pada Gambar 2.5. di bawah ini adalah sinyal gelombang komutasi pada inverter



Gambar 2.5. Gelombang komutasi 120^0 dan tegangan *line-to-neutral* inverter tiga fasa.³

Tabel 2.1. merupakan tabel saklar *on/off* pada inverter untuk putaran CW motor BLDC. *On/off* saklar inverter ditentukan dari masukan *hall* sensor pada mikrokontroller.

³ Muhammad H.Rashid, *Power Electronics*. Third edition, 2004. hal 246.

Tabel 2.1 Tabel on/off saklar inverter untuk putaran CW motor BLDC.

| Sensor Hall Effect (H3 H2 H1) | Fasa | Switches |
|--|-------------|-----------------|
| 100 | A-C | S1 : S2 |
| 110 | B-C | S3 : S2 |
| 010 | B-A | S3 : S4 |
| 011 | C-A | S5 : S4 |
| 001 | C-B | S5 : S6 |
| 101 | A-B | S1 : S6 |

Setiap switch pada *inverter* tiga fasa terkonduksi selama 120° dengan urutan sesuai dengan posisi *hall effect* sensor seperti pada Tabel 2.1. Terdapat 3 mode operasi dalam setengah periode.

Mode 1 untuk $\omega t \leq \pi/3$, switch 1 dan 6 konduksi.

Mode 2 untuk $\pi/3 \leq \omega t \leq 2\pi/3$, switch 1 dan 2 konduksi.

Mode 3 untuk $2\pi/3 \leq \omega t \leq 3\pi/3$, switch 1 dan 2 konduksi.

$$V_{an} = 0 \quad V_{bn} = \frac{Vs}{2} \quad V_{cn} = -\frac{Vs}{2} \dots \dots \dots (2.4)$$

Tegangan line-to-neutral pada Gambar 2.5. dapat dinyatakan dalam persamaan deret Fourier sebagai berikut.

$$V_{bn} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V_s}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{3} \sin n \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \dots \quad (2.6)$$

$$V_{cn} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V_s}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{3} \sin n \left(\omega t - \frac{7\pi}{6} \right) \dots \dots \dots \quad (2.7)$$

Tegangan line a-b adalah $V_{ab} = \sqrt{3}$ Van. Oleh karena itu, Tegangan line-to-line untuk beban hubungan bintang (*Y-connected load*) adalah sebagai berikut.

$$V_{ab} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2\sqrt{3}Vs}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{3}\right) \sin n\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right) \quad \dots \quad (2.8)$$

$$V_{bc} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2\sqrt{3}Vs}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{3}\right) \sin n\left(\omega t - \frac{\pi}{3}\right) \quad \dots \quad (2.9)$$

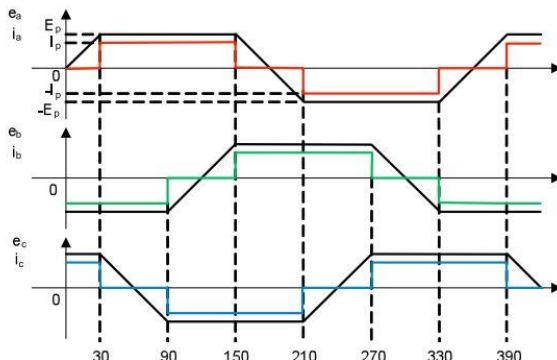
$$V_{ca} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2\sqrt{3}Vs}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{3}\right) \sin n(\omega t - \pi) \quad \dots \quad (2.10)$$

2.3 Deteksi Tegangan *Back EMF Zero Crossing*

Ketika arus mengalir pada lilitan, maka otomatis lilitan tersebut memiliki medan elektromagnet dan membuat intinya menjadi magnet. Dan ketika arus pada lilitan tersebut diputus, maka medan elektromagnet tersebut akan diserap kembali oleh kawat lilitan sehingga kawat tersebut akan dialiri arus. Arus tersebut memiliki polaritas yang berkebalikan dengan arus sebelumnya. Arus yang mengalir itulah yang disebut dengan *back EME*.

Amplitudo dan frekuensi *back EMF* yang dihasilkan adalah sebanding dengan kecepatan putar motor. Jika motor punya sepasang kutup di setiap fasanya maka frekuensi *back EMF* akan sama dengan kecepatan rotasi rotor, karena BLDC memiliki beberapa pasang kutup tentu frekuensi *back EMF* semakin tinggi. *back EMF* akan ditentukan oleh jumlah lilitan dan kekuatan magnet motor. Menurut hukum Lentz, *back EMF* haruslah melawan penyebabnya, yaitu arus kumparan atau

juga putaran motor. Jadi *back EMF* berlawanan tanda dengan *EMF* sumber tegangan motor. Induksi *EMF* pada motor listrik disebut *back EMF*, karena mempunyai arah berlawanan dengan tegangan yang menjalankan motor. Seperti halnya generator listrik, *back EMF* juga sebanding dengan kecepatan sudut putar. Bila motor sudah berjalan cepat, nilai *back EMF* tinggi, tetapi pada awal gerak motor atau bila beban mekanik motor berat, maka motor berputar pelan, nilai *back EMF* pun juga kecil, sehingga daya yang diambil dari sumber luarpun menjadi besar.



Gambar 2.6. Gelombang tegangan *back EMF* trapezoidal 3 fasa pada motor BLDC.⁴

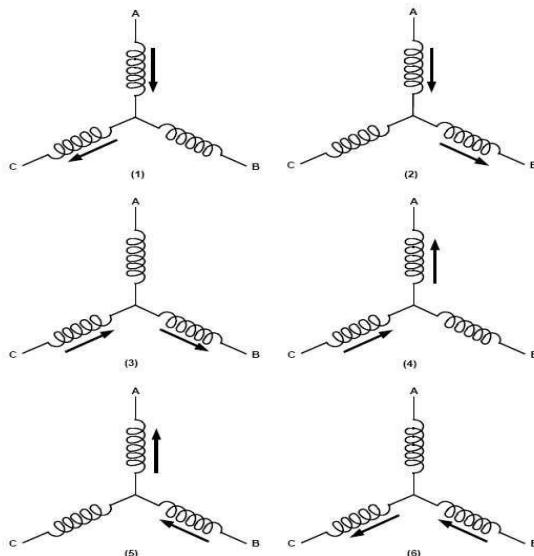
Tegangan *Back EMF* merupakan tegangan balik yang dihasilkan oleh belitan motor BLDC ketika motor BLDC tersebut berputar yang memiliki polaritas tegangan berlawanan arahnya dengan tegangan sumber yang dibangkitkan. Pada Gambar 2.6. merupakan gambar gelombang tegangan *back EMF* dari motor BLDC. Besarnya *back EMF* dipengaruhi oleh kecepatan sudut putaran motor (ω), medan magnet yang dihasilkan rotor (B), dan banyaknya lilitan pada belitan stator (N) sehingga besarnya *back EMF* dapat dihitung dengan persamaan :

⁴ Shiyong Lee, "A Comparison Study of The Commutation Methods for Three Phase Permanent Magnet BLDC Motor", Pennsylvania State University.

Dimana B adalah kerapatan medan magnet yang dihasilkan rotor (Tesla), N merupakan banyaknya lilitan pada belitan stator per fasa, l adalah panjang dari batang rotor (m), sedang r adalah jari-jari dalam motor (m), dan ω merupakan kecepatan sudut putaran motor (rad) (dimana $\omega=2\pi f$).

Ketika motor BLDC dibuat, jumlah lilitan pada stator dan besarnya medan magnet yang dihasilkan nilainya sudah dibuat konstan sehingga yang mempengaruhi besarnya *back EMF* adalah besarnya kecepatan sudut yang dihasilkan motor.

Pendeteksian dengan menggunakan *back EMF zero crossing* dapat disebut dengan pendekstnsian *sensorless* karena tanpa menggunakan sensor *hall effect*, pendekstnsian ini dilakukan dengan cara mendekstksi tegangan yang timbul akibat induksi magnet rotor pada salah satu kumparan stator yang mengalami kondisi *floating*. Kondisi *floating* merupakan kondisi di mana suatu fasa tidak terdapat arus yang mengalir atau tidak aktif dan terjadi tiap 60° .

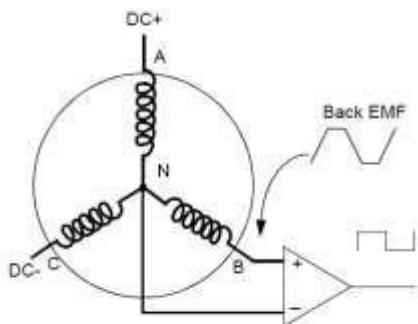


Gambar 2.7. Fasa *floating* pada metode *six step commutation*.⁵

⁵ Reston Condit, Application Note AN1083, “Sensorless BLDC Control with Back EMF Filtering”, Microchip Technology Inc.

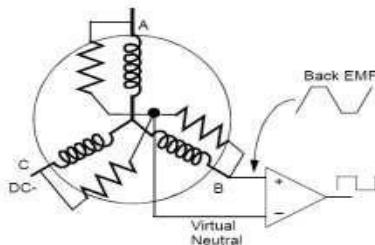
Proses metode *six-step* pada Gambar 2.7. menunjukkan hanya dua fasa yang dialiri arus secara bergantian untuk memutar motor. Saat kedua fasa dialiri arus, fasa yang lain tidak aktif atau tidak dialiri arus, fasa inilah yang dinamakan fasa *floating*. Fasa yang tidak aktif inilah yang nantinya terdapat sinyal *back EMF* karena adanya magnet permanen pada rotor BLDC. Teknik deteksi *back EMF* didasarkan pada fakta bahwa hanya dua fasa dari motor BLDC terhubung pada suatu waktu, sehingga fasa ketiga dapat digunakan untuk deteksi tegangan *back EMF*. Diasumsikan ketika fasa A dan B on dan fasa C off. Tidak ada arus akan melalui fasa C ini. Hal ini dijelaskan oleh kondisi berikut.

Back EMF yang timbul pada fasa *floating* ini merupakan indikasi dari posisi rotor dan dimungkinkan dapat digunakan untuk menentukan waktu pergantian komutasi. Pendekripsi sinyal *back EMF* ini memerlukan tegangan netral sebagai referensi menentukan titik *zero* dari sinyal untuk menghasilkan bentuk sinyal digital. Berikut skema pendekripsi *back EMF* dengan titik netral sebagai referensi.



Gambar 2.8. Penggunaan *neutral point*.

Seperti yang terlihat pada Gambar 2.8., titik netral (N) sulit diperoleh karena letaknya yang sulit dijangkau. Oleh karena itu titik netral ini dibuat dengan menyatukan ketiga fasa motor atau yang disebut *virtual neutral point*. Titik netral ini disusun resistor seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Penggunaan *virtual neutral point*.⁶

Untuk membentuk sinyal digital sebagai hasil *back EMF zero crossing*, diperlukan komparator di setiap fasa motor. Komparator di setiap fasa motor ini memberikan sinyal digital sesuai dengan adanya *back EMF* di setiap fasa motor. Kombinasi tiga sinyal inilah yang digunakan untuk menentukan waktu komutasi.

⁶ Jose Carlos Gamazo Real, Ernesto Vazquez-Sanchez, dan Jaime Gomez-Gil, “Position and Speed Control of Brushless DC Motor Using Sensorless technique and Application Trends”, Sensor Jurnal, 2010

Halaman ini Sengaja Dikosongkan

BAB III

PERENCANAAN DAN PEMBUATAN ALAT

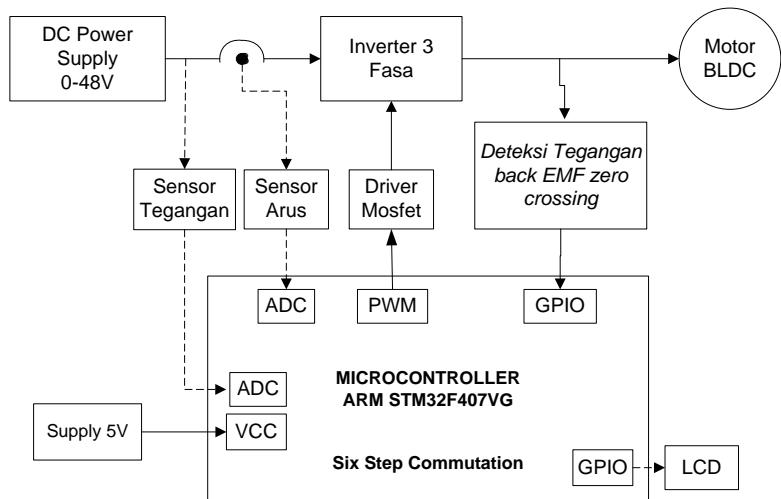
BAB III

PERENCANAAN DAN PEMBUATAN ALAT

Pada bab ini dijelaskan mengenai desain *software* dan *hardware* untuk sistem pengaturan kecepatan motor BLDC menggunakan deteksi tegangan *back EMF* yaitu meliputi rangkaian deteksi tegangan *back EMF zero crossing*, inverter tiga fasa, *driver* inverter tiga fasa, rangkaian sensor tegangan, dan *minimum system* mikrokontroler ARM STM32F4.

3.1. Blok Diagram Sistem

Gambaran umum dari sistem pengaturan kecepatan motor BLDC menggunakan deteksi tegangan *back EMF zero crossing* ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Blok diagram sistem

Pada proyek akhir ini, sumber tegangan masukan inverter menggunakan DC *power supply*, tegangan DC diubah menjadi tegangan AC menggunakan inverter sebagai sumber tegangan kerja motor BLDC. Selain digunakan untuk sumber inverter, sumber tegangan 48V juga digunakan untuk sumber tegangan mikrokontroler ARM sebesar 5V yang terlebih dahulu diturunkan melalui *dc-dc isolated converter*.

Untuk dapat mengendalikan motor BLDC tanpa menggunakan sensor *hall effect*, maka diperlukan rangkaian deteksi tegangan *back EMF zero crossing* yang terdiri dari pembagi tegangan, filter, *zero crossing detector*, dan rangkaian *schmitt trigger*. Hasil luaran rangkaian deteksi tegangan *back EMF zero crossing* inilah yang nantinya diolah oleh mikrokontroler untuk digunakan sebagai komutasi inverter tiga fasa.

Terdapat beberapa sensor yang digunakan oleh sistem antara lain berfungsi sebagai *monitoring*. Sensor yang difungsikan sebagai *monitoring* yaitu sensor arus DC dan sensor tegangan DC pada masukan inverter tiga fasa. Juga terdapat estimasi kecepatan menggunakan *counter* pada setiap *step* komutasi inverter yang diolah secara *software* oleh mikrokontroller. Seluruh masukan dari sensor akan diproses oleh mikrokontroller ARM dan ditampilkan pada LCD karakter.

Berdasarkan blok diagram yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 perancangan dan pembuatan perangkat lunak dan keras meliputi :

1. Perancangan dan pembuatan rangkaian inverter tiga fasa komutasi 120° .
 2. Perancangan dan pembuatan rangkaian deteksi tegangan *back EMF zero crossing*.
 3. Perancangan dan pembuatan rangkaian *driver* inverter tiga fasa.
 4. Perancangan dan pembuatan modul sensor tegangan dan sensor arus untuk masukan inverter.
 5. Perancangan dan pembuatan modul *minimum system* mikrokontroler ARM.

