



**RANCANG BANGUN INVERTER 3 FASA DENGAN INSULATED
GATE BIPOLAR TRANSISTOR (IGBT) MENGGUNAKAN
METODE NATURAL PWM BERBASIS MIKROKONTROLER
AT90PWM3**

SKRIPSI

**PRASETYA WIDODO
0806366226**

**UNIVERSITAS INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA EKSTENSI
DEPOK
JULI 2010**



**RANCANG BANGUN INVERTER 3 FASA DENGAN INSULATED
GATE BIPOLAR TRANSISTOR (IGBT) MENGGUNAKAN
METODE NATURAL PWM BERBASIS MIKROKONTROLER
AT90PWM3**

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu persyaratan menjadi sarjana teknik
pada program Sarjana Teknik**

**PRASETYA WIDODO
0806366226**

**UNIVERSITAS INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
JULI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar

Nama : PRASETYA WIDODO

NPM : 0806366226

Tanda Tangan :

Tanggal : 7 Juli 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Prasetya Widodo
NPM : 0806366226
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Rancang Bangun Inverter 3 Fasa dengan Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) Menggunakan Metode Natural Pwm Berbasis Mikrokontroler AT90PWM3.

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Aries Subiantoro M.Sc
Penguji : Dr. Ir. Ridwan Gunawan MT
Penguji : Dr. Ir. Feri Yusivar M.Eng



Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 12 Juli 2010

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Dr. Ir. Feri Yusivar M.Eng, dan Ir. Aries Subiantoro M.Sc selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (2) Orang tua tercinta, istri, kakak-kakak dan keluarga besar yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral;
- (3) Staf Departemen Teknik Elektro UI
- (4) Teman-teman yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini Koh Liang sekeluarga, Andri, Dannie, Suryo, Friedolin, Setiadi, rekan-rekan di bidang TNK PTKMR BATAN dan yang lainnya tidak bisa saya sebutkan satu per satu.

Akhir kata, saya berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat dunia akherat

Depok, 7 Juli 2010

(Prasetya Widodo)
NPM. 0806366226

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Prasetya Widodo
NPM : 0806366226
Program Studi : Teknik Elektro
Departemen : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Seminar

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**RANCANG BANGUN *INVERTER* 3 FASE DALAM SISTEM
PEMBANGKIT TENAGA SURYA DENGAN KENDALI IGBT DENGAN
METODE *NATURAL PWM* BERBASIS MIKROKONTROLER
AT90PWM3**

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan skripsi saya tanpa meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 7 Juli 2010
Yang menyatakan

(Prasetya Widodo)

Prasetya Widodo
NPM : 0806366226
Departemen Teknik Elektro

Dosen Pembimbing
Ir. Aries Subiantoro M.Sc

RANCANG BANGUN INVERTER 3 FASA DENGAN INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR (IGBT) MENGGUNAKAN METODE NATURAL PWM BERBASIS MIKROKONTROLER AT90PWM3

ABSTRAK

Seiring dengan berkembangnya perangkat-perangkat portabel dan perangkat *solar cell*, sehingga dibutuhkan suatu perangkat inverter yang mempunyai efisiensi yang tinggi agar daya yang terbuang dapat diminimalisir. Salah satu cara untuk meningkatkan efisiensi inverter adalah dengan menggunakan saklar semikonduktor yang baik sehingga rugi-rugi akibat pesaklaran dapat diminimalisir. Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) merupakan perangkat switching mempunyai kecepatan switcing yang tinggi, serta impedansi masukan yang tinggi sehingga tidak membebani rangkaian pengendalinya, selain itu impedansi IGBT pada saat ON juga kecil. Sehingga IGBT cocok dioperasikan pada arus yang besar, hingga ratusan *ampere*, tanpa terjadi kerugian daya yang cukup berarti. Pengendalian saklar dalam inverter dapat dilakukan dengan metode Natural PWM (Sinusoidal PWM). Keuntungan metode ini yaitu sederhana serta fleksibel artinya amplitudo dan frekuensi-nya keluaran dapat diatur serta rendahnya distorsi harmonik pada tegangan keluaran. Mikrokontroler AT90PWM3 merupakan salah satu mikrokontroler yang dapat membangkitkan 3 buah SPWM sekaligus sehingga cocok untuk aplikasi pengendali saklar pada inverter 3 fasa. Salah satu jenis inverter yaitu inverter PWM (*Pulse Width Modulation*) 3 fasa. Keuntungan operasi inverter PWM yaitu rendahnya distorsi harmonik pada tegangan keluaran jika dibandingkan dengan jenis inverter lainnya. Metode *natural* PWM dapat digunakan untuk membangkitkan sinusoidal PWM yang dibutuhkan untuk operasi inverter PWM. Dengan menggunakan IGBT sebagai saklar semikonduktor dalam inverter PWM diharapkan akan memperbesar efisiensi inverter.

Kata kunci : IGBT, inverter, natural PWM, mikrokontroler AVR AT90PWM3.

Prasetya Widodo
NPM : 0806366226
Electrical Engineering Department

The lecturer of consultant
Ir. Aries Subiantoro M.Sc

3 PHASE INVERTER DESIGN WITH INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR (IGBT) USING NATURAL PWM METHOD USING BASED ON AT90PWM3 MICROCONTROLLER

ABSTRAC

Along with the development of portable devices and solar cell devices, and so we need an inverter device which has high efficiency so power wastage can be minimized. One way to improve the efficiency of the inverter is to use a good semiconductor switches so that switching losses can be minimized. Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) is a switching device which has high switching speed, and high input impedance so the controller circuit can control it easily. furthermore the IGBT's impedance when conduct (R_{ON}) is small. So that IGBT is suitable to operate at large currents, up to hundreds of amperes, without the power losses significantly. Control switch in the inverter can be performed using Natural PWM (Sinusoidal PWM). The advantage of this method is simple and flexible means of amplitude and frequency of its output can be set and low harmonic distortion at the output voltage. AT90PWM3 microcontroller is one of the microcontroller that can generate three pieces of SPWM at once. so that it suitable for switch controller application in three phase inverter. One type of inverter is a 3 phase PWM (Pulse Width Modulation) inverter. PWM inverter operating advantage are low harmonic distortion in output voltage when compared with other types of inverters. Natural PWM method can be used to generate sinusoidal PWM is needed for PWM inverter operation. By using the IGBT as the semiconductor switches in the PWM inverter is expected to increase the efficiency of the inverter.

Keywords : IGBT, inverter, natural PWM, AVR AT90PWM3 microcontroller.

DAFTAR ISI

JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI SEMINAR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	v
ABSTRAK	vi
ABSTRAC	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	x
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Seminar	2
1.3. Batasan Masalah	2
1.4. Sistematika Penulisan	2
BAB 2 DASAR TEORI	
2.1. Inverter	3
2.1.1. Pulse Width Modulation (PWM)	3
2.1.2. Inverter Tiga Fasa Pulse Width Modulation (PWM)	8
2.2. IGBT (<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>)	10
2.2.1. Rumus-Rumus IGBT	12
2.3. Natural PWM	12
2.4. <i>Power Stage Controller</i> (PSC)	13
BAB 3 PERANCANGAN SISTEM INVERTER	
3.1. Blok Diagram Rancangan Inverter	16
3.2. Rancangan Inverter	16
3.2.1. Hardware	16
3.2.1.1. IGBT(<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>)	16

3.2.1.2. Catu Daya	17
3.2.1.3. Mikrokontroler AT90PWM3	18
3.2.1.4. <i>Driver</i>	20
3.3.2. Software	21
3.3.2.1. Flowchart Program	22
BAB 4 PENGUJIAN	
4.1. Pengujian Keluaran Sinusoidal PWM dari PSC0, PSC1 dan PSC2	25
4.2. Pengujian Sinyal Keluran <i>Driver</i> U, V, W, X, Y dan Z	27
4.3. Pengujian Parameter Amplitudo dan Frekuensi	29
BAB 5 KESIMPULAN	
5.1. Kesimpulan	32
Daftar Acuan	33
Daftar Pustaka	34
Lampiran	35