3.1.1. Perancangan dan Pembuatan Rangkaian Inverter Tiga Fasa

Pada proyek akhir ini rangkaian inverter tiga fasa digunakan untuk merubah tegangan DC dari DC power supply menjadi tegangan AC 3 fasa. Tegangan AC tersebut digunakan untuk sumber tegangan motor BLDC dengan daya sebesar 1000 W 48V. Dari spesifikasi daya dan tegangan motor tersebut maka dapat digunakan untuk mendesain rangkaian inverter tiga fasa.

Rangkaian inverter tiga fasa yang dibuat dihitung berdasarkan daya motor 1kW dengan asumsi effisiensi sebesar 85%. Perumusan efisiensi terlihat pada (3.1).

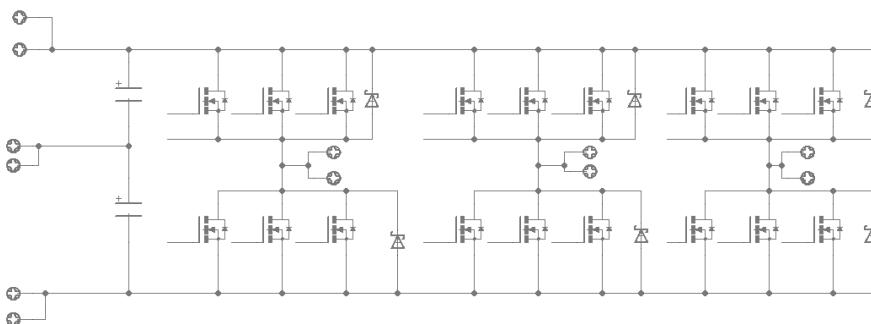
$$85\% = \frac{1000}{P_{in}} \cdot 100\%$$

$$P_{in} = 1176 \text{ Watt}$$

Jadi daya minimal rangkaian inverter tiga fasa yang dibuat sebesar 1176 Watt. Sedangkan perhitungan arus nominal motor untuk menentukan tipe mosfet yang akan digunakan sebagai komponen *switching* pada inverter yaitu dengan menggunakan persamaan (3.2).

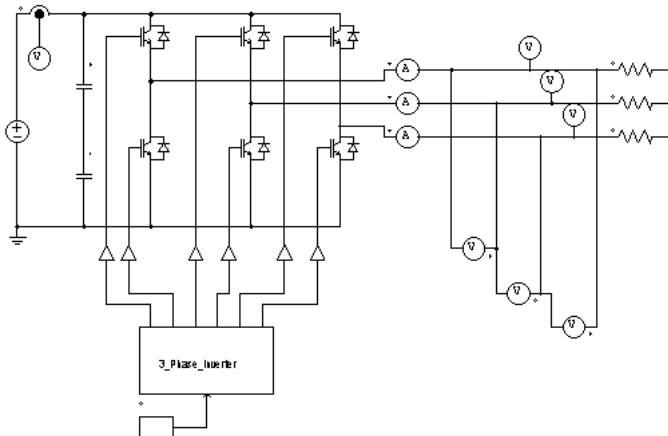
$$I_{motor} = \frac{1000}{48} = 20.83 A$$

Dari perhitungan arus tersebut, maka telah diketahui arus minimal dari mosfet yang digunakan. Pada proyek akhir ini mosfet yang digunakan yaitu jenis *n-channel* tipe FDH055N15A dan diparalel sebanyak tiga. Mosfet tipe ini memiliki tegangan kerja (V_{DSS}) mencapai 150V dan arus *drain* secara *continuous* sebesar 167A serta arus *drain pulsed* sebesar 668A. Pada Gambar 3.2 berikut merupakan skematis rangkaian inverter tiga fasa menggunakan parallel tiga mosfet



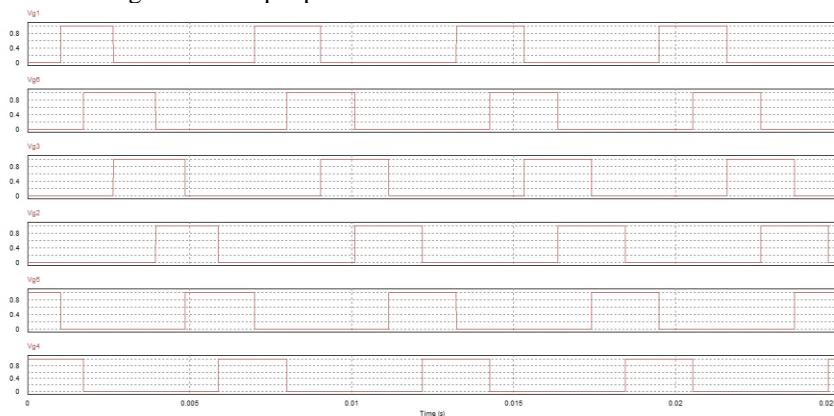
Gambar 3.2. Skematik rangkaian inverter tiga fasa parallel tiga mosfet dengan DC link capacitor.

Untuk lebih memperjelas perencanaan mengenai inverter tiga fasa, maka dibuat simulasi rangkaian inverter tiga fasa komutasi 120° menggunakan beban resistor dengan menggunakan *software* simulasi PSIM seperti yang terlihat pada Gambar 3.3.



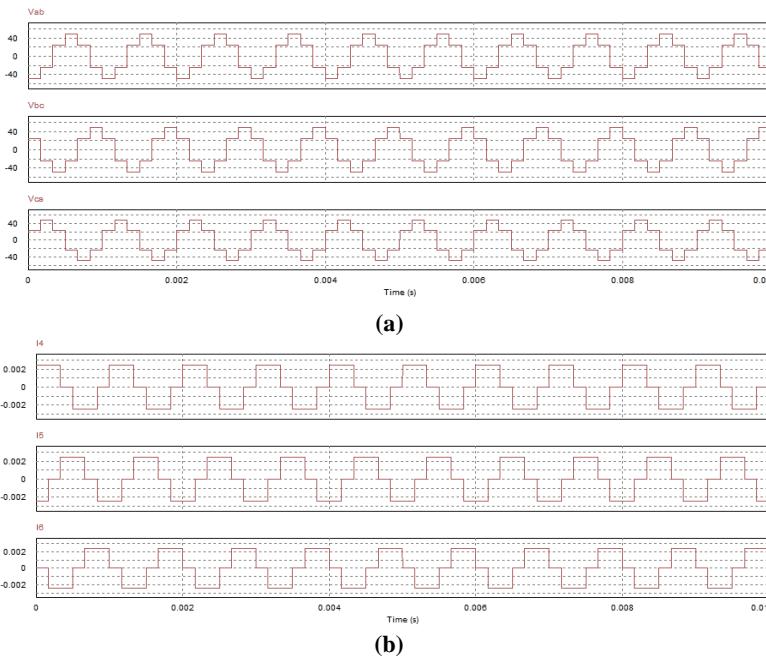
Gambar 3.3. Simulasi rangkaian inverter tiga fasa dengan menggunakan PSIM.

Gambar sinyal *gate driver* untuk pensaklaran tiap mosfet pada inverter tiga fasa terdapat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4. Respon pulsa pensaklaran 6 mosfet untuk inverter tiga fasa.

Dapat dilihat bahwa sudut penyulutan tiap mosfet berbeda dan setiap stepnya terdapat 2 mosfet yang aktif. Dari simulasi yang telah dilakukan, maka gelombang tegangan luaran *line-to-line* dan gelombang tegangan luaran *line-to-neutral* inverter bisa ditunjukkan pada Gambar 3.5.(a) dan (b).

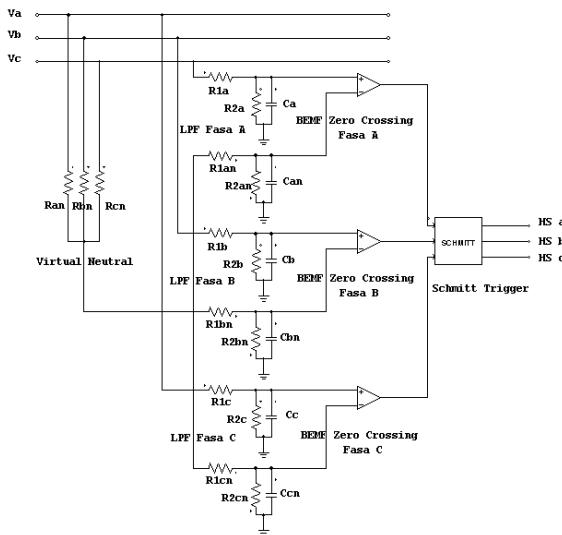


Gambar 3.5.(a) Tegangan luaran *line-to-line* inverter 3 fasa. **(b)** Tegangan luaran *line-to-neutral* inverter 3 fasa.

3.1.2. Perancangan dan Pembuatan Rangkaian Deteksi Tegangan *back EMF zero crossing*

Pada pengaturan kecepatan motor BLDC tanpa menggunakan sensor *hall effect* diperlukan rangkaian deteksi tegangan *back EMF zero crossing*. Tegangan *back EMF* yang timbul dari fasa *floating* merupakan indikasi dari posisi rotor dan dimungkinkan dapat digunakan untuk menentukan komutasi. Pendekstrian sinyal *back EMF* ini memerlukan tegangan netral sebagai referensi menentukan titik *zero* dari sinyal untuk menghasilkan sinyal digital. Karena titik netral pada motor BLDC sulit dijangkau, maka bisa diperoleh dengan membuat *virtual neutral point* dengan menyatukan ketiga fasa motor. Untuk membentuk sinyal digital sebagai hasil deteksi *back EMF zero crossing* diperlukan komparator untuk setiap tegangan fasa motor. Komparator di setiap fasa motor ini memberikan sinyal digital sesuai dengan adanya tegangan *back EMF* setiap motor. Hasil luaran *zero crossing* pada komparator akan dilewatkan *schmitt trigger* untuk membentuk sinyal digital yang bagus

dan mengurangi efek *bouncing*. Pendektsian tegangan *back EMF* ini sebelumnya melewati rangkaian *low pass filter* terlebih dahulu. Dengan terpasangnya filter, maka akan membuat sinyal tegangan yang awalnya tidak beraturan menjadi lebih halus yang kemudian diolah oleh komparator yang menghasilkan sinyal *zero crossing* dengan membandingkan referensi titik *virtual neutral*. Luaran sinyal yang telah melalui beberapa rangkaian tadi inilah yang nantinya digunakan sebagai komutasi inverter yang akan diolah oleh mikrokontroler layaknya sensor *hall effect*. IC komparator yang digunakan yaitu LM339N dan untuk rangkaian *schmitt trigger* menggunakan IC 74LS14. Susunan rangkaian deteksi tegangan *back EMF* terlihat pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6. Diagram rangkaian deteksi tegangan *back EMF zero crossing*.

Untuk mengurangi pembacaan sinyal yang tak beraturan, maka digunakanlah filter jenis *low pass*. Persamaan untuk *low-pass* filter terlihat pada persamaan (3.3).

$$f_c = \frac{R_1 + R_2}{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot C} \quad \dots \dots \dots \quad (3.3)$$

dimana R_1 dan R_2 merupakan pembagi tegangan, C merupakan nilai kapasitansi filter, f_c merupakan *cut-off* frekuensi. Untuk perencanaan pembagi tegangan atau penentuan nilai R_1 dan R_2 didasarkan pada

datasheet LM339N dengan memperhatikan nilai tegangan masukan yang mampu dibandingkan, kemudian dilakukan perhitungan pembagi tegangan sesuai dengan persamaan (3.4).

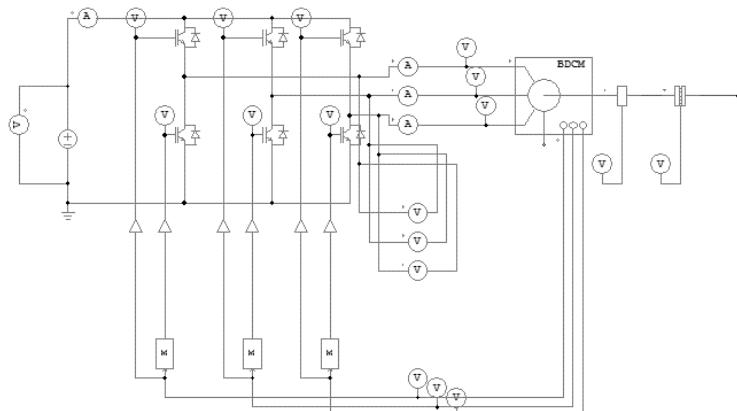
$$Vdc_{max} = \frac{R_2}{R_1+R_2} \times V_{in} \dots\dots\dots(3.4)$$

Dengan tegangan kerja motor sebesar 48V dan tegangan maksimum pada LM339N sebesar 36V, maka bisa dilakukan perhitungan dengan persamaan (3.4) dan menggunakan nilai $R_1 = 82 \text{ k}\Omega$ dan $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$. setelah nilai pembagi tegangan didapatkan, selanjutnya menentukan nilai kapasitor untuk filter menggunakan persamaan (3.5).

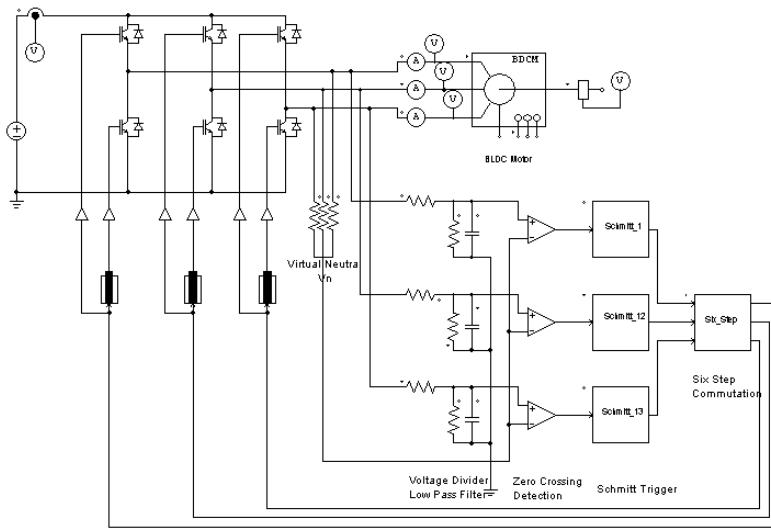
$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{pwm} \cdot R_2} \dots\dots\dots(3.5)$$

Dengan f_{pwm} yang digunakan untuk inverter 3 fasa sebesar 10 kHz, maka bisa didapatkan nilai C yang digunakan untuk filter yaitu sebesar $158 \text{ pF} \approx 150 \text{ pF}$.

Untuk memvalidasi metode *sensorless* yang digunakan dimana menggunakan deteksi tegangan *back EMF zero crossing*, maka dilakukan simulasi terlebih dahulu di PSIM dengan membandingkan dengan menggunakan metode *sensored* (menggunakan sensor *hall effect*). Untuk rangkaian simulasi metode *sensored* tampak pada Gambar 3.7.(a) dan metode *sensorless* pada Gambar 3.7.(b).



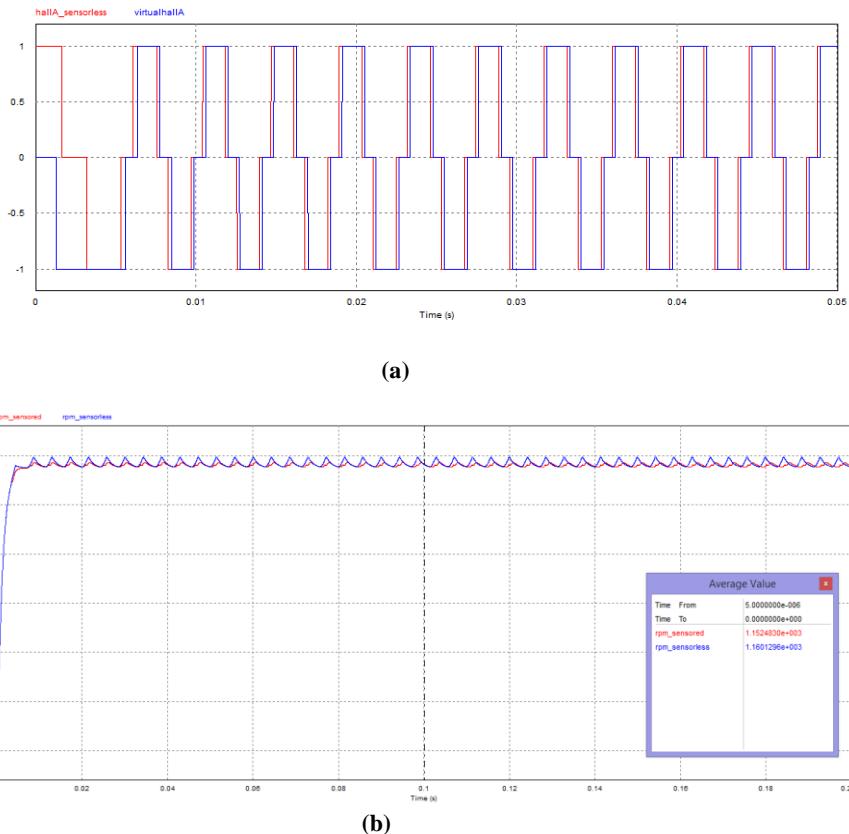
(a)



(b)

Gambar 3.7. (a) Rangkaian pengaturan kecepatan motor BLDC menggunakan *hall effect sensor*. (b) Rangkaian pengaturan kecepatan motor BLDC menggunakan deteksi tegangan *back EMF zero crossing*.

Dari simulasi pada Gambar 3.7.(a) dan 3.7.(b) didapatkan respon putaran motor seperti pada Gambar 3.8.(b). Pada metode *sensored* menghasilkan kecepatan sebesar 1152 rpm dan pada metode *sensorless* menghasilkan kecepatan 1160 rpm. Sehingga terdapat selisih nilai rata-rata kecepatan sebesar 8 rpm. Hal ini membutukan bahwa penggunaan metode deteksi tegangan *back EMF zero crossing* pada motor BLDC mampu mencapai nilai kecepatan sesuai dengan level kecepatan pada metode *sensored*. Perbedaan nilai kecepatan disini disebabkan oleh perbedaan frekuensi sinyal komutasi inverter antara sensor *hall effect* dengan deteksi tegangan *back EMF zero crossing*. Frekuensi dari sinyal deteksi tegangan *back EMF zero crossing* lebih besar daripada frekuensi dari sensor *hall effect* dan terjadi pergeseran seperti yang terlihat pada Gambar 3.8.(a).



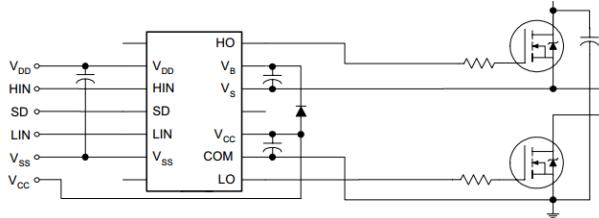
Gambar 3.8.(a) Perbandingan sinyal sensor *hall effect* dan deteksi tegangan *back EMF zero crossing*. **(b)** Respon putaran motor BLDC menggunakan *hall effect sensor* dan deteksi tegangan *back EMF*.

3.1.3. Perancangan dan Pembuatan Rangkaian *Driver Inverter* Tiga Fasa

Driver inverter digunakan sebagai penyulut *gate* mosfet yang digunakan pada rangkaian inverter karena pulsa luaran dari PWM mikrokontroler ARM tidak mampu menyulut secara langsung terhadap mosfet. Tegangan luaran PWM mikrokontroler ARM sebesar ± 3.3 V, sedangkan tegangan penyulutan mosfet sebesar ± 15 V sehingga dibutuhkan *driver* inverter tiga fasa sebagai penyulut. Luaran dari mikrokontroler ARM terlebih dahulu melalui IC *opto coupler* TLP521.

Opto coupler berfungsi sebagai pemisah (*isolated*) antara mikrokontroler ARM dan driver inverter. Karena tidak ada hubungan langsung sehingga apabila terjadi *fault* maupun kerusakan pada sisi *driver* inverter tidak menyebabkan kerusakan pada sisi pembangkit sinyal atau sebaliknya. *Driver* inverter digunakan untuk memberikan *delay time* pada penyulutan inverter sehingga tidak terjadi hubung singkat pada saat penyulutan mosfet.

Pada proyek akhir ini *driver* inverter tiga fasa menggunakan IC IR2110 yang memberikan nilai *delay time* selama 10 ns. Pada IC IR2110 terdapat dua pin masukan yang dapat digunakan untuk dua sinyal PWM sehingga dalam proyek akhir ini dibutuhkan tiga buah IC IR2110 untuk menyulut 6 mosfet. Gambar rangkaian IR2110 ditampilkan pada Gambar 3.9.

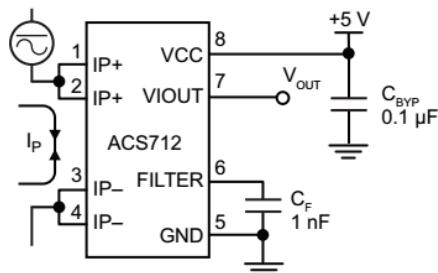


Gambar 3.9. Rangkaian IR2110.¹

3.1.4. Perancangan dan Pembuatan Modul Sensor Tegangan dan Sensor Arus untuk Masukan Inverter.

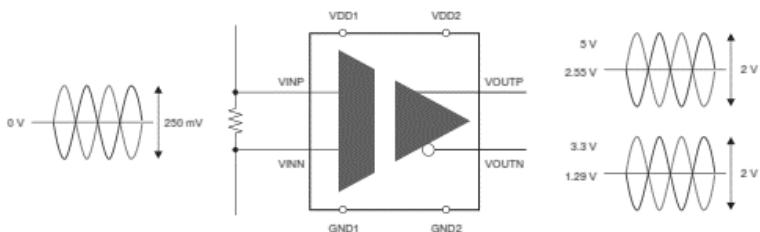
Pada proyek akhir ini dirancang sensor untuk pembacaan nilai arus dan tegangan pada masukan inverter 3 fasa. Sensor arus digunakan untuk mengukur arus DC untuk masukan inverter melalui masukan ADC pada mikrokontroler ARM, sehingga dapat mengetahui nilai arus yang mengalir. Sensor arus yang digunakan yaitu ACS 712 dengan arus maksimal sebesar 30 ampere dengan rangkaian seperti pada Gambar 3.10.

¹ Datasheet IR2110 hal.1



Gambar 3.10. Rangkaian sensor arus ACS712-30A²

Selanjutnya, parameter yang perlu dimonitor yaitu tegangan masuk inverter 3 fasa. Sensor tegangan yang digunakan pada dasarnya yaitu jenis *voltage divider*. Supaya lebih aman dalam arti blok sensor tegangan terpisah (*isolated*) dengan blok mikrokontroler ARM, maka menggunakan sebuah IC jenis AMC 1200. AMC1200 yang memiliki kemampuan tegangan sesuai dengan konfigurasi dari pembagian tegangan yang digunakan. Maksimum tegangan yang boleh masuk ke sensor AMC1200 maksimal adalah 250mVpp. Keluaran dari AMC adalah tegangan dc ripple. Perubahan yang dihasilkan dari keluaran sensor AMC ini sangat kecil yaitu mulai dari tegangan 0 mVpp sampai dengan 250 mVpp. Pada Gambar 3.11. dibawah merupakan gambaran dari skematik dan cara kerja dari AMC1200.



Gambar 3.11. Rangkaian skematisik AMC1200³

² Allegro datasheet ACS712-20A. Hal 1

³ Datasheet Texas Instrument AMC1200 hal.1

Perhitungan nilai resistor untuk rangkaian *voltage divider* dapat dihitung menggunakan perumusan (3.6).

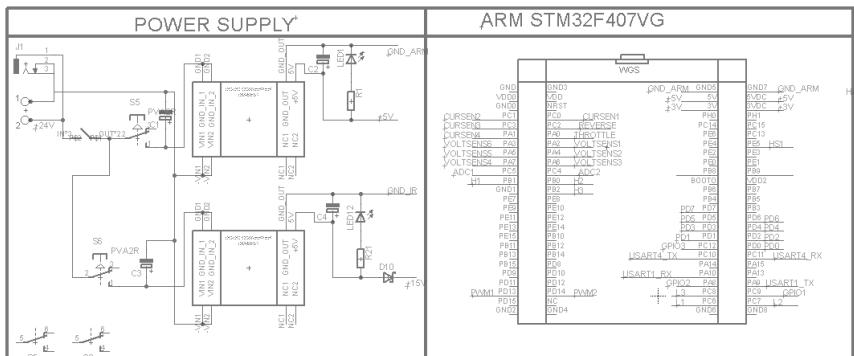
Pada proyek akhir ini perencanaan untuk besarnya nilai tegangan yang mampu dibaca oleh sensor yaitu sebesar 48V, luaran sensor sebesar 250mV, dan nilai R_2 telah ditentukan sebesar $1\text{k}\Omega$ sehingga bisa didapatkan nilai R_1 sebesar :

$$0.25 = \frac{1000}{R2 + 1000} x 48$$

$$R_2 = 191 \text{ k}\Omega \approx 200 \text{ k}\Omega$$

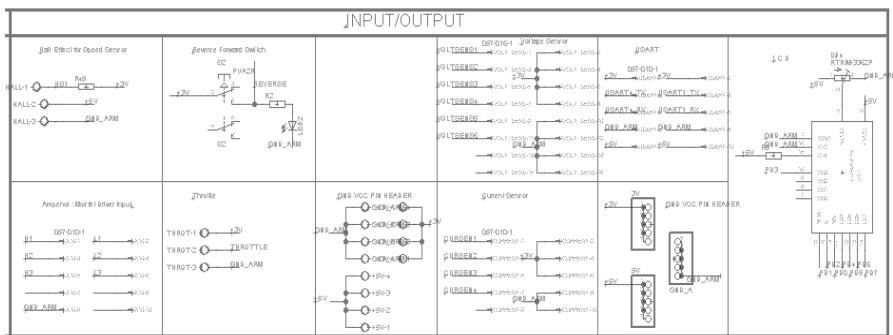
3.1.5. Perancangan dan Pembuatan Modul Mikrokontroller ARM

Mikrokontroler merupakan pusat pengendali dari sistem proyek akhir ini. Mikrokontroler yang digunakan yaitu ARM STM32F407VGTx. Mikrokontroller ARM membutuhkan tegangan masukan 5V, maka pada *power supply* untuk mikrokontroler ARM diperlukan dc-dc *isolated* yang akan menurunkan tegangan sumber aki 48V menjadi 5V. Pada Gambar 3.12. berikut merupakan Gambar skematik mikrokontroler ARM dan *power supply*.



Gambar 3.12. Skematik mikrokontroler ARM dan rangkaian sumber tegangan.

Mikrokontroler membangkitkan gelombang keluaran PWM inverter, mengolah masukan sinyal dari sensor, dan menentukan proses komutasi untuk inverter. Mikrokontroler juga menerima masukan dari potensio sebagai variable resistor (*throttle*), selain itu mikrokontroler juga akan menampilkan beberapa data pada LCD karakter. Pada Gambar 3.13. berikut merupakan skematik perancangan I/O untuk mikrokontroler ARM.



Gambar 3.13. Gambar skematik I/O mikrokontroler ARM

Pada Tabel 3.1 dijelaskan perancangan modul input/output (I/O) ARM STM32F407VGTx yang digunakan pada proyek akhir ini.

Tabel 3.1 Perencanaan input/output

| PORT | Kegunaan | I/O |
|---------|------------------|--------|
| PORTA.0 | Throttle Gas | Input |
| PORTA.2 | Sensor Tegangan | Input |
| PORTA.4 | Sensor Tegangan | Input |
| PORTA.6 | Sensor Tegangan | Input |
| PORTA.7 | Sensor Tegangan | Input |
| PORTC.0 | Sensor Arus | Input |
| PORTE.5 | Sensor Kecepatan | Input |
| PORTB.0 | Sinyal H1 | Output |
| PORTB.1 | Sinyal H2 | Output |
| PORTB.2 | Sinyal H3 | Output |
| PORTD.0 | LCD | Output |
| PORTD.1 | LCD | Output |
| PORTD.2 | LCD | Output |
| PORTD.3 | LCD | Output |
| PORTD.4 | LCD | Output |
| PORTD.5 | LCD | Output |
| PORTD.6 | LCD | Output |
| PORTD.7 | LCD | Output |
| PORTC.6 | Sinyal L1 | Output |
| PORTC.7 | Sinyal L2 | Output |
| PORTC.8 | Sinyal L3 | Output |

Halaman ini Sengaja Dikosongkan

BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISIS

BAB IV

PENGOLAHAN DATA DAN ANALISIS

Pada bab ini membahas tentang pengujian dan analisa data yang telah direncanakan berdasarkan bab sebelumnya. Pengujian yang dilakukan meliputi :

- a. Pengujian parsial
 1. Pengujian sinyal PWM dari modul mikrokontroler ARM
 2. Pengujian rangkaian *driver* inverter tiga fasa
 3. Pengujian rangkaian inverter tiga fasa komutasi 120° dengan beban lampu 12x100 Watt
 4. Pengujian sensor tegangan dan sensor arus
 5. Pengujian rangkaian deteksi tegangan *back EMF zero crossing*
- b. Pengujian integrasi
 1. Pengujian integrasi sistem pengaturan kecepatan motor BLDC menggunakan metode *sensored* dan metode *sensorless* dalam kondisi tanpa beban
 2. Pengujian integrasi sistem pengaturan kecepatan motor BLDC menggunakan metode *sensored* dan metode *sensorless* dalam kondisi berbeban
 3. Analisa perbandingan penggunaan metode *sensored* dan *sensorless*,

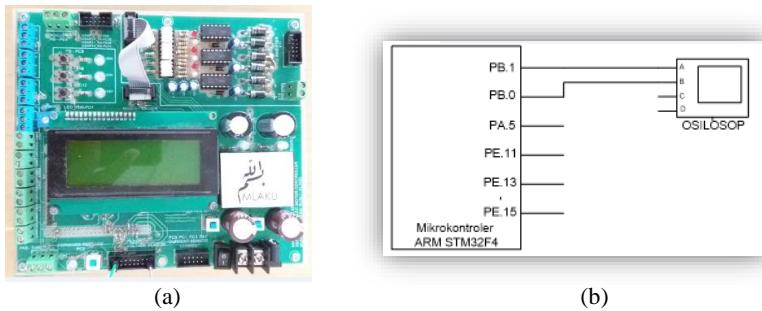
Adapun peralatan yang digunakan dalam melakukan pengujian tersebut diantaranya :

1. Motor BLDC
2. Motor DC
3. DC Power Supply
4. *Resistance load* 100V
5. *Function generator*
6. Volt meter DC
7. Ampere meter DC
8. Osiloskop
9. Tacho meter
10. Beban ban mobil dengan sistem penggereman

4.1 Pengujian Parsial

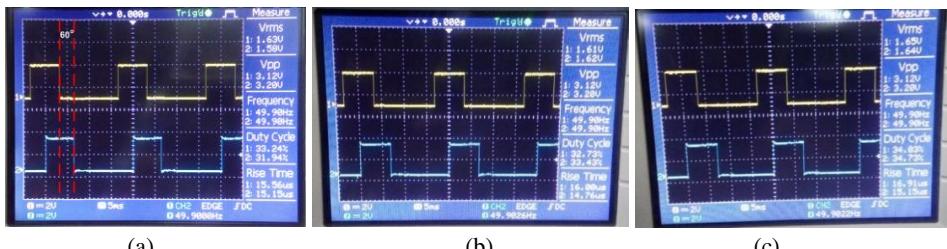
4.1.1. Pengujian Sinyal PWM dari Mikrokontroller ARM

Sinyal PWM *six-step* digunakan untuk menyulut *gate* MOSFET pada inverter tiga fasa, dengan demikian maka proses pensaklaran inverter dapat dilakukan. Pada proyek akhir ini sinyal PWM dibangkitkan dari mikrokontroler, sehingga untuk frekuensi sinyal PWM dan *duty cycle* dapat diatur sesuai keinginan. Pada modul mikrokontroler, sinyal PWM *high side* (H1, H2 dan H3) secara berturut-turut ditunjukkan pada PORTB.1, PORTB.0 dan PORTB.2 sedangkan sinyal penyulutan MOSFET untuk sisi *low side* (L1, L2 dan L3) secara berturut-turut ditunjukkan pada PORTC.6, PORTC.7, PORTC.8.