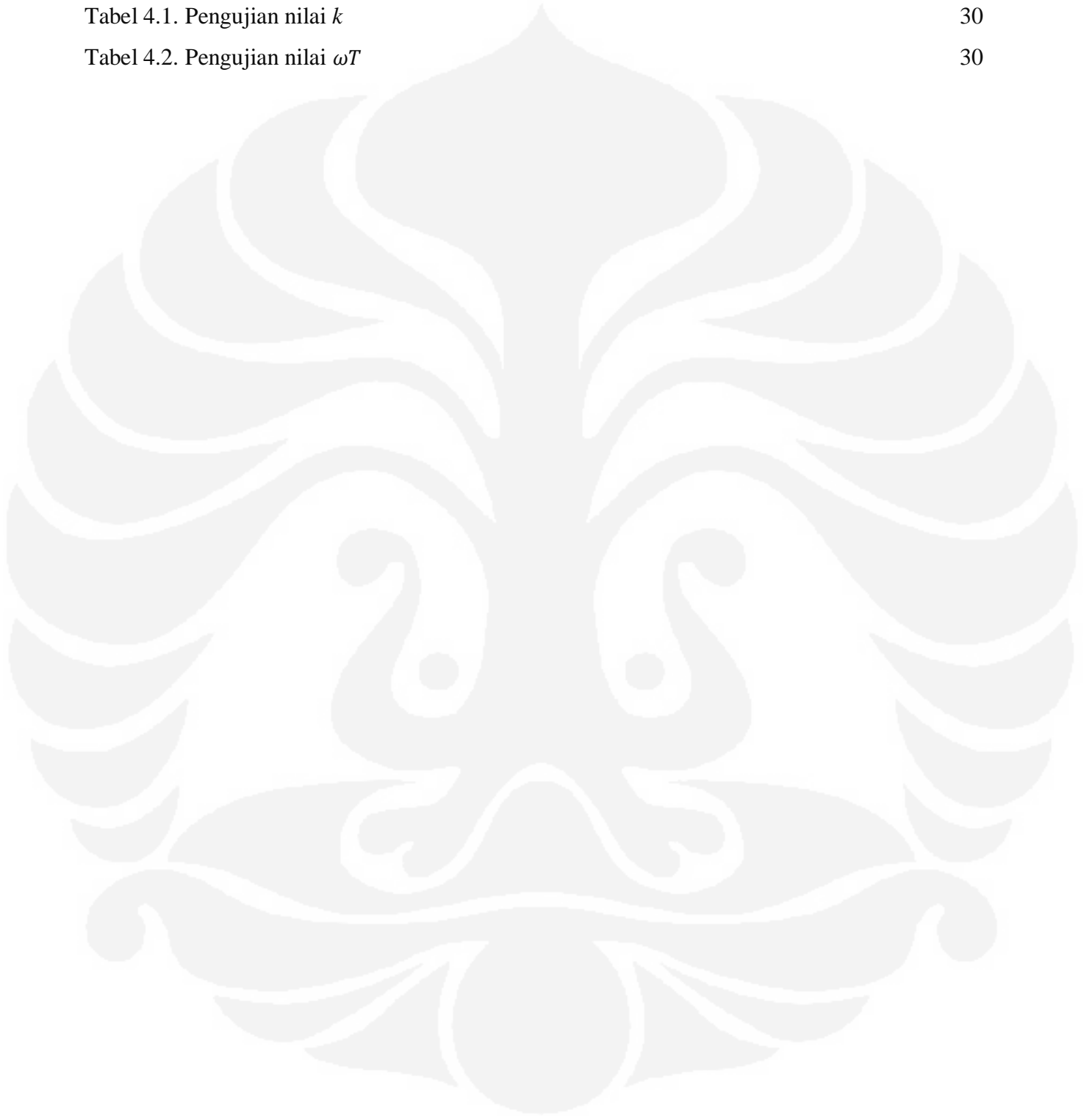
DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. <i>Full bridge inverter</i> .	4
Gambar 2.2. Bipolar PWM. (a) referensi sinusoidal dan <i>carrier</i> segitiga. (b) Keluaran $+V_{dc}$ ketika $v_{sine} > v_{tri}$ dan $-V_{dc}$ ketika $v_{sine} < v_{tri}$	4
Gambar 2.3. (a) <i>Full bridge converter</i> untuk <i>unipolar</i> PWM. (b) Sinyal referensi dan sinyal <i>carrier</i> . (c) Tegangan jembatan v_a dan v_b . (d) Tegangan keluaran	5
Gambar 2.4. Unipolar PWM dengan saklar frekuensi tinggi dan saklar frekuensi rendah. (a) Sinyal referensi dan sinyal <i>control</i> . (b) v_a (gambar 2.9a). (c) v_b . (d) Keluaran $v_a - v_b$.	6
Gambar 2.5. Rangkaian saklar inverter 3 fasa	8
Gambar 2.6. (a) Gelombang <i>carrier</i> dan gelombang referensi untuk operasi PWM. (b) bentuk <i>output</i> -arus untuk beban R-L. [1].	9
Gambar 2.7. Struktur dasar IGBT dan MOSFET	10
Gambar 2.8. Rangkaian ekivalen IGBT	11
Gambar 2.9. Sinyal referensi sinusoidal dan <i>carrier</i> segitiga serta sinyal PWM yang dihasilkan	13
Gambar 2.10. contoh dengan 3 PSC yang bekerja secara independen	14
Gambar 2.11. contoh 3 PSC yang disinkronisasi	14
Gambar 3.1. Diagram blok rancangan inverter	16
Gambar 3.2. Modul IGBT 7MBP75JB060-01	17
Gambar 3.3. Skematik catu daya untuk <i>driver</i> IGBT	17
Gambar 3.4. Skematik catu daya untuk <i>minimum system</i> mikrokontroler AT90PWM3	18
Gambar 3.5. Rangkaian catu daya untuk <i>driver</i> IGBT dan mikrokontroler AT90PWM3	18
Gambar 3.6. Skematik <i>minimum system</i> mikrokontroler AT90PWM3.	19
Gambar 3.7. Rangkaian <i>minimum system</i> mikrokontroler AT90PWM3	19
Gambar 3.8. Rangkaian <i>driver</i> IGBT	20
Gambar 3.9. Skematik <i>driver</i> IGBT	21
Gambar 3.10. Diagram alir data <i>Natural PWM</i>	22
Gambar 3.11. Flowchart Program	23

Gambar 3.12. Aplikasi tabel sinus	24
Gambar 4.1. Pengujian rangkaian inverter 3 fasa di laboratorium.	25
Gambar 4.2. Keluaran sinusoidal PWM kaki pin PSCOUT00 dan PSCOUT01.	25
Gambar 4.3. Keluaran sinusoidal PWM kaki pin PSCOUT10 dan PSCOUT11.	26
Gambar 4.4. Keluaran sinusoidal PWM kaki pin PSCOUT20 dan PSCOUT21.	26
Gambar 4.5. Keluaran sinusoidal PWM dari PSC0 vs Keluaran sinusoidal PWM dari PSC1.	27
Gambar 4.6. Keluaran sinusoidal PWM dari PSC1 vs Keluaran sinusoidal PWM dari PSC2.	27
Gambar 4.7. Keluaran sinusoidal PWM pada <i>driver</i> U dan X.	28
Gambar 4.8. Keluaran sinusoidal PWM pada <i>driver</i> V dan Y.	28
Gambar 4.9. Keluaran sinusoidal PWM pada <i>driver</i> W dan Z.	29

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1. Pengujian nilai k	30
Tabel 4.2. Pengujian nilai ωT	30



DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran1 <i>Datasheet</i> modul IGBT 7MBP75NA060-01	36
Lampiran1 <i>Datasheet</i> microcontroller AVR AT90PWM3	39

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Seiring dengan berkembangnya perangkat-perangkat portabel dan perangkat *solar cell*, maka dibutuhkan suatu perangkat inverter yang mempunyai efisiensi yang tinggi agar daya yang terbuang dapat diminimalisir. Suatu inverter yang ideal adalah inverter yang efisiensinya besar artinya dapat mengubah tegangan AC (*alternating current*) menjadi beban DC (*direct current*) dengan rugi-rugi yang sekecil mungkin sehingga dapat diabaikan. Namun kondisi ideal itu sangat sulit tercapai karena selalu ada rugi-rugi entah menjadi berupa panas, rugi-rugi pensaklaran dan yang lainnya. Salah satu komponen inverter yang mempengaruhi efisiensi inverter yaitu saklar semikonduktor yang digunakan. Saklar semikonduktor yang baik yaitu saklar yang ketika dalam kondisi OFF memiliki hambatan yang sangat besar sehingga tidak ada arus yang mengalir atau arus bocornya sangat kecil sehingga bisa diabaikan. Sebaliknya ketika kondisi ON, saklar memiliki hambatan hantar yang kecil sehingga nilai tegangan jatuh (*voltage drop*) dan disipasi daya-nya kecil. Selain itu saklar yang baik juga harus memiliki kecepatan pensaklaran yang tinggi.

IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) merupakan salah satu saklar semikonduktor yang bisa digunakan dalam inverter. Kelebihan IGBT antara lain impedansi pada terminal masukannya tinggi sehingga tidak membebani rangkaian pengendalinya. Kecepatan pensaklaran yang tinggi, serta terminal keluaran IGBT menyerupai hubungan *collector-emitter* pada transistor bipolar sehingga nilai tahanan ketika menghantar sangat kecil artinya nilai tegangan jatuh dan disipasi daya-nya kecil.