Gambar 4.1. (a) Hardware mikrokontroler ARM (b) Skema Pengujian sinyal PWM pada mikrokontroler.

Setelah *hardware* modul mikrokontroler ARM dibuat, selanjutnya dilakukan proses pembuatan program PWM inverter dan pengujian sinyal PWM yang dibangkitkan dari mikrokontroler. Hardware modul mikrokontroler ARM terlihat pada Gambar 4.1.(a) dan skema pengujian sinyal PWM pada mikrokontroler STM32F4 ditunjukkan pada Gambar 4.1.(b). Pengujian sinyal *six-step* untuk sisi *high* dan *low*, bentuk gelombangnya ditunjukkan pada Gambar 4.2.(a)(b)(c).

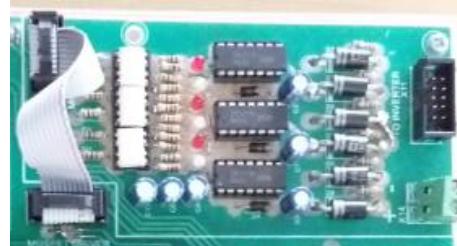


Gambar 4.2. (a) Sinyal PWM S1/H1 (warna kuning), S2/L3 (warna biru) (b) Sinyal PWM S3/H2 (warna kuning), S4/L1 (warna biru) (c) Sinyal PWM S5/H3 (warna kuning), S6/L2 (warna biru).

Pada Gambar 4.2.(a)(b)(c) merupakan respon luaran sinyal untuk pensaklaran *high side* dan *low side*. Terdapat tiga sisi *high side* dari inverter tiga fasa yang ditunjukkan dengan simbol S1, S3 dan S5 sedangkan sisi *low side* dari inverter tiga fasa ditunjukkan dengan simbol S2, S4 dan S6. Sinyal luaran tersebut merupakan sinyal *six-step* dengan frekuensi 50 Hz. Nilai *duty cycle* yang tertera pada osiloskop untuk sinyal keluaran S1/H1 dan S2/L3 berturut-turut adalah 33.24% dan 31.94%. Hal ini menandakan pensaklaran atau komutasi yang digunakan adalah komutasi 120° , dimana S1/H1 dan S2/L3 akan ON selama 120° dan OFF selama 240° . Dari sinyal luaran pada Gambar 4.2.(a)(b)(c) keenam sinyal (*high side* dan *low side*) tersebut melakukan *switching* secara berurutan dengan selisih waktu ON sebesar 60° .

4.1.2. Pengujian Rangkaian Driver Inverter Tiga Fasa

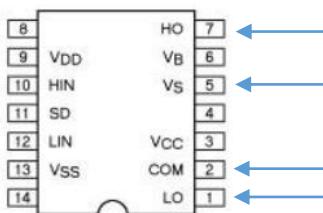
Hardware dari rangkaian driver inverter tiga fasa menggunakan TLP521 dan IC IR2110 ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3. *Hardware driver* MOSFET menggunakan IC TLP 521 dan IR2110

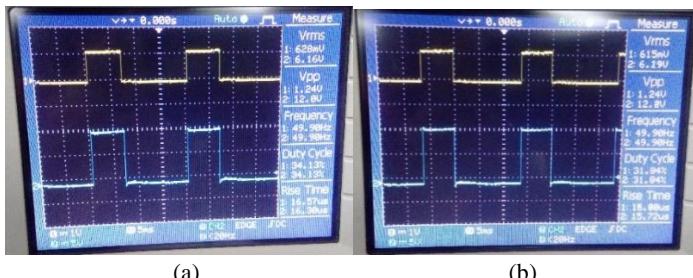
Pada Gambar 4.3. terdapat dua buah IC, yaitu IC IR2110 dan IC TLP521. IC IR2110 merupakan *driver* dari inverter sedangkan IC TLP521 merupakan IC *optocoupler*. *Optocoupler* merupakan rangkaian pemisah yang digunakan untuk meneruskan suatu sinyal dari mikrokontroler agar bagian kontrol dan bagian yang dikontrol tidak terhubung secara langsung. Apabila terjadi kerusakan pada bagian yang dikontrol tidak menyebabkan kerusakan pada bagian kontrol maupun sebaliknya, hal ini sering disebut dengan *isolated circuit*.

Pada *hardware* rangkaian driver inverter tiga fasa yang ditunjukkan pada Gambar 4.3. terdapat enam buah lampu LED yang digunakan sebagai indikator penyulutan masing-masing MOSFET. Masukan dari *hardware* rangkaian IR2110 adalah enam pulsa penyulutan MOSFET yang berasal dari mikrokontroler. *Test point* pengujian gelombang IC IR2110 terdapat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4. Test point IC IR2110.

Pengujian sinyal luaran dari *driver* MOSFET IR2110 ini dilakukan dengan memberi masukan sinyal PWM dari mikrokontroler ke TLP521, kemudian bentuk sinyal dilihat di osiloskop pada luaran dari IC IR2110. Saat pengujian sinyal *high* maka *test point* IC IR2110 diletakkan pada kaki 5 dan 7 sedangkan pengujian sinyal *low* maka *test point* IC IR2110 diletakkan pada kaki 1 dan 2 yang responnya seperti tampak pada Gambar 4.5.(a).



Gambar 4.5. (a) Perbandingan sinyal PWM *High* dari mikrokontroler dan IR2110. (b) Perbandingan sinyal PWM *Low* dari mikrokontroler dan IR2110.

Pada Gambar 4.5.(a) dan 4.5.(b) terlihat bahwa bentuk gelombang PWM tetap namun hanya amplitudo saja yang berubah. Pada sinyal PWM mikrokontroler memiliki amplitudo 1.24 Volt sedangkan sinyal PWM luaran IC IR2110 memiliki amplitudo 12 Volt. Kondisi tersebut menandakan bahwa IC IR2110 bersifat menguatkan sinyal PWM dari mikrokontroler. PWM yang keluar setelah melewati IC IR2110 digunakan untuk menyulut *gate* MOSFET dikarenakan *gate* MOSFET memerlukan tegangan kerja minimum 10V. Selain itu, IC IR2110 terdapat *floating channel* yaitu menyediakan *ground* semu untuk peyulutan MOSFET pada konfigurasi sisi *high*.

4.1.3. Pengujian Rangkaian Inverter Tiga Fasa dengan Beban Lampu 12x100 Watt

Pada Bab 3 sub bab inverter tiga fasa telah dijelaskan perancangan dan pembuatan inverter tiga fasa. *Hardware* dari rangkaian inverter tiga fasa ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6. *Hardware* rangkaian inveter tiga fasa.

Hardware inverter tiga fasa ini terdiri dari 18 MOSFET FDH055N15A dan 2 kapasitor DC link yang dirangkai seri. Pada proyek akhir ini, pengujian rangkaian inverter tiga fasa komutasi 120° dilakukan dengan menggunakan beban lampu 12×100 Watt yang disusun bintang. Pengujian rangkaian tiga fasa dilakukan dengan memberikan tegangan masukan variabel dari masukan tegangan DC, *duty cycle* dibuat konstan dan frekuensi *switching* juga dibuat konstan. Pada Gambar 4.7. merupakan rangkaian pengujian inverter tiga fasa.



Gambar 4.7. Rangkaian pengujian inverter tiga fasa.

Data hasil pengujian rangkaian inverter tiga fasa dengan beban 12x100 Watt ditunjukkan pada Tabel 4.1 dan berupa nilai tegangan rms. pengujian dilakukan dengan tegangan masukan 5-50V dan frekuensi sebesar 50 Hz. Rumusan tegangan luaran *line-to-line* terlihat pada (4.1) dan rumusan % Error pada (4.2).¹

¹ Moh. H. Rasheed. *Power Electronics Circuits, Devices, and Applications Third Edition*

Tabel 4.1 Data hasil pengujian inverter tiga fasa dengan beban lampu pijar

| Vdc (V) | Idc (A) | Vll rms Exp. | | | Vll rms Calc. (V) | % Error (%) | | |
|------------|------------|--------------|------------|------------|----------------------|-------------|-------|--------|
| | | Vab (V) | Vbc (V) | Vca (V) | | Vab | Vbc | Vca |
| 5 | 0.02 | 3.34 | 3.3 | 3.32 | 3.3765 | 1.081 | 2.265 | 1.673 |
| 10 | 0.05 | 6.72 | 6.63 | 6.69 | 6.753 | 0.488 | 1.821 | 0.932 |
| 15 | 0.05 | 10 | 10 | 9.99 | 10.1295 | 1.278 | 1.278 | 1.377 |
| 20 | 0.06 | 13.4 | 13.4 | 13.4 | 13.506 | 0.784 | 0.784 | 0.784 |
| 25 | 0.07 | 16.4 | 16.5 | 16.2 | 16.8825 | 2.857 | 2.265 | 4.042 |
| 30 | 0.08 | 19.6 | 19.6 | 19.5 | 20.259 | 3.252 | 3.252 | 3.746 |
| 35 | 0.08 | 22.8 | 22.9 | 22.7 | 23.6355 | 3.534 | 3.111 | 3.958 |
| 40 | 0.1 | 26.4 | 26.8 | 26.5 | 27.012 | 2.265 | 0.784 | 1.895 |
| 45 | 0.1 | 29.4 | 29.6 | 29.4 | 30.3885 | 3.252 | 2.59 | 3.252 |
| 50 | 0.1 | 32.9 | 33.2 | 32.8 | 33.765 | 2.561 | 1.673 | 2.8579 |

Pada Gambar 4.8.(a) merupakan salah satu respon tegangan keluaran inverter tiga fasa *line-to-line* fasa C-A saat diberi beban resistif dan diberi tegangan input 50V. Dari data pengujian, diperoleh nilai V_{peak} dan V_{rms} yang berbeda-beda.. Dari hasil pengukuran menggunakan osiloskop dapat dilihat bahwa gelombang tegangan line to line mempunyai 6 step karena pada pengujian inverter ini menggunakan komutasi 120° . Gambar gelombang tersebut sesuai dengan Gambar gelombang yang sudah dijelaskan pada bab 2 dan pada hasil simulasi menggunakan PSIM pada bab 3.



Gambar 4.8.(a) Respon tegangan luaran inverter fasa C-A. **(b)** Respon tegangan luaran inverter *line-to-neutral* fasa B.

Sedangkan bentuk gelombang tegangan *line-to-neutral* pada inverter 3 fasa mempunyai bentuk gelombang yang berbeda dengan tegangan line to line inverter 3 fasa seperti pada Gambar 4.8.(b) Pada gelombang line to neutral tidak terlihat six-step namun jika dilihat tegangan antara fasa A-N, B-N dan C-N mempunyai perbedaan antar fasa sebesar 120° . Data nilai tegangan rms dari pengujian rangkaian inverter tiga fasa *line-to-neutral* ditunjukkan di dalam Tabel 4.2. Pengujian dilakukan dengan tegangan masukan sebesar 0-50 V dan *duty cycle* dibuat konstan 100 % dengan frekuensi sebesar 50 Hz. Perumusan tegangan *line-to-neutral* terlihat pada (4.3) dan rumusan % error pada (4.4).

$$Error = \frac{|V_{out}(l-n) (praktek) - V_{out}(l-n) (teori)|}{V_{out}(l-n) (teori)} \times 100 \% \dots\dots\dots(4.4)$$

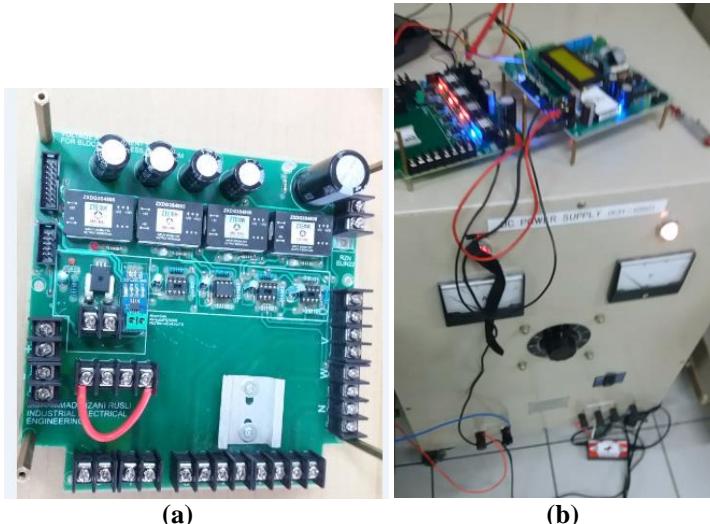
Tabel 4.2. Data hasil pengujian tegangan *line-to-neutral* inverter tiga fasa.

| Vin (V) | Vout theory (V) | Vout L-N (V) | | | Error Vout (%) | | |
|------------|-----------------------|--------------|------|------|----------------|------|------|
| | | A-N | B-N | C-N | A-N | B-N | C-N |
| 5 | 1.94 | 1.94 | 1.92 | 1.89 | 2.02 | 5.12 | 3.04 |
| 10 | 3.89 | 3.76 | 3.79 | 4 | 3.56 | 6.38 | 2.59 |
| 15 | 5.84 | 5.84 | 5.97 | 5.85 | 0.14 | 2.08 | 0.02 |
| 20 | 7.79 | 7.75 | 7.99 | 7.81 | 0.61 | 2.46 | 0.15 |
| 25 | 9.74 | 9.38 | 9.71 | 9.54 | 3.76 | 0.38 | 2.12 |
| 30 | 11.69 | 11.1 | 11.5 | 11.3 | 5.1 | 1.68 | 3.39 |
| 35 | 13.64 | 12.9 | 13.5 | 13.1 | 5.46 | 1.07 | 4.00 |
| 40 | 15.59 | 15.1 | 15.7 | 15.4 | 3.17 | 0.66 | 1.25 |
| 45 | 17.54 | 16.5 | 17.5 | 17.1 | 5.95 | 0.25 | 2.53 |
| 50 | 19.49 | 18.6 | 19.8 | 19.2 | 4.58 | 1.56 | 1.51 |

Pada Tabel 4.2 menunjukkan bahwa % error dari tegangan keluaran *line-to-neutral* inverter saat pengujian terhadap tegangan keluaran *line-to-neutral* inverter secara perhitungan teori sangat kecil, yaitu dibawah 10%.

4.1.4. Pengujian Sensor Tegangan dan Sensor Arus

Pada projek akhir ini, sensor tegangan dan sensor arus digunakan sebagai *monitoring* sumber tegangan DC pada sisi masukan inverter. *Hardware* modul sensor arus dan tegangan terlihat pada Gambar 4.9. (a).



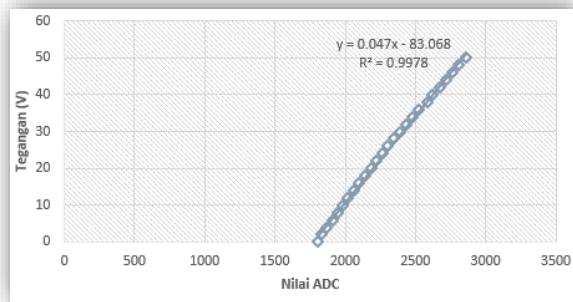
Gambar 4.9. (a) Hardware modul sensor arus dan tegangan. (b) Pengujian sensor arus dan sensor tegangan.

Pada pengujian kali ini, sensor tegangan diuji dengan perubahan tegangan input mulai dari 0V hingga 50V dengan menggunakan DC *Power Supply* 100V dan dilihat responnya terhadap perubahan nilai ADC nya. Gambar pengujian sensor tegangan tampak pada Gambar 4.13.(b). Dengan step tegangan sebesar 2V untuk sensor tegangan dan step 0.5A untuk sensor arus. Pengujian sensor arus DC ini menggunakan beban *resistance load* 100V dengan sumber tegangan berupa *power supply* DC 100V. Didapatkan beberapa data pengujian terhadap nilai ADC seperti pada Tabel 4.3.

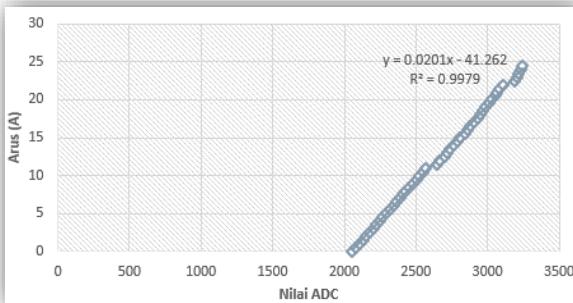
Tabel 4.3. Data hasil pengujian sensor tegangan dan sensor arus

| Vdc (V) | Vo ADC (V) | Nilai ADC | Idc (A) | Vo ADC (V) | Nilai ADC |
|------------|---------------|--------------|------------|---------------|--------------|
| 0 | 1.286 | 1804 | 0 | 1.451 | 2055 |
| 2 | 1.306 | 1830 | 1 | 1.489 | 2106 |
| 4 | 1.335 | 1869 | 2 | 1.52 | 2151 |
| 6 | 1.36 | 1907 | 3 | 1.555 | 2201 |
| 8 | 1.387 | 1945 | 4 | 1.59 | 2249 |
| 10 | 1.414 | 1979 | 5 | 1.62 | 2292 |
| 12 | 1.442 | 2019 | 6 | 1.654 | 2341 |
| 14 | 1.47 | 2063 | 7 | 1.687 | 2387 |
| 16 | 1.499 | 2099 | 8 | 1.716 | 2429 |
| 18 | 1.532 | 2143 | 9 | 1.746 | 2474 |
| 20 | 1.558 | 2182 | 10 | 1.781 | 2522 |
| 22 | 1.588 | 2220 | 11 | 1.812 | 2567 |
| 24 | 1.614 | 2268 | 12 | 1.88 | 2665 |
| 26 | 1.648 | 2305 | 13 | 1.916 | 2720 |
| 28 | 1.677 | 2348 | 14 | 1.946 | 2763 |
| 30 | 1.709 | 2388 | 15 | 1.985 | 2809 |
| 32 | 1.738 | 2432 | 16 | 2.012 | 2860 |
| 34 | 1.772 | 2482 | 17 | 2.04 | 2905 |
| 36 | 1.805 | 2520 | 18 | 2.06 | 2950 |
| 38 | 1.845 | 2582 | 19 | 2.099 | 2984 |
| 40 | 1.873 | 2620 | 20 | 2.13 | 3030 |
| 42 | 1.907 | 2673 | 21 | 2.158 | 3068 |
| 44 | 1.942 | 2720 | 22 | 2.186 | 3108 |
| 46 | 1.972 | 2760 | 23 | 2.246 | 3208 |
| 48 | 2.006 | 2809 | 24 | 2.262 | 3236 |
| 50 | 2.041 | 2858 | 25 | 2.294 | 3273 |

Dari data pada Tabel 4.4 diatas, maka didapatkan grafik nilai ADC terhadap tegangan seperti pada Gambar 4.10.(a) dan grafik nilai ADC terhadap arus pada Gambar 4.10.(b). Setelah didapatkan grafik, maka ditampilkan juga nilai persamaan garis dari grafik tersebut, yang nantinya nilai persamaan garis ini akan dimasukkan ke perumusan sensor arus dan tegangan pada program mikrokontroller.



(a)

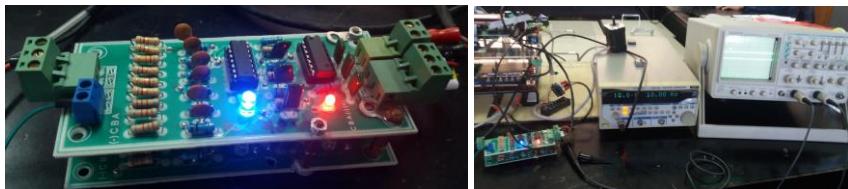


(b)

Gambar 4.10.(a) Grafik nilai pembacaan ADC terhadap tegangan. **(b)** Grafik nilai pembacaan ADC terhadap arus.

4.1.5. Pengujian Rangkaian Deteksi Tegangan *back EMF zero crossing*

Rangkaian deteksi tegangan *back EMF zero crossing* digunakan untuk menghasilkan luaran berupa sinyal digital seperti sensor *hall effect*. Rangkaian deteksi tegangan terdiri dari *voltage divider* dan *low pass filter*, komparator *zero crossing*, dan rangkaian *schmitt trigger*. Deteksi tegangan *back EMF zero crossing* dilakukan pada tiap fasa motor BLDC. Hardware rangkaian deteksi tegangan *back EMF zero crossing* terlihat pada Gambar 4.11.(a) dan rangkaian pengujiannya terlihat pada Gambar 4.11.(b). Pengujian rangkaian *zero crossing* yaitu dengan memberikan sinyal sinusoidal dengan amplitudo 0.5V dan 2V dengan frekuensi 1kHz dari *function generator* yang kemudian dilihat menggunakan osiloskop.



Gambar 4.11.(a) Hardware rangkaian deteksi tegangan *back EMF zero crossing*. **(b)** Pengujian rangkaian deteksi tegangan *back EMF zero crossing*.

Luaran sinyal *zero crossing* akan dilewatkan rangkaian *schmitt trigger*, tujuannya agar memperbaiki pembentukan sinyal digital dan mengurangi efek *bouncing*. Luaran sinyal dari rangkaian *schmitt trigger* bersifat terbalik dengan sinyal luaran komparator *zero crossing*. Hasil pengujian rangkaian *zero crossing* dan *schmitt trigger* tampak pada Tabel 4.4.

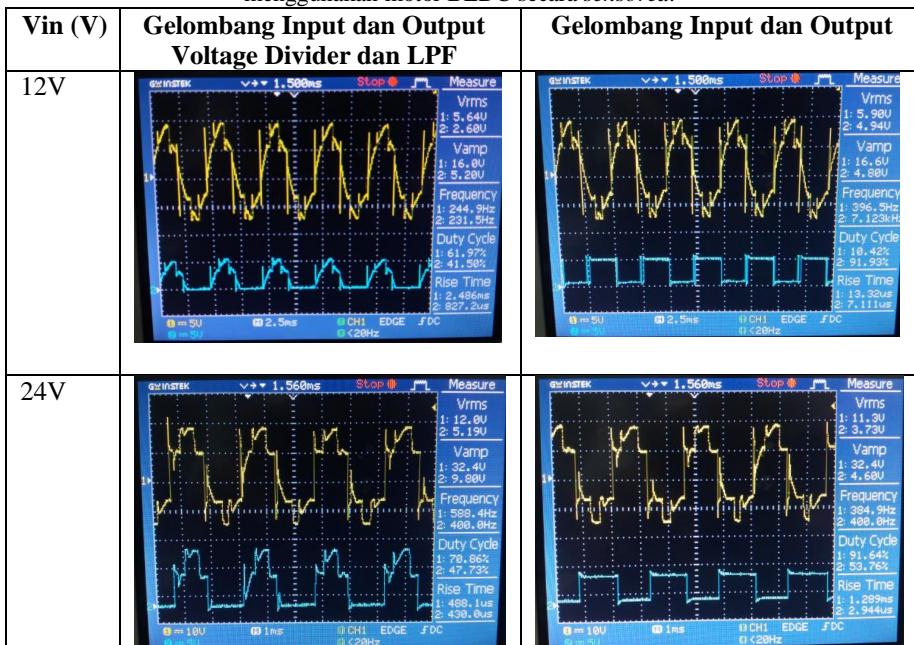
Tabel 4.4. Hasil pengujian rangkaian *back EMF zero crossing* menggunakan masukan dari *function generator*.

| Vin (V) | Gambar Gelombang |
|------------------------|------------------|
| Sinusoidal 0.5 Vp-p | |
| Sinusoidal 1 Vp-p | |

Juga dilakukan pengujian rangkaian *voltage divider* dan filter pada sisi masukan rangkaian deteksi tegangan *back EMF zero crossing* sebelum diolah oleh komparator *zero crossing*, tujuannya untuk memperhalus sinyal dan mengurangi sinyal *noise* maupun spike tegangan. Pengujian rangkaian dilakukan pada pengoperasian motor BLDC *Anaheim* dengan tegangan input 12V dan 24V menggunakan metode *sensored*, kemudian terminal ketiga fasanya dimasukkan ke rangkaian deteksi tegangan *back EMF zero crossing*. Hasil pengujian sebelum dan sesudah difilter tampak pada Tabel 4.5. kolom kedua. Gelombang yang berwarna kuning merupakan gelombang masukan rangkaian, yaitu tegangan fasa terhadap *virtual neutral*. Terlihat sinyal yang berwarna biru tampak lebih halus dan menjadi fasa positif saja. Kemudian juga dilakukan pengujian luaran rangkaian *back EMF zero crossing* seperti pada Tabel 4.5. kolom ketiga. Gambar sinyal yang berwarna biru itulah yang

merupakan luaran dari rangkaian, sedangkan yang berwarna kuning sama seperti gambar pada kolom kedua. Luaran sinyal pada rangkaian ini yang berupa sinyal kotak. Inilah yang akan menjadi logika komutasi pada inverter tiga fasa. Sinyal luaran rangkaian menyerupai sinyal sensor *hall effect*, tetapi bedanya pada rangkaian ini berupa sinyal *invers* dari *zero crossing* karena lebih dahulu dilewatkan rangkaian *schmitt trigger*.

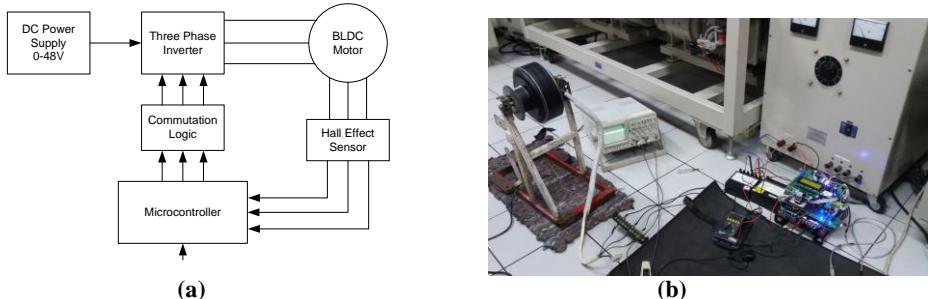
Tabel 4.5. Hasil pengujian rangkaian deteksi tegangan *back EMF zero crossing* menggunakan motor BLDC secara *sensored*.



4.2. Pengujian Integrasi

4.2.1. Pengujian Integrasi Sistem Pengaturan Kecepatan Motor BLDC Menggunakan Metode *Sensored* dan *Sensorless* Dalam Kondisi Tanpa Beban

Pada pengujian integrasi sistem yang pertama yaitu dilakukan pengujian integrasi sistem pada motor BLDC tanpa beban menggunakan metode *sensored* (menggunakan sensor *hall effect*) untuk penentu komutasinya. Motor yang digunakan memiliki spesifikasi tegangan 48 V dan daya 1000 W. Pada pengujian motor BLDC secara *sensored* kali ini menggunakan metode PAM (Pulse Amplitude Modulation) yaitu mengatur tegangan masukan inverter dan frekuensi pencacahan sebesar 10 kHz dengan duty cycle 100%. Kemudian diamati nilai kecepatan, sinyal tegangan, sinyal hasil pengolahan rangkaian deteksi tegangan *back EMF zero crossing*, dan daya input pada motor. Blok diagram pengujian motor secara *sensored* dan rangkaian pengujian tampak pada Gambar 4.12.(a)(b).