Salah satu jenis inverter yaitu inverter PWM (*Pulse Width Modulation*) 3 fasa. Keuntungan operasi inverter PWM yaitu rendahnya distorsi harmonik pada tegangan keluaran jika dibandingkan dengan jenis inverter lainnya. Metode *natural* PWM dapat digunakan untuk membangkitkan sinusoidal PWM yang dibutuhkan untuk operasi inverter PWM. Kelebihan metode *natural* PWM yaitu

sederhana serta fleksibel artinya amplitudo dan frekuensi-nya dapat diatur. Dengan menggunakan IGBT sebagai saklar semikonduktor dalam inverter PWM diharapkan akan memperbesar efisiensi inverter.

1.2 TUJUAN

Penulisan skripsi ini bertujuan untuk merancang sebuah perangkat inverter PWM 3 fasa dengan menggunakan perangkat *switching* IGBT dengan kendali *natural PWM* berbasis mikrokontroler AVR AT90PWM3.

1.3 BATASAN MASALAH

Batasan masalah pada skripsi ini yaitu perancangan perangkat inverter PWM 3 fasa dengan menggunakan perangkat *switching* IGBT dengan metode kendali *natural PWM* berbasis mikrokontroler AVR AT90PWM3 tanpa ditambahkan harmonik dalam frekuensi dasarnya .

1.4 SISTEMATIKA PENULISAN

Sistematika penulisan skripsi ini adalah sebagai berikut : Bab satu berisi latar belakang penulisan skripsi, tujuan penulisan skripsi, pembatasan pembahasan masalah serta sistematika dalam penulisan skripsi. Bab dua membahas mengenai teori singkat mengenai inverter, IGBT, metode *natural PWM* serta fitur PSC (*Power Stage Controller*). Bab tiga mengulas mengenai perancangan inverter. Dalam bab ini dijelaskan mengenai bagian-bagian dari inverter yang dirancang dalam skripsi ini baik hardware maupun software. Selain itu dijelaskan pula alasan penggunaan komponen-komponen yang ada seperti IGBT, mikrokontroler dan lainnya. . Bab empat membahas mengenai pengujian sistem yang telah di realisasikan yang meliputi pengujian keluaran PSC, pengujian driver dan pengujian parameter sistem. Terakhir pada bab lima disajikan kesimpulan dari penulisan skripsi ini.

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 Inverter

Inverter adalah rangkaian yang mengubah dc menjadi ac. Atau lebih tepatnya inverter memindahkan tegangan dari sumber dc ke beban ac. Inverter digunakan pada aplikasi seperti *adjustable-speed ac motor drives*, *uninterruptible power supplies* (UPS), dan aplikasi AC (*Alternating Current*) yang dijalankan dari baterai.

2.1.1. *Pulse Width Modulation* (PWM)

Pulse width modulation (PWM) merupakan cara untuk menurunkan THD (*Total Harmonic Distortion*) arus beban. *Output* inverter PWM dengan beberapa penyearangan secara umum bisa mencukupi kebutuhan THD dengan lebih mudah daripada menggunakan pola *switching* gelombang kotak.

Pada PWM, amplitudo tegangan *output* dapat dikendalikan dengan memodulasi bentuk gelombang. Keuntungannya yaitu mengurangi filter untuk menurunkan *harmonic* dan kendali amplitudo tegangan *output*. Kerugiannya rangkaian kendali untuk pensaklaran yang lebih kompleks dan meningkatnya *loss* karena pensaklaran yang berulang-ulang.

Kendali saklar-saklar untuk *output* sinusoidal PWM membutuhkan:

1. Sinyal referensi atau sinyal modulasi, dalam hal ini sinyal sinusoidal
2. Sinyal *carrier*, yaitu gelombang segitiga (*triangular*) yang mengendalikan frekuensi *switching*.

a. *Bipolar Switching*

Prinsip *Sinusoidal Bipolar PWM* di tampilkan pada Gambar 2.2. Ketika nilai referensi sinus lebih besar dari *carrier* segitiga, maka *outputnya* adalah $+V_{dc}$ dan ketika referensi sinus kurang dari *carrier* segitiga maka *outputnya* adalah $-V_{dc}$:

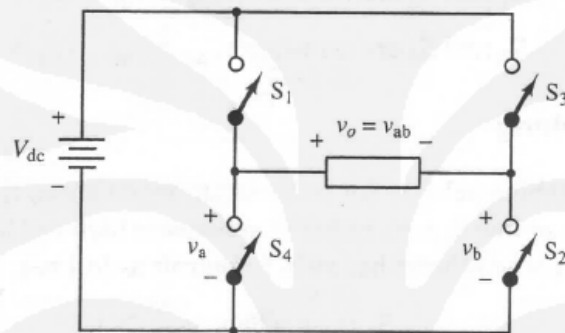
$$\begin{aligned} v_o &= +V_{dc} && \text{untuk } v_{\text{sine}} > v_{\text{triangular}} \\ v_o &= -V_{dc} && \text{untuk } v_{\text{sine}} < v_{\text{triangular}} \end{aligned}$$

Tipe PWM seperti ini disebut *bipolar* karena *outputnya* bergantian antara plus *supply* tegangan dc dan minus *supply* tegangan dc.

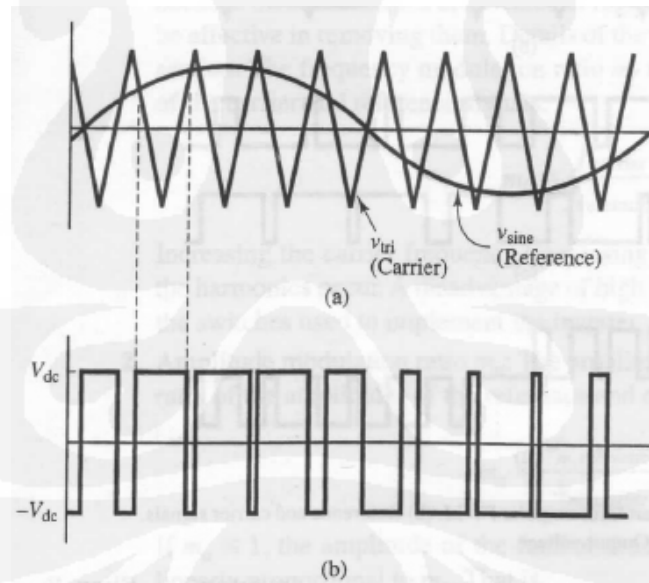
Pola *switching* yang menerapkan *bipolar switching* menggunakan *full bridge inverter*. ditentukan dengan membandingkan sinyal referensi dan sinyal *carrier*

S_1 dan S_2 on ketika $v_{\text{sine}} > v_{\text{triangular}}$ ($v_o = +V_{\text{dc}}$)

S_3 dan S_4 on ketika $v_{\text{sine}} < v_{\text{triangular}}$ ($v_o = -V_{\text{dc}}$)



Gambar 2.1 : *full bridge inverter*.



Gambar 2.2 : Bipolar PWM. (a) referensi sinusoidal dan *carrier* segitiga.

(b) *Output* $+V_{\text{dc}}$ ketika $v_{\text{sine}} > v_{\text{tri}}$ dan $-V_{\text{dc}}$ ketika $v_{\text{sine}} < v_{\text{tri}}$ ^[1]

b. Unipolar Switching

Untuk PWM pada pola *unipolar switching*, *output* digeser dari high ke nol atau dari low ke nol. sekali siklus pola *unipolar switching* melakukan kendali saklar sebagai berikut :

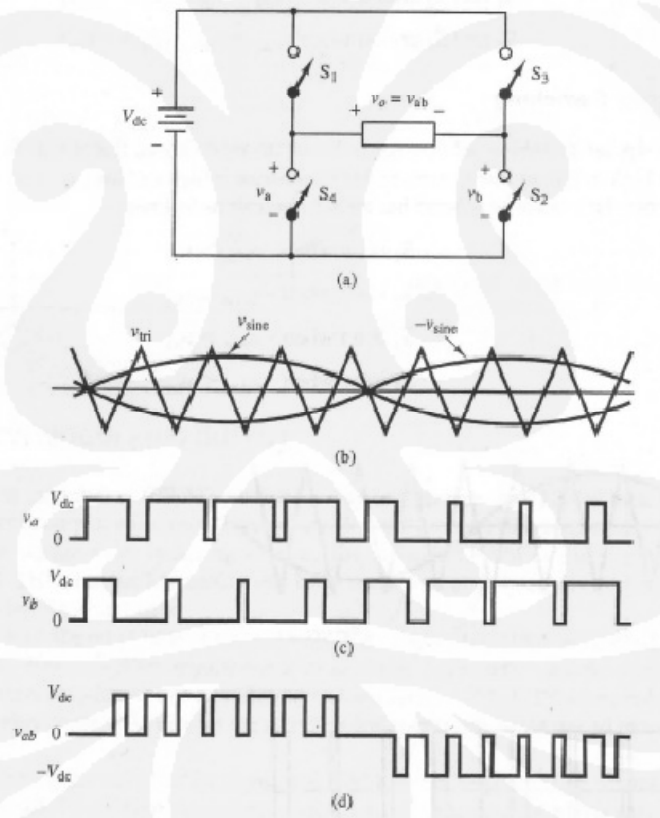
S_1 on ketika $v_{\text{sine}} > v_{\text{triangular}}$