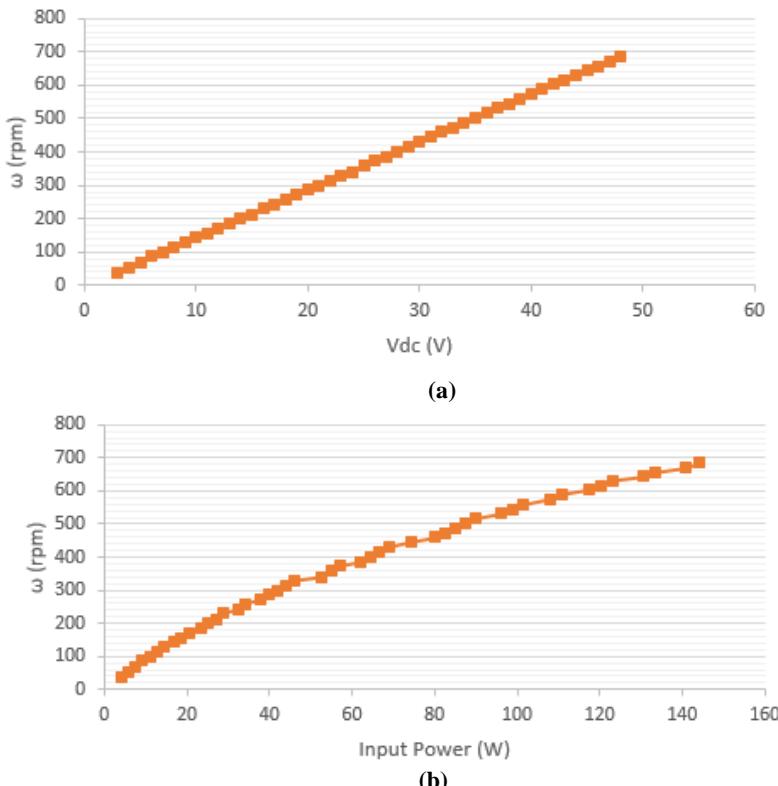
Gambar 4.12.(a) Blok diagram pengujian secara *sensored*. **(b)** Rangkaian pengujian motor BLDC secara *sensored* dan *sensorless* tanpa beban.

Pengujian motor BLDC dilakukan dengan mengambil data perubahan tegangan terhadap kecepatan dan perubahan daya terhadap kecepatan. Dengan step tegangan input inverter sebesar 1V, didapatkan hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6. Data pengujian sistem metode *sensored* kondisi tanpa beban

| Vdc (V) | Idc (A) | P (W) | ω (rpm) | Vdc (V) | Idc (A) | P (W) | ω (rpm) |
|---------|---------|-------|----------------|---------|---------|-------|----------------|
| 3 | 1.4 | 4.2 | 39 | 25 | 2.2 | 55 | 357 |
| 4 | 1.45 | 5.8 | 54 | 26 | 2.2 | 57.2 | 373 |
| 5 | 1.5 | 7.5 | 67 | 27 | 2.3 | 62.1 | 386 |
| 6 | 1.5 | 9 | 86 | 28 | 2.3 | 64.4 | 401 |
| 7 | 1.6 | 11.2 | 99 | 29 | 2.3 | 66.7 | 417 |
| 8 | 1.6 | 12.8 | 114 | 30 | 2.3 | 69 | 430 |
| 9 | 1.6 | 14.4 | 127 | 31 | 2.4 | 74.4 | 446 |
| 10 | 1.7 | 17 | 143 | 32 | 2.5 | 80 | 459 |
| 11 | 1.7 | 18.7 | 156 | 33 | 2.5 | 82.5 | 472 |
| 12 | 1.7 | 20.4 | 172 | 34 | 2.5 | 85 | 487 |
| 13 | 1.8 | 23.4 | 185 | 35 | 2.5 | 87.5 | 503 |
| 14 | 1.8 | 25.2 | 200 | 36 | 2.5 | 90 | 516 |
| 15 | 1.8 | 27 | 213 | 37 | 2.6 | 96.2 | 532 |
| 16 | 1.8 | 28.8 | 229 | 38 | 2.6 | 98.8 | 542 |
| 17 | 1.9 | 32.3 | 242 | 39 | 2.6 | 101.4 | 558 |
| 18 | 1.9 | 34.2 | 258 | 40 | 2.7 | 108 | 576 |
| 19 | 2 | 38 | 273 | 41 | 2.7 | 110.7 | 589 |
| 20 | 2 | 40 | 286 | 42 | 2.8 | 117.6 | 605 |
| 21 | 2 | 42 | 300 | 43 | 2.8 | 120.4 | 615 |
| 22 | 2 | 44 | 315 | 44 | 2.8 | 123.2 | 631 |
| 23 | 2 | 46 | 328 | 45 | 2.9 | 130.5 | 644 |
| 24 | 2.2 | 52.8 | 341 | 46 | 2.9 | 133.4 | 656 |
| | | | | 47 | 3 | 141 | 671 |
| | | | | 48 | 3 | 144 | 686 |

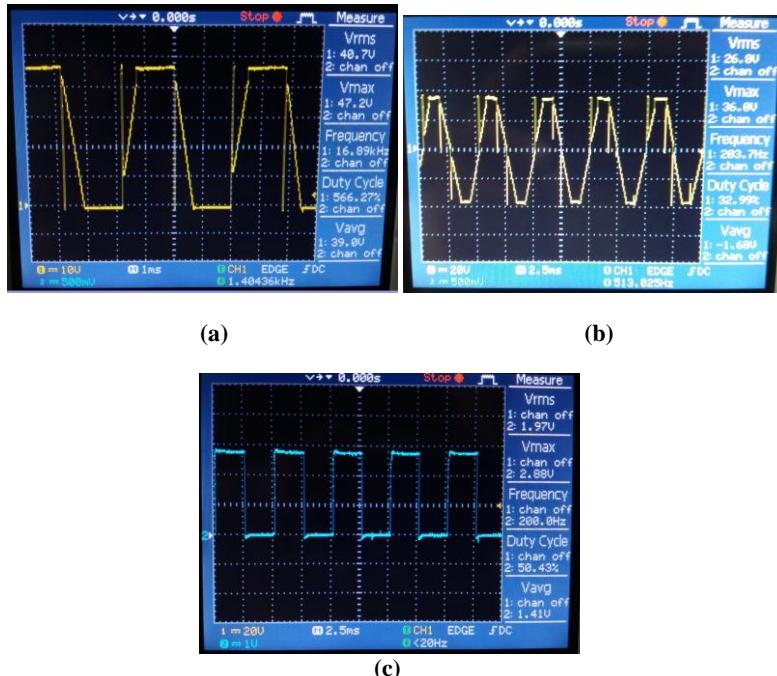
Dari Tabel 4.6. dapat dilihat bahwa dalam kondisi tanpa beban pada metode *sensored* dengan tegangan nominal akan dihasilkan kecepatan sebesar 686 rpm dengan daya input sebesar 144W atau 14.4% dari daya nominal motor. Dari table hasil percobaan bisa diperoleh grafik perubahan tegangan input terhadap kecepatan pada Gambar 4.13.(a), dan grafik daya input terhadap kecepatan pada Gambar 4.13.(b).



Gambar 4.13.(a) Grafik perubahan tegangan input terhadap kecepatan metode *sensored* kondisi tanpa beban. **(b)** Grafik daya input terhadap kecepatan metode *sensored* kondisi tanpa beban.

Selain memperhatikan respon kecepatan dan daya input inverter, dilakukan juga pengamatan bentuk gelombang fasa dan *line-to-line*. Pengamatan dilakukan pada saat tegangan input inverter 36V. Pada Gambar 4.14.(a) merupakan gambar gelombang pada fasa C. Gambar diambil pada saat tegangan input inverter 36V dan menghasilkan kecepatan 516 rpm, terlihat pada data Vmax di tampilan osiloskopnya, didapatkan nilai Vrms sebesar 22.5V dan frekuensi sebesar 196.1Hz. Pada Gambar 4.14.(b) merupakan gambar gelombang *line-to-line* fasa C-A. dengan Vrms sebesar 26.8V dan frekuensinya 203.7 Hz. Perubahan nilai

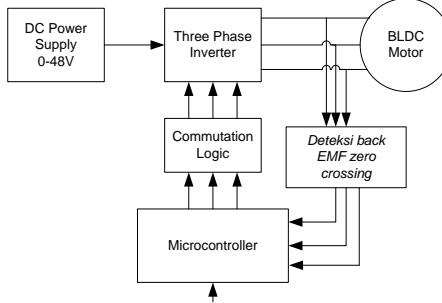
tegangan input inverter akan mempengaruhi nilai kecepatan motor. Perubahan kecepatan merupakan respon dari berubahnya nilai frekuensi dari tegangan fasa, maupun *line-to-line*.



Gambar 4.14.(a) Gelombang tegangan fasa C motor BLDC saat dioperasikan menggunakan metode *sensored*. **(b)** Gelombang tegangan *line-to-line* fasa C-A saat dioperasikan menggunakan metode *sensored*. **(c)** Gelombang sensor *hall effect* urutan C.

Selain mengamati tegangan fasa dan *line-to-line*, juga dilakukan pengamatan gelombang sensor *hall effect* pada saat kondisi tegangan input inverter yang sama, yaitu 36V. Pada Gambar 4.14.(c) merupakan gelombang sensor *hall effect* urutan C, pada tegangan input 36V atau saat kecepatan motor 516 rpm, frekuensi sensor *hall effect* yaitu sebesar 200 Hz. Dengan mengamati gelombang sensor *hall effect*, nilai frekuensi sensor berpengaruh terhadap nilai kecepatan pada motor.

Pada pengujian selanjutnya yaitu dilakukan pengujian sistem dengan metode *sensorless* (menggunakan deteksi tegangan *back EMF zero crossing*). Blok diagram pengujian dapat dilihat pada Gambar 4.15.



Gambar 4.15. Blok diagram pengujian secara *sensorless* pada motor BLDC.

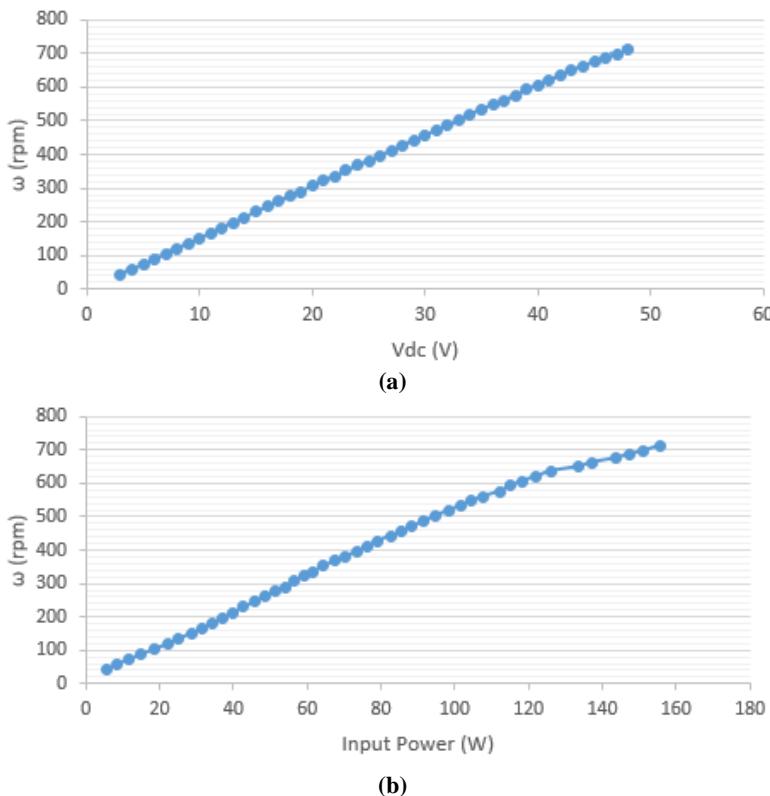
Seperti pada pengujian metode *sensored*, dengan mengatur tegangan input inverter, yang membedakan disini yaitu tanpa menggunakan sensor *hall effect* sebagai penentu komutasi inverter melainkan digantikan menggunakan rangkaian *back EMF zero crossing*. Pengujian motor BLDC dengan metode *sensorless* dilakukan dengan mengambil beberapa data perubahan tegangan terhadap kecepatan dan perubahan daya terhadap kecepatan. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7. Data pengujian sistem metode *sensorless* kondisi tanpa beban

| Vdc (V) | Idc (A) | P (W) | ω (rpm) |
|---------|---------|-------|---------|
| 3 | 1.9 | 5.7 | 44 |
| 4 | 2.1 | 8.4 | 60 |
| 5 | 2.35 | 11.75 | 73 |
| 6 | 2.5 | 15 | 88 |
| 7 | 2.65 | 18.55 | 104 |
| 8 | 2.8 | 22.4 | 120 |
| 9 | 2.8 | 25.2 | 135 |
| 10 | 2.85 | 28.5 | 151 |
| 11 | 2.85 | 31.35 | 166 |
| 12 | 2.85 | 34.2 | 182 |
| 13 | 2.85 | 37.05 | 198 |
| 14 | 2.85 | 39.9 | 213 |
| 15 | 2.85 | 42.75 | 229 |
| 16 | 2.85 | 45.6 | 245 |
| 17 | 2.85 | 48.45 | 260 |
| 18 | 2.85 | 51.3 | 276 |
| 19 | 2.85 | 54.15 | 289 |
| 20 | 2.82 | 56.4 | 307 |
| 21 | 2.82 | 59.22 | 323 |
| 22 | 2.8 | 61.6 | 336 |
| 23 | 2.8 | 64.4 | 352 |
| 24 | 2.81 | 67.44 | 367 |

| Vdc (V) | Idc (A) | P (W) | ω (rpm) |
|---------|---------|--------|---------|
| 25 | 2.81 | 70.25 | 380 |
| 26 | 2.82 | 73.32 | 396 |
| 27 | 2.82 | 76.14 | 412 |
| 28 | 2.82 | 78.96 | 427 |
| 29 | 2.85 | 82.65 | 443 |
| 30 | 2.85 | 85.5 | 456 |
| 31 | 2.85 | 88.35 | 472 |
| 32 | 2.86 | 91.52 | 485 |
| 33 | 2.87 | 94.71 | 503 |
| 34 | 2.9 | 98.6 | 519 |
| 35 | 2.9 | 101.5 | 534 |
| 36 | 2.9 | 104.4 | 547 |
| 37 | 2.91 | 107.67 | 560 |
| 38 | 2.95 | 112.1 | 576 |
| 39 | 2.95 | 115.05 | 592 |
| 40 | 2.96 | 118.4 | 607 |
| 41 | 2.98 | 122.18 | 620 |
| 42 | 3 | 126 | 636 |
| 43 | 3.1 | 133.3 | 649 |
| 44 | 3.12 | 137.28 | 662 |
| 45 | 3.19 | 143.55 | 675 |
| 46 | 3.2 | 147.2 | 686 |
| 47 | 3.21 | 150.87 | 696 |
| 48 | 3.24 | 155.52 | 712 |

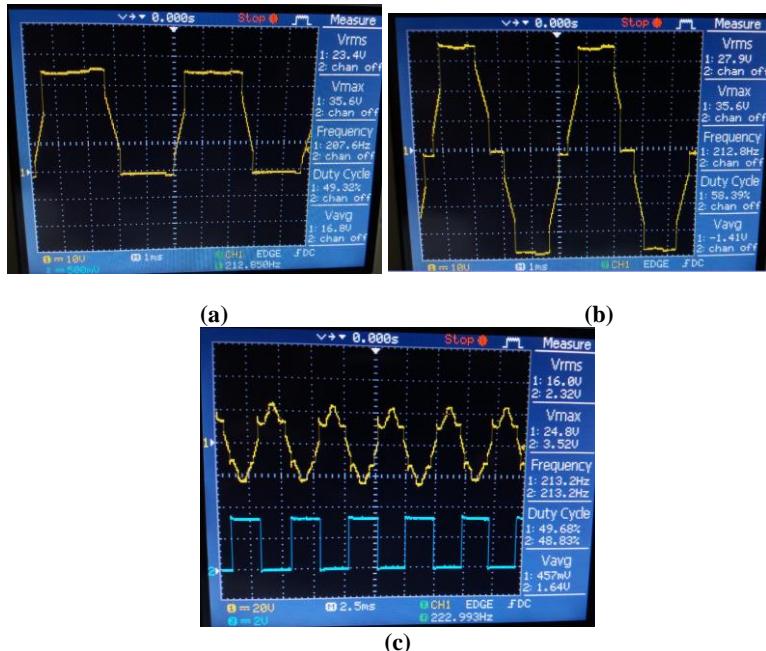
Dari Tabel 4.7. dapat dilihat bahwa dalam kondisi tanpa beban pada metode *sensorless* dengan tegangan nominal akan dihasilkan kecepatan sebesar 712 rpm dengan daya input sebesar 155.52W atau 15.5% dari daya nominal motor. Dapat dilihat grafik perubahan tegangan input terhadap kecepatan pada Gambar 4.16.(a), dan grafik daya input terhadap kecepatan pada Gambar 2.16.(b)



Gambar 4.16.(a) Grafik perubahan tegangan input terhadap kecepatan metode *sensorless* kondisi tanpa beban. **(b)** Grafik daya input terhadap kecepatan metode *sensorless* kondisi tanpa beban.

Juga dilakukan pengamatan gambar gelombang fasa dan *line-to-line* untuk pengujian menggunakan metode *sensorless* dan tanpa beban

kali ini. Sama seperti pengamatan sebelumnya, dilakukan pada saat tegangan input inverter 36V. Pada Gambar 4.17.(a) merupakan gambar gelombang pada fasa C. Gambar diambil pada saat tegangan input inverter 36V dan menghasilkan kecepatan 547 rpm, didapatkan nilai Vrms sebesar 23.4V dan frekuensi sebesar 207.6 Hz. Pada Gambar 4.17.(b) merupakan gambar gelombang *line-to-line* fasa C-A. dengan Vrms sebesar 27.9V dan frekuensinya 212.8 Hz.



Gambar 4.17.(a) Gelombang tegangan fasa C motor BLDC saat dioperasikan menggunakan metode *sensorless*. **(b)** Gelombang tegangan *line-to-line* fasa C-A saat dioperasikan menggunakan metode *sensorless*. **(c)** Gelombang fasa terhadap *virtual neutral* (kuning) dan gelombang luaran deteksi tegangan *back EMF zero crossing* urutan C (biru).

Pada metode *sensorless* kali ini juga mengamati sinyal pada rangkaian deteksi tegangan *back EMF zero crossing*. Rangkaian deteksi tegangan *back EMF zero crossing* mendapat masukan sinyal tegangan fasa. Kemudian tegangan fasa ini akan dikomparasi terhadap *virtual*

neutral untuk mendapatkan luaran sinyal zero crossing yang nantinya digunakan untuk komutasi inverter yang terlebih dahulu dilewatkan rangkaian *schmitt trigger*. Gambar gelombang masukan fasa C terhadap *virtual neutral* tampak pada Gambar 4.17.(c) warna kuning. Gelombang inilah yang digunakan untuk mengambil sinyal *zero crossing detection*-nya. Pada Gambar 4.17.(c) warna biru merupakan luaran sinyal deteksi tegangan *back EMF zero crossing* urutan C. Sinyal ini mempunyai bentuk yang sama dengan sinyal sensor *hall effect* sehingga bisa digunakan untuk komutasi inverter tiga fasa. Pada luaran sinyal deteksi tegangan *back EMF zero crossing* urutan C tersebut, memiliki frekuensi sebesar 213.2Hz.

4.2.2. Pengujian Integrasi Sistem Pengaturan Kecepatan Motor BLDC Menggunakan Metode *Sensored* dan *Sensorless* Kondisi Berbeban

Pada pengujian integrasi sistem kondisi berbeban, beban yang digunakan yaitu beban ban mobil *Amtenar Car* dengan disertai pengereman mobil secara mekanik. Pengujian berbeban bertujuan untuk mengetahui respon kecepatan terhadap tegangan input inverter dan respon kecepatan terhadap daya input inverter. Pengujian kali ini menggunakan motor yang sama dan teknik yang sama dengan kondisi tanpa beban. rangkaian pengujian tampak pada Gambar 4.18.



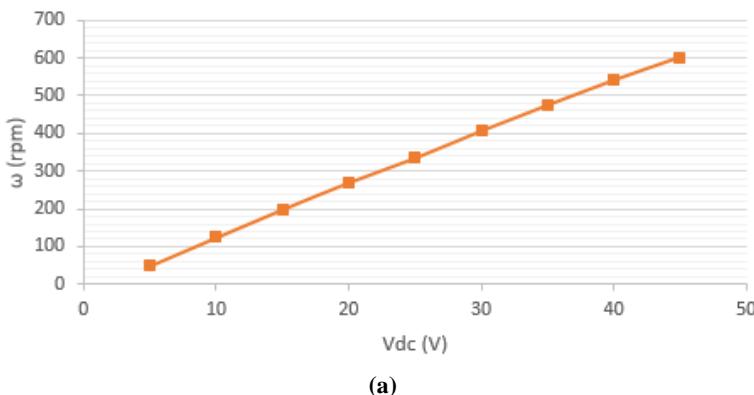
Gambar 4.18. Rangkaian pengujian motor BLDC metode *sensored* dan *sensorless* dengan beban ban mobil dan pengereman mekanik.

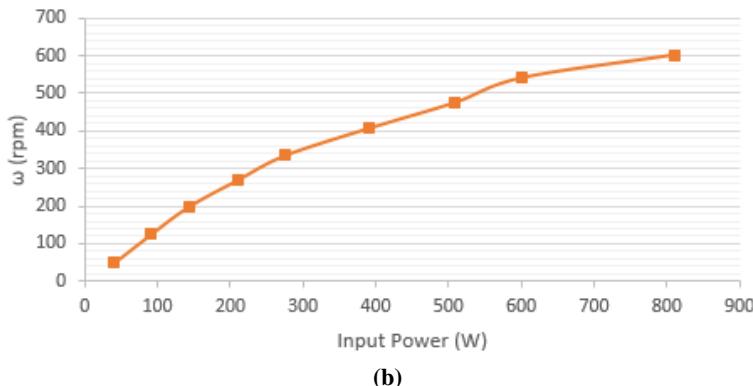
Pengujian motor BLDC dilakukan dengan mengambil data perubahan tegangan terhadap kecepatan dan perubahan daya terhadap kecepatan. Dengan step tegangan input inverter sebesar 5V, didapatkan hasil pengujian saat menggunakan metode *sensored* yang dapat dilihat pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8. Data pengujian sistem metode *sensored* dalam kondisi berbeban.

| Vdc (V) | Idc (A) | P (W) | ω (rpm) |
|---------|---------|-------|----------------|
| 5 | 8 | 40 | 50 |
| 10 | 9 | 90 | 125 |
| 15 | 9.5 | 142.5 | 199 |
| 20 | 10.5 | 210 | 270 |
| 25 | 11 | 275 | 335 |
| 30 | 13 | 390 | 407 |
| 35 | 14.5 | 507.5 | 475 |
| 40 | 15 | 600 | 541 |
| 45 | 18 | 810 | 602 |

Dari Tabel 4.8. dapat dilihat bahwa dalam kondisi berbeban pada metode *sensored* dengan tegangan 45V akan dihasilkan kecepatan sebesar 602 rpm dengan daya input sebesar 810W atau 81% dari daya nominal motor. Dari tabel hasil percobaan bisa diperoleh grafik perubahan tegangan input terhadap kecepatan pada Gambar 4.19.(a), dan grafik daya input terhadap kecepatan pada Gambar 4.19.(b).





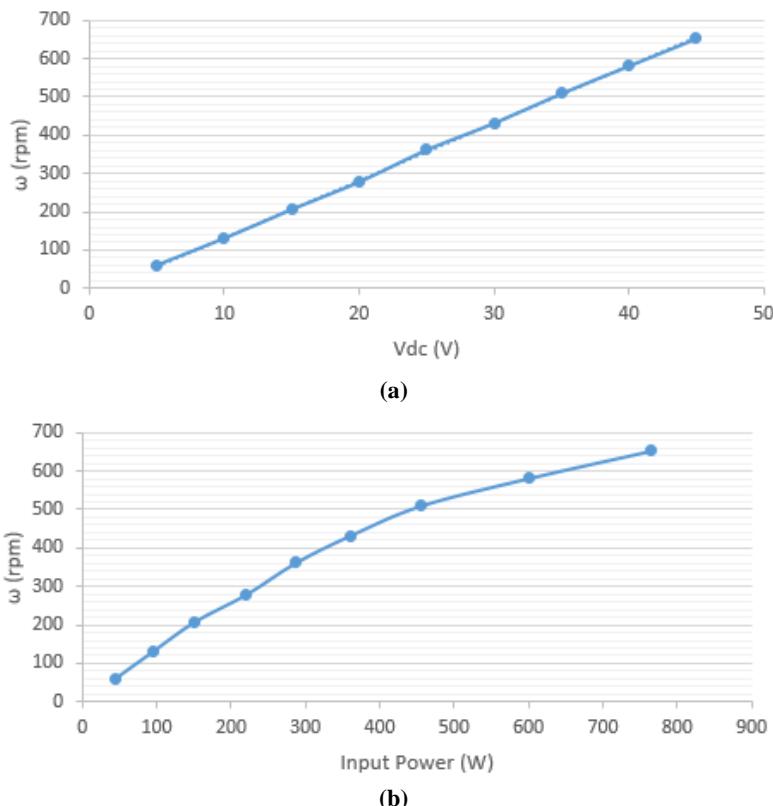
Gambar 4.19.(a) Grafik perubahan tegangan input terhadap kecepatan metode *sensored* kondisi berbeban. **(b)** Grafik daya input terhadap kecepatan metode *sensored* kondisi berbeban.

Selanjutnya dilakukan pengujian metode *sensorless* dalam kondisi berbeban dengan mekanisme yang sama seperti sebelumnya. Diperoleh data yang terlihat pada Tabel 4.9. Seperti pada pengujian metode *sensored*, dengan mengatur tegangan input inverter, yang membedakan disini yaitu tanpa menggunakan sensor *hall effect* sebagai penentu komutasi inverter melainkan digantikan menggunakan rangkaian *back EMF zero crossing*. Pengujian motor BLDC dengan metode *sensorless* dilakukan dengan mengambil beberapa data perubahan tegangan terhadap kecepatan dan perubahan daya terhadap kecepatan. Dengan step tegangan input inverter sebesar 5V, didapatkan hasil pengujian saat menggunakan metode *sensored* yang dapat dilihat pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9. Data pengujian sistem metode *sensorless* dalam kondisi berbeban.

| Vdc (V) | Idc (A) | P (W) | ω (rpm) |
|---------|---------|-------|----------------|
| 5 | 9 | 45 | 60 |
| 10 | 9.5 | 95 | 130 |
| 15 | 10 | 150 | 206 |
| 20 | 11 | 220 | 278 |
| 25 | 11.5 | 287.5 | 362 |
| 30 | 12 | 360 | 432 |
| 35 | 13 | 455 | 510 |
| 40 | 15 | 600 | 582 |
| 45 | 17 | 765 | 654 |

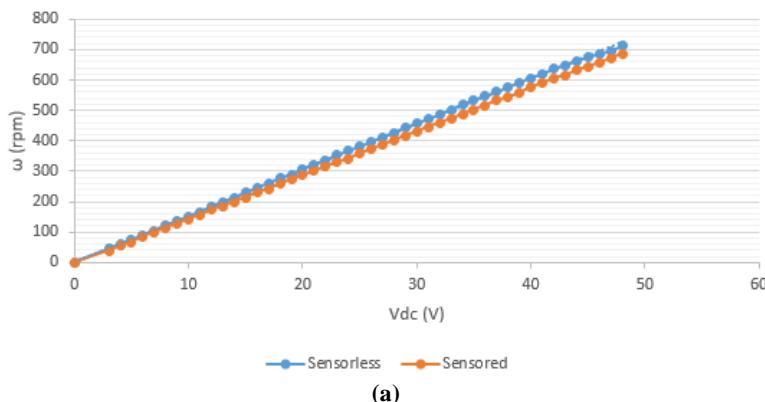
Dari Tabel 4.9. dapat dilihat bahwa dalam kondisi berbeban pada metode *sensorless* dengan tegangan 45V akan dihasilkan kecepatan sebesar 654 rpm dengan daya input sebesar 765W atau 76.5% dari daya nominal motor. Pengujian berbeban metode *sensored* dan *sensorless* dilakukan dengan mekanisme dan kondisi mekanik yang sama. Dari tabel hasil percobaan bisa diperoleh grafik perubahan tegangan input terhadap kecepatan pada Gambar 4.20.(a), dan grafik daya input terhadap kecepatan pada Gambar 4.20.(b).

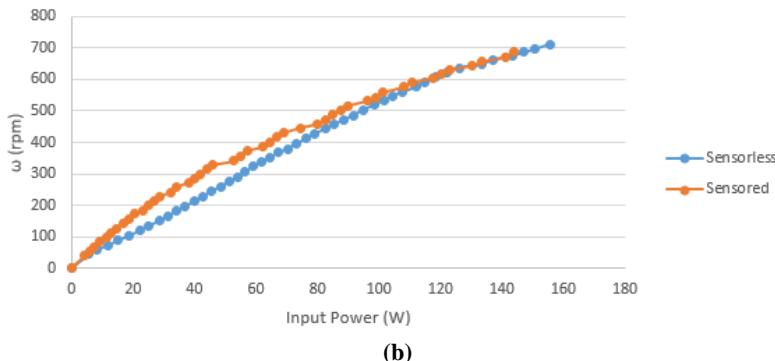


Gambar 4.20.(a) Grafik perubahan tegangan input terhadap kecepatan metode *sensorless* kondisi berbeban. (b) Grafik daya input terhadap kecepatan metode *sensorless* kondisi berbeban.