S_2 on ketika $-v_{\text{sine}} < v_{\text{triangular}}$

S_3 on ketika $-v_{\text{sine}} > v_{\text{triangular}}$

S_4 on ketika $v_{\text{sine}} < v_{\text{triangular}}$

Perlu dicatat bahwa pasangan saklar (S_1, S_4) dan (S_2, S_3) adalah komplementer, ketika salah satu saklar dalam pasangan terbuka maka yang lainnya tertutup. Tegangan v_a dan v_b pada Gambar 2.3 bergantian antara $+V_{dc}$ dan nol. Tegangan *output* $v_o = v_{ab} = v_a - v_b$



Gambar 2.3 : (a) Full bridge converter untuk unipolar PWM. (b) Sinyal referensi dan sinyal carrier. (c) Tegangan jembatan v_a dan v_b . (d) Tegangan *output* ^[1]

Pada pola *unipolar switching* yang lain, satu pasang saklar beroperasi pada frekuensi *carrier* sementara pasangan lainnya beroperasi pada frekuensi referensi, sehingga disini terdapat dua saklar frekuensi tinggi dan dua saklar frekuensi rendah. Pola *switching*-nya yaitu:

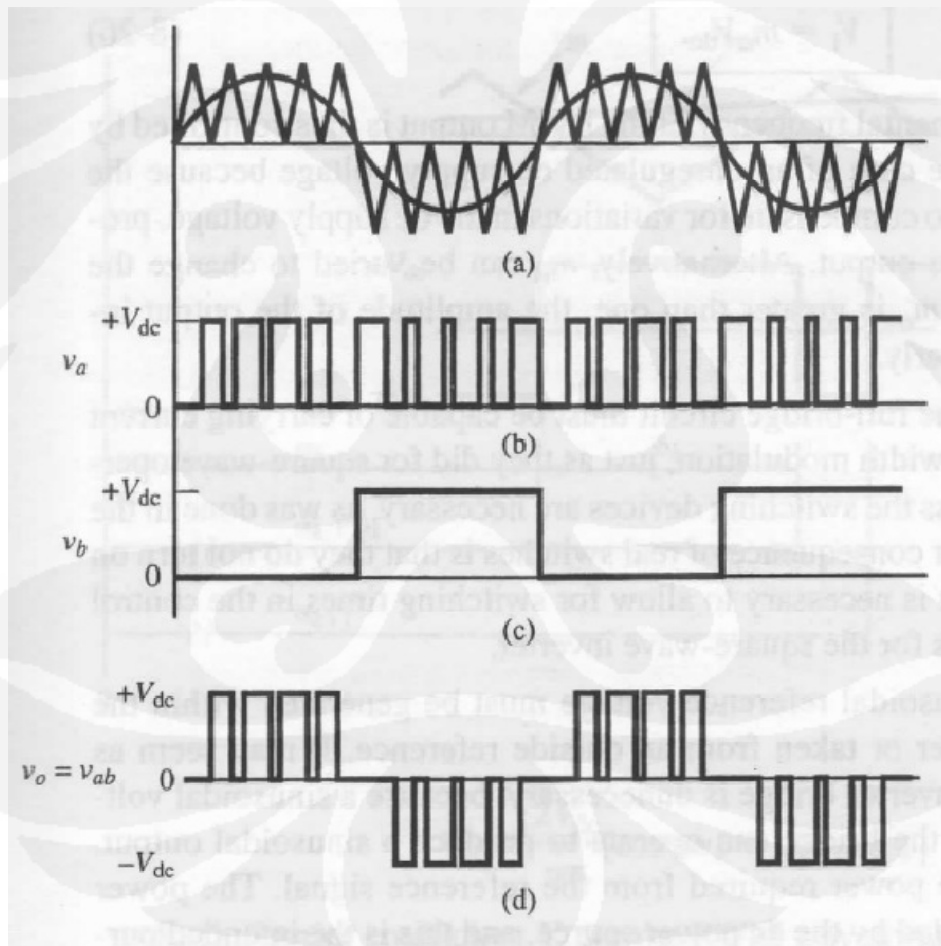
S_1 on ketika $v_{\text{sine}} > v_{\text{triangular}}$

S_4 on ketika $v_{\text{sine}} < v_{\text{triangular}}$

S_2 on ketika $v_{\text{sine}} > 0$

S_3 on ketika $v_{\text{sine}} < 0$

Dimana gelombang sinus dan segitiga seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.4. kemungkinan lain, S_2 dan S_3 menjadi saklar frekuensi tinggi, dan S_1 dan S_4 menjadi saklar frekuensi rendah.



Gambar 2.4 : Unipolar PWM dengan saklar frekuensi tinggi dan saklar frekuensi rendah. (a) Sinyal referensi dan sinyal control. (b) v_a (gambar 2.1). (c) v_b . (d) Output $v_a - v_b$.^[1]

Hal yang perlu diperhatikan dalam PWM antara lain:

1. Perbandingan modulasi frekuensi m_f : Deret fourier PWM tegangan *output* mempunyai frekuensi dasar yang sama seperti sinyal referensi. Terdapat frekuensi harmonik pada dan sekitar kelipatan frekuensi switching. Ukuran beberapa harmonik cukup besar, kadang lebih besar dari frekuensi dasarnya. Walaupun akibat harmonik ini terletak pada frekuensi tinggi, low pass filter sederhana dapat digunakan secara efektif untuk menghilangkan harmonik tersebut. Perbandingan modulasi frekuensi m_f di tentukan sebagai perbandingan frekuensi *carrier* dan sinyal referensi :

$$m_f = \frac{f_{carrier}}{f_{reference}} = \frac{f_{triangular}}{f_{sine}} \quad (2-1)$$

Meningkatkan frekuensi *carrier* (meningkatkan m_f) akan meningkatkan frekuensi dimana harmonik itu terjadi. Kerugian dari *switching* frekuensi tinggi adalah *loss* yang lebih tinggi pada saklar-saklar yang digunakan untuk implementasi inverter

2. Perbandingan modulasi amplitudo m_a : didefinisikan sebagai perbandingan amplitudo sinyal referensi dan sinyal *carrier* :

$$m_a = \frac{V_{m,reference}}{V_{m,carrier}} = \frac{V_{m,sine}}{V_{m,triangular}} \quad (2-2)$$

Jika $m_a \leq 1$, amplitudo frekuensi dasar dari tegangan *output* V_1 secara proporsional linier terhadap m_a , yaitu :

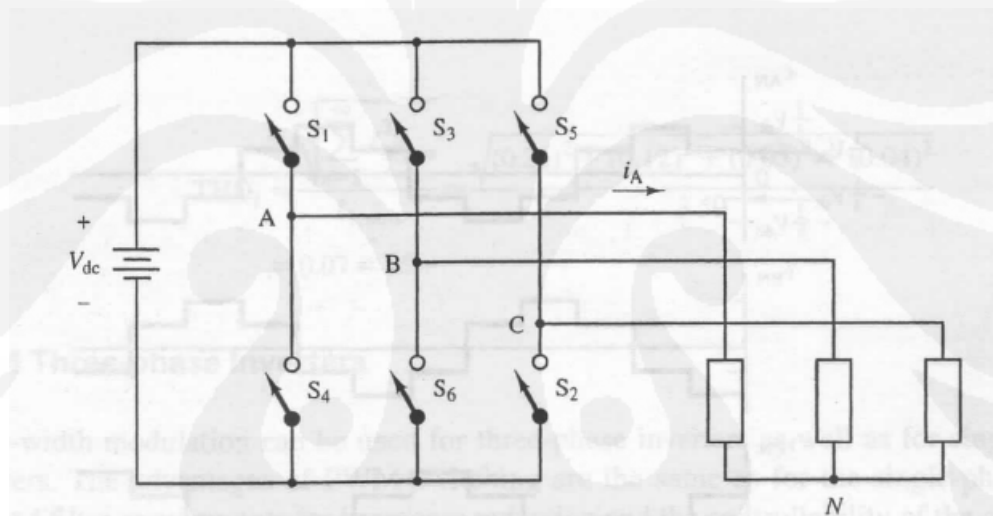
$$V_1 = m_a V_{dc} \quad (2-3)$$

Amplitudo frekuensi dasar dari *output* PWM dikendalikan oleh m_a . Hal ini penting pada kasus tegangan supply dc yang tidak diregulasi karena nilai m_a dapat diatur untuk mengimbangi variasi pada tegangan supply dc, sehingga menghasilkan *output* amplitudo yang konstan. Selain itu, m_a bisa divariasi untuk merubah amplitudo *output*. Jika m_a lebih besar dari 1, amplitudo *output* meningkat sesuai dengan m_a , tetapi tidak linier.