4.2.2. Analisa Perbandingan Penggunaan Metode Metode *Sensored* dan *Sensorless*

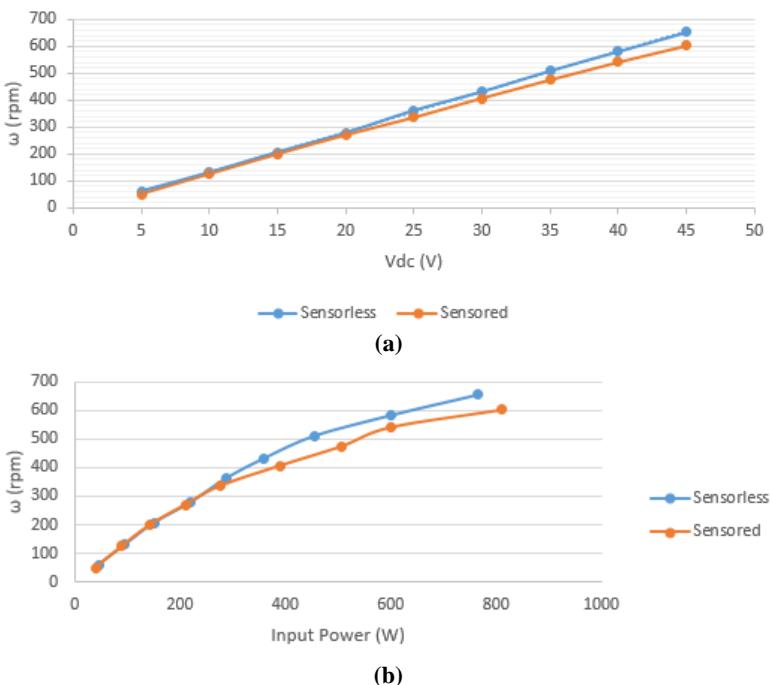
Dari pengujian tanpa beban menggunakan metode *sensored* dan *sensorless* menghasilkan respon kecepatan, arus, dan daya input inverter yang berbeda. Dari kedua percobaan bisa dibandingkan respon tegangan input inverter terhadap kecepatan seperti pada Gambar 4.21.(a) dan perbandingan daya input inverter terhadap kecepatan pada Gambar 4.21.(b). Pada kondisi tanpa beban dan dengan tegangan nominal, pengaturan kecepatan motor BLDC metode *sensorless* menghasilkan kecepatan motor yang lebih tinggi bila dibandingkan metode *sensored*, yaitu selisih nilai kecepatannya sebesar 26 rpm. Hal ini nampaknya berlaku pada semua level tegangan input inverter dan akan terlihat jelas selisihnya pada Gambar 4.21.(a). Dengan menghasilkan kecepatan yang lebih besar pada tegangan input nominal, metode *sensorless* juga mengkonsumsi daya input inverter lebih besar bila dibandingkan metode *sensored* yaitu 155.52W, sehingga terdapat selisih daya sebesar 11.52W dengan metode *sensored*.





Gambar 4.21.(a) Grafik perubahan tegangan input terhadap kecepatan metode *sensored* dan *sensorless* kondisi tanpa beban. **(b)** grafik daya input terhadap kecepatan metode *sensored* dan *sensorless* kondisi tanpa beban.

Dari pengujian berbeban dapat dibandingkan juga respon tegangan input inverter terhadap kecepatan seperti pada Gambar 4.22.(a) dan perbandingan daya input inverter terhadap kecepatan pada Gambar 4.22.(b). Pada kondisi berbeban, pada tegangan diatas 20V tampak kecepatan motor metode *sensorless* lebih besar dibandingkan metode *sensored*. Pada kecepatan diatas 300 rpm, daya input inverter metode *sensorless* lebih rendah dan menghasilkan kecepatan yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan metode *sensored*. Pada tegangan 45V, metode *sensorless* mengkonsumsi daya sebesar 765W dan menghasilkan kecepatan sebesar 654 rpm, sedangkan metode *sensored* mengkonsumsi daya sebesar 810W dan menghasilkan kecepatan sebesar 602 rpm. pada pengujian berbeban kali ini bertolak belakang dengan pengujian pada kondisi tanpa beban, pada pengujian kali ini bisa menghasilkan kecepatan yang lebih tinggi dengan daya yang lebih rendah.



Gambar 4.22.(a) Grafik perubahan tegangan input terhadap kecepatan metode *sensored* dan *sensorless* kondisi berbeban. (b) Grafik daya input terhadap kecepatan metode *sensored* dan *sensorless* kondisi berbeban.

Dari pengujian integrasi menggunakan metode *sensorless* maupun *sensored* diamati pula perbandingan nilai parameter pada gambar gelombang tegangan *line-to-line*, fasa, gelombang sensor *hall effect*, gelombang masukan dan luaran rangkaian deteksi tegangan *back EMF zero crossing*. Pada metode *sensored* dan *sensorless* menghasilkan pola gambar tegangan *line-to-line* dan fasa yang sama baik kondisi tanpa beban maupun berbeban, sehingga hanya dianalisis pada saat kondisi tanpa beban. Dari hasil pengamatan terhadap respon kecepatan motor, baik dalam kondisi berbeban maupun tanpa beban, metode *sensorless* menghasilkan kecepatan yang lebih tinggi, hal ini sangat dipengaruhi oleh frekuensi gelombang komutasi (baik sensor *hall effect* maupun deteksi tegangan *back EMF zero crossing*). Untuk membuktikannya, dilakukan

pengamatan pada tegangan nominal, 48V pada metode *sensored* terlebih dahulu. Pada Gambar 4.23.(a) merupakan sinyal sensor *Hall effect* saat dioperasikan menggunakan metode *sensored*. Terlihat pada osiloskop pada saat tegangan 48V, atau pada saat kecepatan 686 rpm, nilai frekuensi sinyal sensor *Hall effect* yaitu sebesar 267.7 Hz. Selanjutnya untuk mengetahui sinyal komutasi hasil dari deteksi tegangan *back EMF zero crossing* motor dioperasikan menggunakan metode *sensorless* dengan tegangan nominal yang menghasilkan kecepatan sebesar 712 rpm. Gambar gelombang komutasi hasil dari deteksi tegangan *back EMF zero crossing* terlihat pada Gambar 4.23.(b) warna biru. Terlihat pula nilai frekuensi sinyal komutasi untuk inverter yaitu sebesar 280.6 Hz. Dengan adanya perbedaan nilai, maka bisa dianalisis bahwa nilai frekuensi dari sinyal komutasi akan mempengaruhi respon tegangan fasa, *line-to-line* dan juga kecepatan motor BLDC.



Gambar 4.23.(a) Gelombang sensor *Hall effect* urutan C. **(b)** Gelombang tegangan fasa terhadap *virtual neutral* (kuning) dan gelombang luaran deteksi tegangan *back EMF zero crossing* (biru).

Halaman ini Sengaja Dikosongkan

BAB V PENUTUP

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Setelah melakukan tahap perancangan dan implementasi sistem kemudian dilanjutkan dengan tahap pengujian dan analisa maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- Pada pengaturan kecepatan motor BLDC menggunakan metode *sensorless* (deteksi tegangan *back EMF zero crossing*) dapat menjadi solusi atas kelemahan penggunaan sensor *hall effect*.
- Pada kondisi tanpa beban dan pada semua level tegangan input inverter, pengaturan kecepatan motor BLDC metode *sensorless* menghasilkan kecepatan motor yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan metode *sensored*, sedangkan pada tegangan nominal terdapat selisih kecepatan sebesar 26 rpm.
- Pada kondisi berbeban dan pada semua level tegangan input inverter, pengaturan kecepatan motor BLDC menggunakan metode *sensorless* menghasilkan kecepatan lebih tinggi bila dibandingkan dengan menggunakan metode *sensored*, sedangkan pada tegangan nominal terdapat selisih kecepatan sebesar 52 rpm.
- Pada kondisi berbeban, kecepatan diatas 300 rpm, dan dengan daya yang sama pengaturan kecepatan motor BLDC metode *sensorless* menghasilkan kecepatan yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan metode *sensored*.
- Pada pengaturan kecepatan motor BLDC dengan menggunakan metode *sensored* dan *sensorless*, respon kecepatan motor dipengaruhi oleh nilai frekuensi sinyal komutasi.
- Frekuensi sinyal komutasi yang dihasilkan oleh metode *sensorless* lebih tinggi bila dibandingkan dengan frekuensi sinyal komutasi yang dihasilkan oleh sinyal sensor *hall effect* pada semua level tegangan input inverter sedangkan pada tegangan nominal memiliki selisih nilai frekuensi komutasi sebesar 12.9 Hz.
- Penggunaan metode *sensorless* menghasilkan *noise* suara yang lebih rendah pada saat motor berputar bila dibandingkan dengan metode *sensored*.

5.2 Saran

Pada penggerjaan proyek akhir ini tidak lepas dari berbagai macam kelemahan di dalamnya. Untuk memperbaiki kekurangan-kekurangan serta sebagai masukan untuk perbaikan sistem menjadi lebih sempurna kedepannya, maka diberikan beberapa saran dan harapan sebagai berikut:

- Penggunaan metode *sensorless* pada motor BLDC menghasilkan respon yang baik saat menggunakan metode drive PAM (*Pulse Amplitude Modulation*), sehingga nantinya bisa dijadikan penelitian kedepan mengenai converter yang digunakan untuk mengatur tegangan input pada inverter tiga fasa.
- Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut pada pengaturan kecepatan motor BLDC agar metode *sensorless* mampu menggunakan metode *drive PWM* (*Pulse Width Modulation*).
- Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang pengaruh frekuensi komutasi terhadap respon kecepatan motor BLDC.
- Dalam pengembangan sistem pengaturan kecepatan motor BLDC bisa ditambahkan beberapa jenis *controller* baik menggunakan konvensional maupun *artificial intelligent* untuk menghasilkan respon yang handal.



DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR PUSTAKA

1. Araz Darba, Frederik De Belie, Jan A. Melkebeek. “*A Back EMF Threshold Self-Sensing Method to Detect the Commutation Instants in BLDC Drives*”. IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol.62. No.10. October 2015.
2. Chang Liang Xia, *Permanent Magnet Brushless DC Motor Drivers and Controls*. Wiley Publisher. 2012.
3. Chenjun Cui, Gang Liu, Kun Wang, Xinda Song. “*Sensorless Drive for High Speed BLDC Motor Based on the Virtual Neutral Voltage*”. IEEE Transactions on Power Electronics Vol.30. No.6. June 2015.
4. Dennis Nolan, Application Note AN4220, *Sensorless Six Step BLDC Commutation*, ST Microelectronics.
5. El-Sharkawi.Mohamed, *Fundamentals of Electric Drive*, University of Washington, 2000.
6. Fikra Titan Syifa, Eka Firmansyah, Priyatmadi. “*Pengendalian Motor DC Tanpa Sikat Sederhana dengan DSC 16-bit pada Aplikasi EDF*”, JNTETI, Vol. 4, No. 4, November 2015.
7. Gabriel Haines dan Nesimi Ertugrul. “*Wide Speed Range Sensorless Operation of Brushless Permanent Magnet Motor Using Flux Linkage Increment*”. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 3 No. 7, July 2016.
8. Gang Liu, Chenjun Cui, Kun Wang. “*Sensorless Control for High Speed Brushless DC Motor Based on the Line-to-Line Back EMF*”, IEEE Transactions on Power Electronic, Vol 31, No.7, July 2016.
9. Issa Batarseh, *Power Electronic Circuits*. John Wiley & Sons Inc. 2004.
10. James P. Johnson, M. Ehsani, dan Yilcan Guzelgunler. “*Review of sensorless methods for brushless DC*”. IEEE Industry Applications Conference. 1999.
11. Jian Zhao dan Yangwei Yu. *Brushless DC Motor Fundamentals Application Note*. MPS The Future of Analog IC Technology. July 2011.
12. Jose Carlos Gamazo Real, Ernesto Vazquez-Sanchez, dan Jaime Gomez-Gil. “*Position and Speed Control of Brushless DC Motor Using Sensorless technique and Application Trends*”, Sensor Journal, 2010
13. Markos Tawadros. *Sensorless Control of Brushless DC Motors*. School of Computing, Engineering, and Mathematics. University of Sydney. 2012.
14. Muhammad H. Rashid. *Power Electronics - Circuits, Devices, and Applications Third Edition*. Prentice Hall. 2004
15. Paul C. Krause, Oleg Wasynczuk, Scott D. Sudhoff. *Analysis of Electric Machinery and Drive System*. 2001.

16. R. Krishnan. *Electric Motor Drives - Modelling, Analysis, and Control*. Prentice Hall. 2001.
17. R. Krishnan. *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*. CRC Press. 2010.
18. Reston Condit, Application Note AN1083, “*Sensorless BLDC Control with Back EMF Filtering*”, Microchip Technology Inc.
19. S. A. KH. Mozzaffari Niapour, GH. Shokri Garjan, M. Shafiei, MR. Feyzi, S. Danyali, dan M. Bahrami Kouhshahi. “*Review of Permanent Magnet Brushless DC Motor Basic Drives Based on Analysis and Simulation Study*”, International Review of Electrical Engineering (IREEE) Vol. 9 No. 5 Oktober 2014.
20. Shao, Jianwen. “*Direct Back EMF Detection Method for Sensorless Brushless DC Motor Drives*”, Virginia Polytechnic Institute and the State University. 2003.
21. Shiyoung Lee, “*A Comparison Study of The Commutation Methods for Three Phase Permanent Magnet BLDC Motor*”, Pennsylvania State University.
22. Tae-Hyung Kim, Hyung-Woo Lee, dan Mehrdad Ehsani. “*State of the art and future trends in position sensorless brushless DC motor / generator drives*”. 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society. 2005
23. Takashi Kenjo, S. Nagamori. *Permanent Magnet and Brushless DC Motor*. Oxford. 1985
24. T.J.E. Miller, *Brushless Permanent Magnet and Reluctance Motor Drives*. Oxford Science Publication. 1989.
25. Tzuen-Lih Chern, Ping-Lung Pan, Yu-Lun Chern, dan Der-Min Tsay. “*Sensorless Speed Control of BLDC Motor Using Six Step Square Wave and Rotor Position Detection*”. IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications 2010.
26. United States Patent Application 2003/0098666A1. “*Circuit for Improved Back EMF Detection*”.
27. Yen-Shin Lai dan Yong-Kai Lin. “*Novel Back EMF Detection Technique of Brushless DC Motor Drives for Wide Range Control Without Using Current and Position Sensors*”. IEEE Transactions on Power Electronic, Vol 31, No.7, July 2011.



BIOGRAFI PENULIS

BIODATA PENULIS



| | | |
|------------------------|---|----------------------------|
| Nama | : | Muhammad Rizani Rusli |
| NRP | : | 1310131024 |
| Tempat / Tanggal Lahir | : | Sidoarjo, 22 Desember 1995 |
| Telepon / HP | : | 031-8531415 / 082231023251 |
| E-mail | : | ruslirizani@gmail.com |

Riwayat Pendidikan:

- | | |
|---|-----------------|
| ▪ MINU Ngingas Waru Sidoarjo | Tahun 2002-2008 |
| ▪ SMP Negeri 1 Waru Sidoarjo | Tahun 2008-2011 |
| ▪ MA Unggulan Amanatul Ummah Surabaya Program Akselerasi | Tahun 2011-2013 |
| ▪ Politeknik Elektronika Negeri Surabaya | Tahun 2013-2017 |

Penulis telah mengikuti seminar proyek akhir pada 18 Agustus 2017 dengan judul proyek akhir “Pengaturan Kecepatan Motor BLDC (*Brushless Direct Current*) Menggunakan Deteksi Tegangan *Back EMF Zero Crossing* dengan Metode *Six Step Commutation*” sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Sains Terapan (S.ST). Selama menempuh jenjang sarjana di PENS, penulis aktif di tim mobil listrik *Electric Vehicle Community* Teknik Elektro Industri PENS dan juga di tim mobil listrik *UKM Mobil Hemat Energi* PENS. Di bidang organisasi, penulis aktif di *Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro Industri* di departemen ekenomi kreatif selama satu periode kepengurusan. Selain di himpunan mahasiswa, penulis juga pernah menjabat sebagai ketua *Himpunan Alumni Amanatul Ummah Program Akselerasi* selama satu periode kepemimpinan. Penulis pernah berkesempatan menjadi delegasi program *student exchange* antara PENS dan *National Institute of Technology Anan College*, Tokushima Prefecture, Jepang pada tahun 2015. Semoga penelitian yang telah dilakukan penulis pada proyek akhir ini dapat bermanfaat dan berkontribusi besar terutama untuk perkembangan mobil listrik di Indonesia.