3. Saklar : Saklar pada rangkaian jembatan penuh (*full bridge*) harus bisa membawa arus pada salah satu arah PWM. Saklar tidak bisa ON atau OFF dengan seketika. Karena itu perlu disediakan waktu switching pada kendali saklar.
4. Tegangan Referensi : Tegangan referensi sinusoidal harus dibangkitkan dalam rangkaian kontrol inverter atau diambil dari referensi luar.^[1]

2.1.2. Inverter Tiga Fasa Pulse Width Modulation (PWM)

PWM bisa digunakan untuk inverter tiga fasa. Kelebihan PWM *switching* adalah mengurangi kebutuhan filter untuk mengurangi harmonik dan pengendalian amplitudo frekuensi dasar.



Gambar 2.5. Rangkaian saklar inverter 3 fasa

Pada dasarnya setiap saklar dikendalikan dengan membandingkan gelombang referensi sinusoidal dengan gelombang *carrier* segitiga. Frekuensi dasar *output* sama dengan gelombang referensi sedangkan amplitudo *output* ditentukan oleh amplitudo relatif gelombang referensi dan gelombang *carrier*.

Pada kasus *six step three phase inverter* saklar pada Gambar 2.5 dikendalikan secara berpasangan (S_1, S_4), (S_2, S_5), dan (S_3, S_6). Ketika satu saklar tertutup maka saklar pasangannya akan terbuka. Setiap pasangan saklar membutuhkan gelombang referensi sinusoidal secara terpisah. Ketiga referensi sinusoid terpisah 120° untuk menghasilkan *output* 3 fasa yang seimbang. gelombang *carrier*

segitiga dan ketiga gelombang referensi diperlihatkan pada gambar Gambar 2.6. Kendali saklarnya adalah sebagai berikut :

S_1 on ketika $v_A > v_{triangular}$

S_2 on ketika $v_C > v_{triangular}$

S_3 on ketika $v_B > v_{triangular}$

S_4 on ketika $v_A < v_{triangular}$

S_5 on ketika $v_C < v_{triangular}$

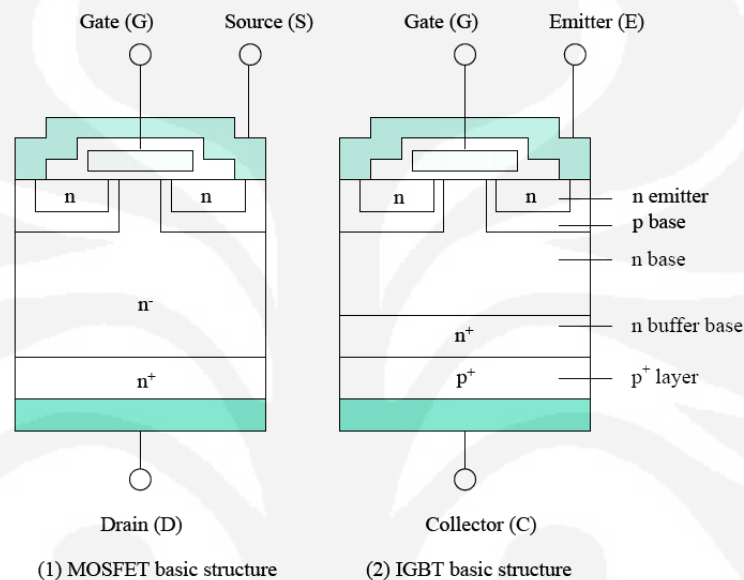
S_6 on ketika $v_B < v_{triangular}$



Gambar 2.6 : (a) gelombang *carrier* dan gelombang referensi untuk operasi PWM. (b) bentuk *output-arus* untuk beban R-L. ^[1]

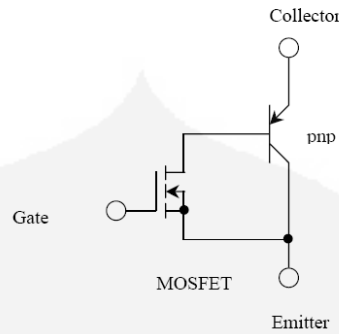
2.2. IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*)

IGBT adalah sebuah perangkat *switching* yang dirancang agar memiliki kinerja *switching* kecepatan tinggi dan kendali *gate voltage* seperti MOSFET daya serta kapasitas penanganan tegangan tinggi atau arus yang besar seperti transistor bipolar. Struktur dasar IGBT ditunjukkan pada Gambar 2.7



Gambar 2.7. Struktur dasar IGBT dan MOSFET

Struktur IGBT sebenarnya mirip dengan konstruksi MOSFET, hanya pada IGBT terdapat penambahan layer p^+ pada bagian drain struktur MOSFET. Seperti MOSFET daya tegangan positif antara gate dan emitter akan menghasilkan aliran arus melewati IGBT sehingga IGBT ON. Ketika IGBT ON pembawa positif (*positive carriers*) disuntikkan dari layer p^+ ke layer dasar tipe n, dengan demikian akan mempercepat modulasi daya konduksi. Hal ini memungkinkan IGBT untuk memiliki resistansi ON yang jauh lebih rendah dari pada MOSFET. Resistansi layer dasar tipe n pada IGBT menjadi sangat kecil karena pengaruh diode pn yang terbentuk oleh hubungan tambahan layer p^+ dan layer dasar tipe n ketika di lihat dari sisi drain. Seperti pada rangkaian ekivalen IGBT pada Gambar 2.8. IGBT adalah sebuah *monolithic cascade pnp bipolar transistor* dan MOSFET yang terhubung secara darlington.



Gambar 2.8. Rangkaian ekivalen IGBT

Input dari IGBT adalah terminal *Gate* dari MOSFET, sedang terminal *Source* dari MOSFET terhubung ke terminal *Basis* dari BJT. Dengan demikian, arus drain keluar dan dari MOSFET akan menjadi arus basis dari BJT. Karena besarnya tahanan masuk dari MOSFET, maka terminal input IGBT hanya akan menarik arus yang kecil dari sumber. Di pihak lain, arus drain sebagai arus *output* dari MOSFET akan cukup besar untuk membuat BJT mencapai keadaan saturasi. Dengan gabungan sifat kedua elemen tersebut, IGBT mempunyai perilaku yang cukup ideal sebagai sebuah saklar elektronik. Di satu pihak IGBT tidak terlalu membebani sumber, di pihak lain mampu menghasilkan arus yang besar bagi beban listrik yang dikendalikannya. Selain itu, kecepatan *switching* IGBT juga lebih tinggi dibandingkan transistor bipolar, meskipun lebih rendah dari MOSFET yang setara. Di lain pihak, terminal *output* IGBT mempunyai sifat yang menyerupai terminal *output* (kolektor-emitter) transistor bipolar. Dengan kata lain, pada saat keadaan menghantar, nilai tahanan menghantar (R_{on}) dari IGBT sangat kecil, menyerupai R_{on} pada transistor bipolar. Dengan demikian bila tegangan jatuh serta lesapan dayanya pada saat keadaan menghantar juga kecil. Dengan sifat-sifat seperti ini, IGBT akan sesuai untuk dioperasikan pada arus yang besar, hingga ratusan ampere, tanpa terjadi kerugian daya yang cukup berarti.

2.2.1. Rumus-Rumus IGBT

Disipasi daya total (P_D) yaitu daya maksimum yang bisa dibuang oleh IGBT

$$P_D = \frac{T_{J(max)} - T_C}{R_{\theta JC}} = V_{CE(on)} \cdot I_C \quad (2-4)$$

Dengan $R_{\theta JC}$ = *junction to case thermal resistance*; $T_{J(max)}$ = temperatur *junction*; T_C = temperatur *case*; V_{CE} = beda potensial *collector-emitter*; I_C = arus *collector*

Dari persamaan di atas dapat dikatakan bahwa temperatur maksimum yang bisa dibuang ($\frac{T_{J(max)} - T_C}{R_{\theta JC}}$), sama dengan panas maksimal yang disebabkan oleh *conduction loss* ($V_{CE(on)} \cdot I_C$). Jika *switching loss* diabaikan maka besar I_C adalah

$$I_C = \frac{T_{J(max)} - T_C}{R_{\theta JC} \cdot V_{CE(on)}} \quad (2-5)$$

hubungan $V_{CE(on)}$ dengan I_C adalah

$$V_{CE(on)} = I_C \cdot R_{CE(on)} + V_{CE(zero)} \quad (2-6)$$

persamaan 2-6 disubstitusikan ke persamaan 2-5 menjadi

$$\begin{aligned} I_C &= \frac{T_{J(max)} - T_C}{R_{\theta JC} \cdot V_{CE(on)}} = \frac{T_{J(max)} - T_C}{R_{\theta JC} (I_C \cdot R_{CE(on)} + V_{CE(zero)})} \\ &= I_C^2 \cdot R_{CE(on)} + I_C \cdot V_{CE(zero)} = \frac{T_{J(max)} - T_C}{R_{\theta JC}} \quad (2-7) \end{aligned}$$

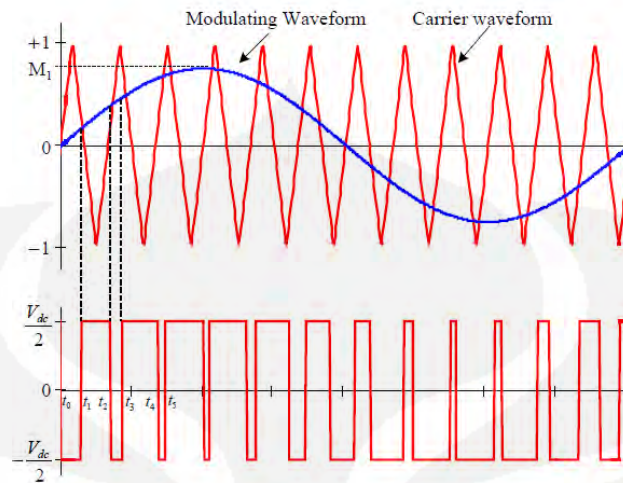
menggunakan persamaan kuadrat $x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$ dengan $a = R_{CE(on)}$; $b = V_{CE(zero)}$ dan $c = -\frac{T_{J(max)} - T_C}{R_{\theta JC}}$ diperoleh persamaan

$$I_C = \frac{-(V_{CE(zero)}) \pm \sqrt{(V_{CE(zero)})^2 - 4(R_{CE(on)}) \left(-\frac{T_{J(max)} - T_C}{R_{\theta JC}} \right)}}{2(R_{CE(on)})} \quad (2-8)$$

I_C pada persamaan 2-11 menunjukkan arus dc kontinyu (ketika IGBT *fully ON*) yang menyebabkan *die* memanaskan sampai temperatur *junction* maksimum

2.3. Natural PWM

Natural PWM atau *Sinusoidal PWM (SPWM)* adalah cara mendapatkan sinyal PWM dengan cara *sampling* alamiah yaitu membandingkan amplitudo gelombang segitiga sebagai sinyal *carrier* dan gelombang sinus sebagai sinyal *reference*.



Gambar 2.9. Sinyal referensi sinusoidal dan *carrier* segitiga serta sinyal PWM yang dihasilkan

Prinsip kerja SPWM adalah mengatur lebar pulsa mengikuti pola gelombang sinusoidal. Sinyal sinus dengan frekuensi f_m dan amplitudo maksimum A_m sebagai referensi digunakan untuk memodulasi sinyal *carrier* yaitu sinyal segitiga dengan frekuensi f_c dan amplitudo maksimum A_c . Sebagai gelombang *carrier*, frekuensi sinyal segitiga harus lebih tinggi dari pada gelombang pemodulasi (sinyal sinus). Perbandingan antara amplitudo gelombang sinusoidal (A_m) dengan gelombang segitiga (A_c) disebut indeks modulasi amplitudo (m_a)

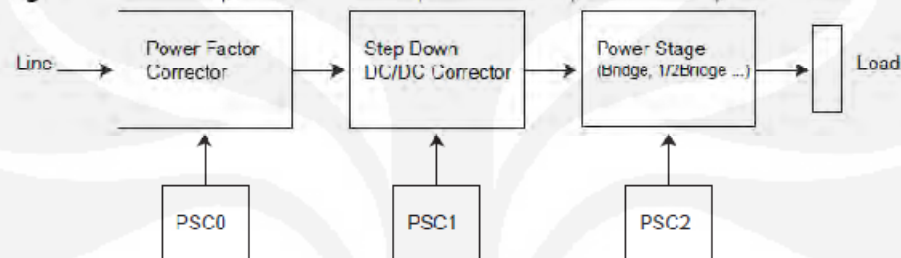
2.4. Power Stage Controller (PSC)

Power Stage Controller (PSC) merupakan peripheral yang disediakan pada beberapa mikrokontroler buatan atmel yang berfungsi untuk mengendalikan *power stage* dari suatu perangkat atau *board*. Setiap PSC kompatibel dengan level logika dan dapat digunakan untuk mengendalikan rangkaian power transistor jembatan setengah (*half bridge*).

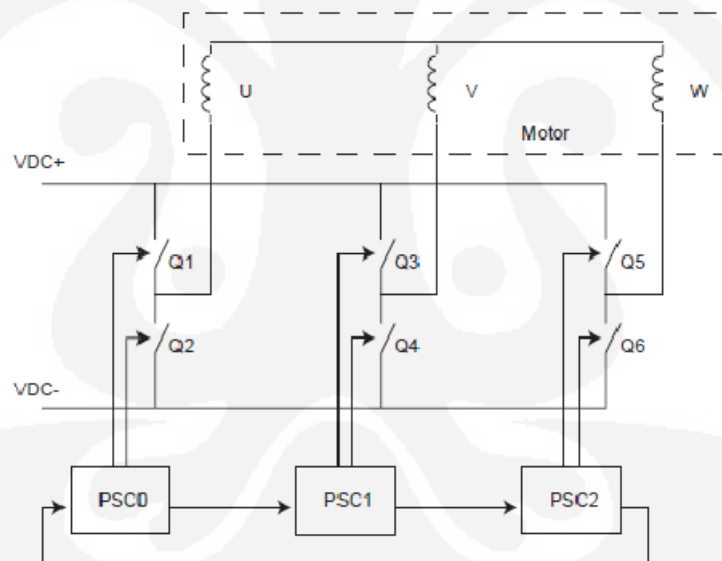
Masing-masing PSC bisa dianggap sebagai generator PWM dengan dua *output* yang komplementer. PSC mempunyai 2 input yang bisa menghentikan atau memicu ulang gelombang sehingga memungkinkan PSC dapat berjalan sendiri tanpa membutuhkan tambahan *embedded software*. Misalnya pada deteksi arus. Arus bisa diawasi dengan sebuah komparator yang bisa memicu PSC untuk membangkitkan gelombang jika arus maksimum tercapai.

Sumber *clock* PSC bisa berupa *fast clock* seperti *output* dari PLL(*Phase Lock Loop*) 64 MHz sehingga PSC dapat membangkitkan PWM berkecepatan tinggi dengan resolusi yang tinggi. Atau PSC juga bisa diberikan *clock* yang lebih lambat seperti PLL *intermediate output* atau dengan *clock* dari CPU (CLKio). Selain itu PSC juga mempunyai *prescaller* untuk membangkitkan sinyal dengan frekuensi yang sangat rendah.

PSC dapat bekerja secara sinkronisasi ataupun berdiri sendiri (*independen*)



Gambar 2.10. contoh dengan 3 PSC yang bekerja secara independen



Gambar 2.11. contoh 3 PSC yang disinkronisasi

3.4.1. Mode Kerja PSC

PSC mempunyai 4 mode kerja yaitu

a. *4 ramp mode*

Setiap keluaran PSC mempunyai 2 SFR(*Special Function Register*). Pada mode ini untuk menentukan *On-Time* digunakan *register* OCRnRAH/L

dan OCRnRBH/L, sedangkan *Dead-Time* ditentukan pada *register* OCRnSAH/L dan OCRnSBH/L. Pada mode 4 ramp overlap gelombang tidak mungkin terjadi sehingga tidak ada resiko *cross conduction*.

b. *2 ramp mode*

Mode ini mirip dengan 4 *ramp mode*, perbedaannya OCRnRAH/L dan OCRnRBH/L merupakan jumlah *On-Time* dan *Dead-Time* untuk setiap *output*. *Dead-Time* ditentukan pada register OCRnSAH/L dan OCRnSBH/L. Pada mode 2 ramp overlap gelombang tidak mungkin terjadi sehingga tidak ada resiko *cross conduction*

c. *1 ramp mode*

Mode ini digunakan untuk membangkitkan *overlapped waveform*. Resiko utama dari mode ini adalah terjadinya *cross conduction* ketika mengendalikan *half bridge*.

d. *Centered mode*

Pada mode ini gelombang *output* PSC simetris dan rata tengah. Mode ini sangat berguna untuk *space vector* PWM yaitu untuk membangkitkan gelombang sinusoidal. Pada mode ini *cross conduction* dapat terjadi.

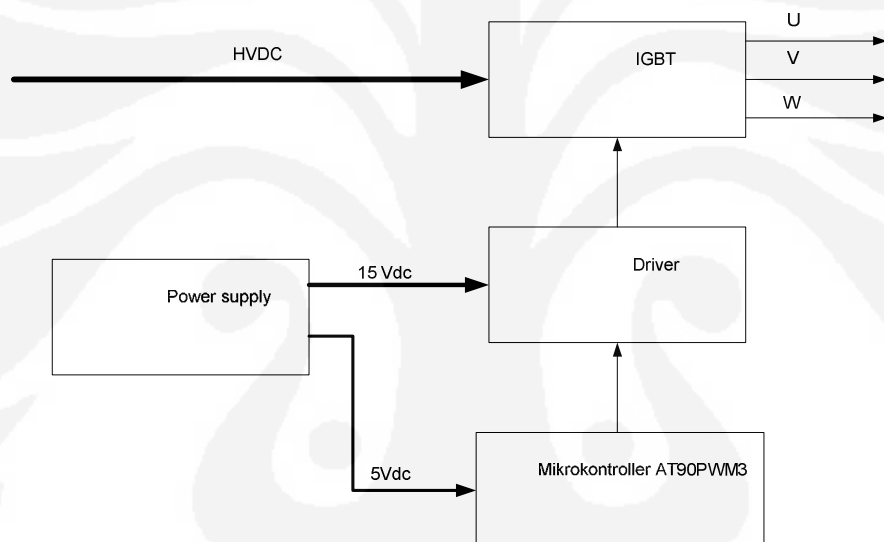
BAB 3

PERANCANGAN SISTEM INVERTER

Pada bab ini akan disajikan perancangan alat, berupa perangkat keras untuk mewujudkan sebuah perangkat inverter untuk mengubah tegangan dari sumber dc menjadi tegangan ac :

3.1. Blok Diagram Rancangan Inverter

Blok diagram rancangan inverter ditunjukkan pada Gambar 3.1. Inverter dalam skripsi ini terdiri atas beberapa bagian utama yaitu: catu daya (*power supply*), mikrokontroler AT90PWM3, *driver*, dan IGBT.



Gambar 3.1 : Diagram blok rancangan inverter.

3.2. Rancangan Inverter

3.2.1. Hardware

3.2.1.1. Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)

IGBT yang digunakan adalah modul IGBT 7MBP75JB060-01 yang diproduksi oleh Fuji Electric seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3.2. Modul IGBT ini mempunyai 7 buah IGBT di dalamnya, yang terdiri dari 3 IGBT pada lengan atas, 3 IGBT pada lengan bawah dan 1 IGBT sebagai *brake*. Untuk lebih jelasnya dilihat dalam datasheet modul IGBT yang ada pada lampiran.

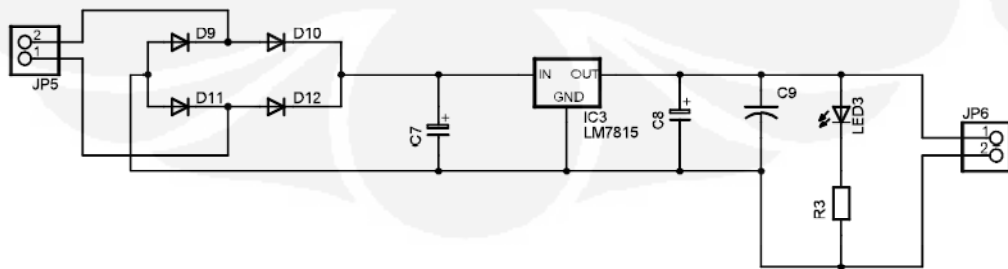
Perangkat inverter ini menggunakan IGBT dengan pertimbangan bahwa IGBT relatif mudah dikendalikan dan mempunyai *conduction loss* yang kecil serta cocok untuk aplikasi arus dan tegangan yang tinggi. Selain itu IGBT juga mempunyai kecepatan *switching* yang tinggi sehingga cocok untuk diterapkan sebagai saklar dalam rangkaian inverter 3 fase dimana waktu transisi *switching*-nya cepat. Masing-masing IGBT dikendalikan dengan rangkaian driver yang akan dijelaskan pada Bagian 3.2.1.4. Catu daya dan driver untuk masing-masing IGBT pada lengan atas harus dipisahkan, sedangkan untuk IGBT pada lengan bawah sumber catu dayanya digabungkan



Gambar 3.2. Modul IGBT 7MBP75JB060-01

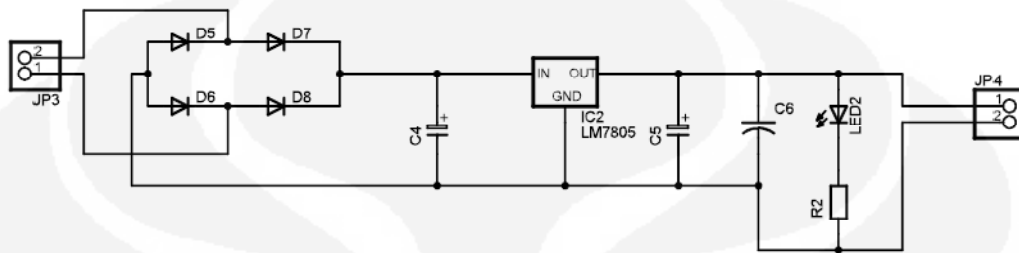
3.3.1.2. Catu Daya

Rangkaian catu daya digunakan untuk mencatu tegangan rangkaian mikrokontroler AT90PWM3 dan rangkaian *driver*. Untuk rangkaian mikrokontroler dimana dibutuhkan tegangan +5Vdc digunakan regulator LM7805. Sedangkan untuk mencatu rangkaian *driver* dimana dibutuhkan tegangan +15 Vdc digunakan regulator LM7815. Skematik rangkaian catu daya untuk *driver* IGBT diperlihatkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 : skematik catu daya untuk driver IGBT

Catu daya untuk rangkaian *driver* IGBT berjumlah 4 buah yaitu 3 rangkaian *driver* IGBT lengan atas, dan satu untuk rangkaian *driver* IGBT lengan bawah. Sedangkan catu daya untuk rangkaian *alarm* digabungkan dengan catu daya untuk mikrokontroler karena sama-sama membutuhkan tegangan +5Vdc, seperti yang di perlihatkan pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 : skematik catu daya untuk *minimum system* mikrokontroler AT90PWM3.

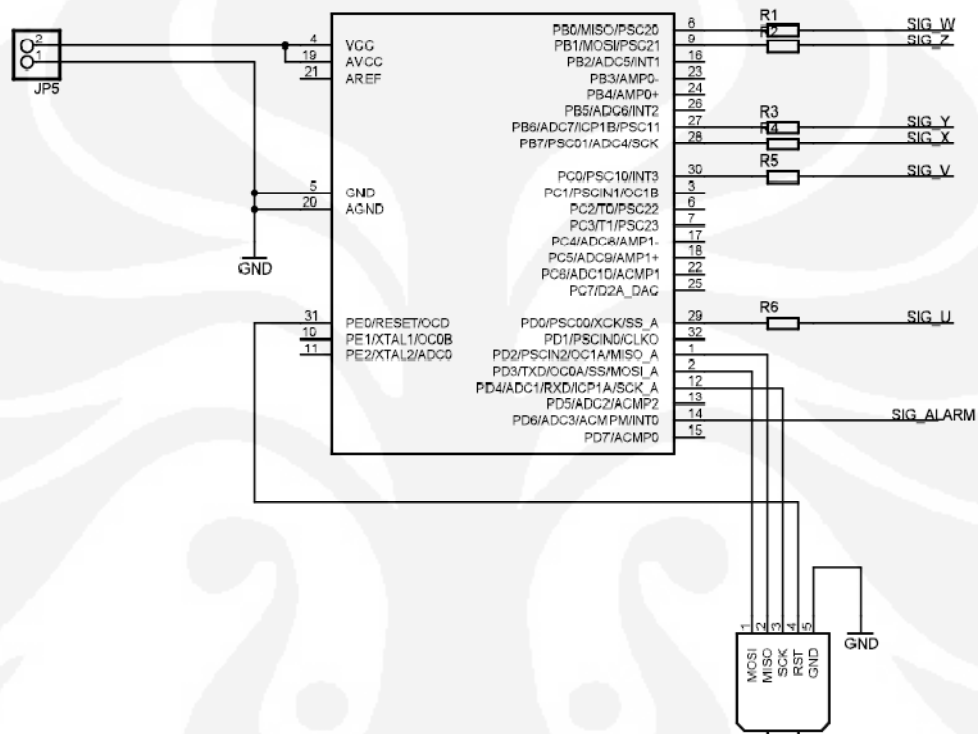


Gambar 3.5 : rangkaian catu daya untuk *driver* IGBT dan mikrokontroler AT90PWM3.

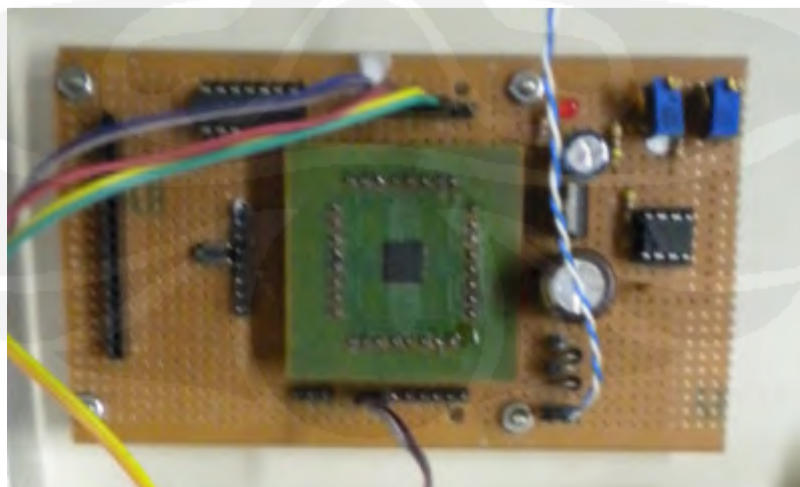
3.2.1.3. Mikrokontroler AT90PWM3

Sebagai pengendali digunakan IC mikrokontroler AVR AT90PWM3 yang di produksi oleh Atmel. Dipilih IC AVR AT90PWM3 karena IC ini mempunyai fitur khusus yaitu *Power Stage Controller* (PSC) yang digunakan untuk membangkitkan PWM (*Pulse Width Modulation*). AT90PWM3 mempunyai 3 buah PSC yaitu PSC0, PSC1, dan PSC2. Sehingga IC ini dapat membangkitkan 3 buah PWM yang berbeda sekaligus. Setiap PSC mempunyai 2 buah *output* yaitu

PSCOUTnA dan PSCOUTnB yang dapat digunakan untuk mengendalikan sepasang IGBT. Pada rancang bangun inverter ini 3 buah PSC tersebut dikonfigurasi untuk berkerja secara *synchronous* untuk membangkitkan 3 buah sinusoidal PWM yang masing-masing memiliki pergeseran fasa sebesar 120° . Skematik rangkaian IC AVR AT90PWM3 ditunjukkan pada gambar 3.6.



Gambar 3.6 : Skematik *minimum system* mikrokontroler AT90PWM3.



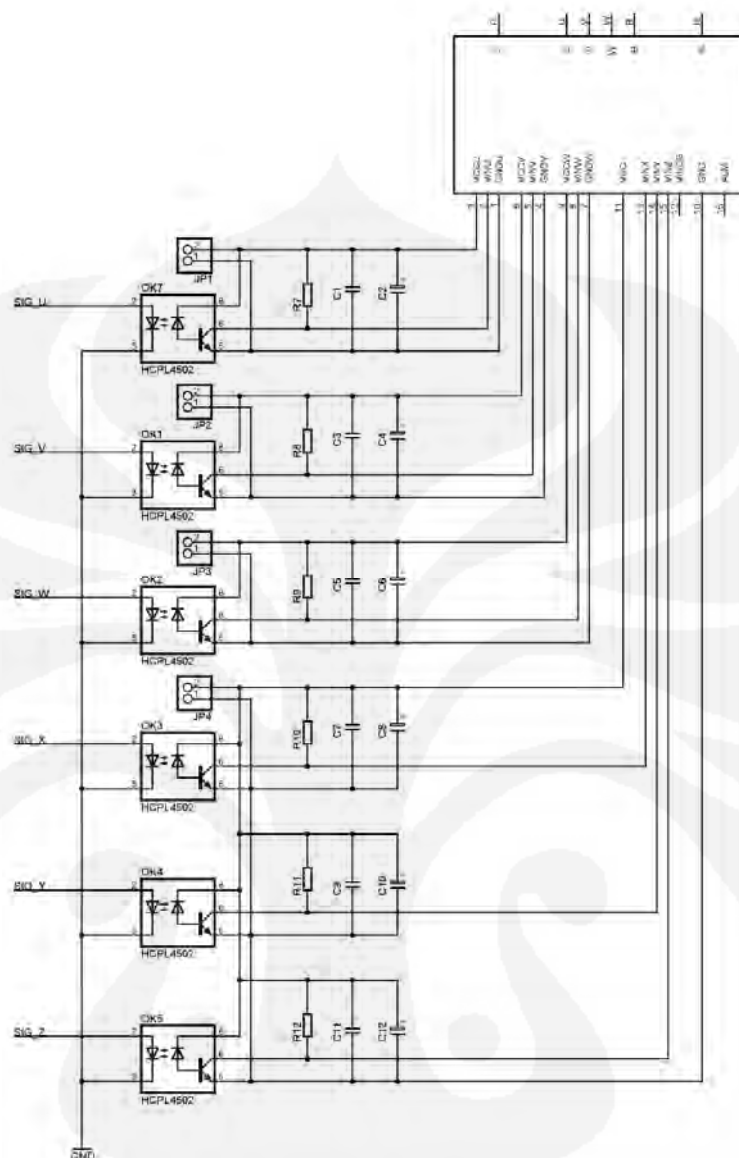
Gambar 3.7 : Rangkaian *minimum system* mikrokontroler AT90PWM3

3.2.1.4. Driver

Rangkaian *driver* merupakan antarmuka antara mikrokontroler dengan IGBT. Pada rangkaian driver digunakan *optocoupler* yang berfungsi untuk memisahkan mikrokontroler yang merupakan perangkat tegangan rendah (*low voltage*) dengan IPM (*Integrated Power Module*) yang merupakan perangkat tegangan tinggi (*high voltage*). Untuk masing-masing IGBT mempunyai satu rangkaian *driver* sendiri-sendiri. Skematik rangkaian driver diperlihatkan pada Gambar 3.9. Dari gambar tersebut terlihat *output* rangkaian ini tersambung ke IPM yaitu ke kaki-kaki Vin IGBT, Vcc dan GND. Rangkaian driver U, V, dan W mempunyai Vcc serta GND yang terpisah (*floating*). Sedangkan Vcc serta GND rangkaian driver X, Y, dan Z digabungkan menjadi satu. Kaki anoda optocoupler terhubung ke kaki *output* mikrokontroler dan kaki katoda optocoupler terhubung ke GND rangkaian mikrokontroler. Spesifikasi optocoupler yang digunakan yaitu TLP 759 untuk antarmuka kendali dan TLP521 untuk antarmuka alarm.



Gambar 3.8 : Rangkaian *driver* IGBT

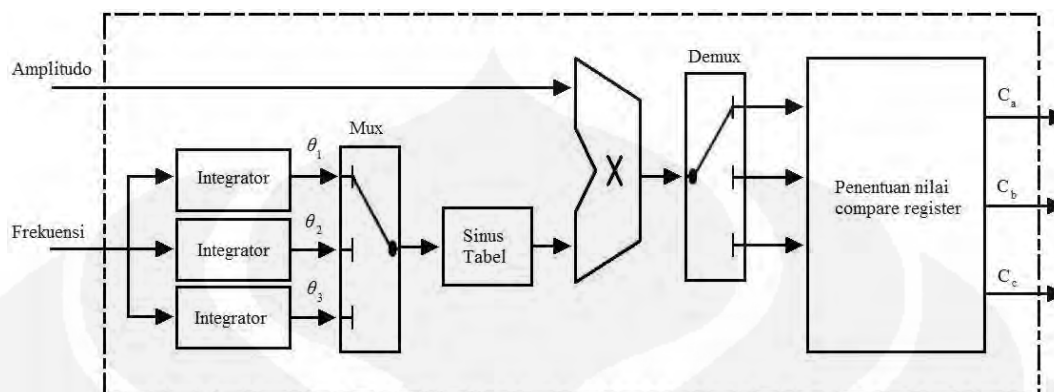


Gambar 3.9 : Skematik *driver* IGBT

3.2.2. Software

Program kendali IGBT pada rancang bangun inverter ini dibuat dengan menggunakan bahasa C dengan menggunakan kompilerv AVR Studio GCC. Dalam rancang bangun inverter ini algoritma yang digunakan yaitu *Natural PWM Algorithm*. Algoritma *natural PWM* menggunakan sinus tabel untuk membangkitkan gelombang sinus. Nilai input frekuensi dimasukkan ke integrator kemudian nilai integerator dimasukkan ke dalam sinus tabel. Selanjutnya nilai sinus tabel dikalikan dengan nilai input amplitudo. Hasilnya kemudian

dibandingkan dengan nilai *counter* untuk menentukan nilai *compare register*. Diagram alir algoritma natural PWM dapat dilihat pada Gambar 3.10.

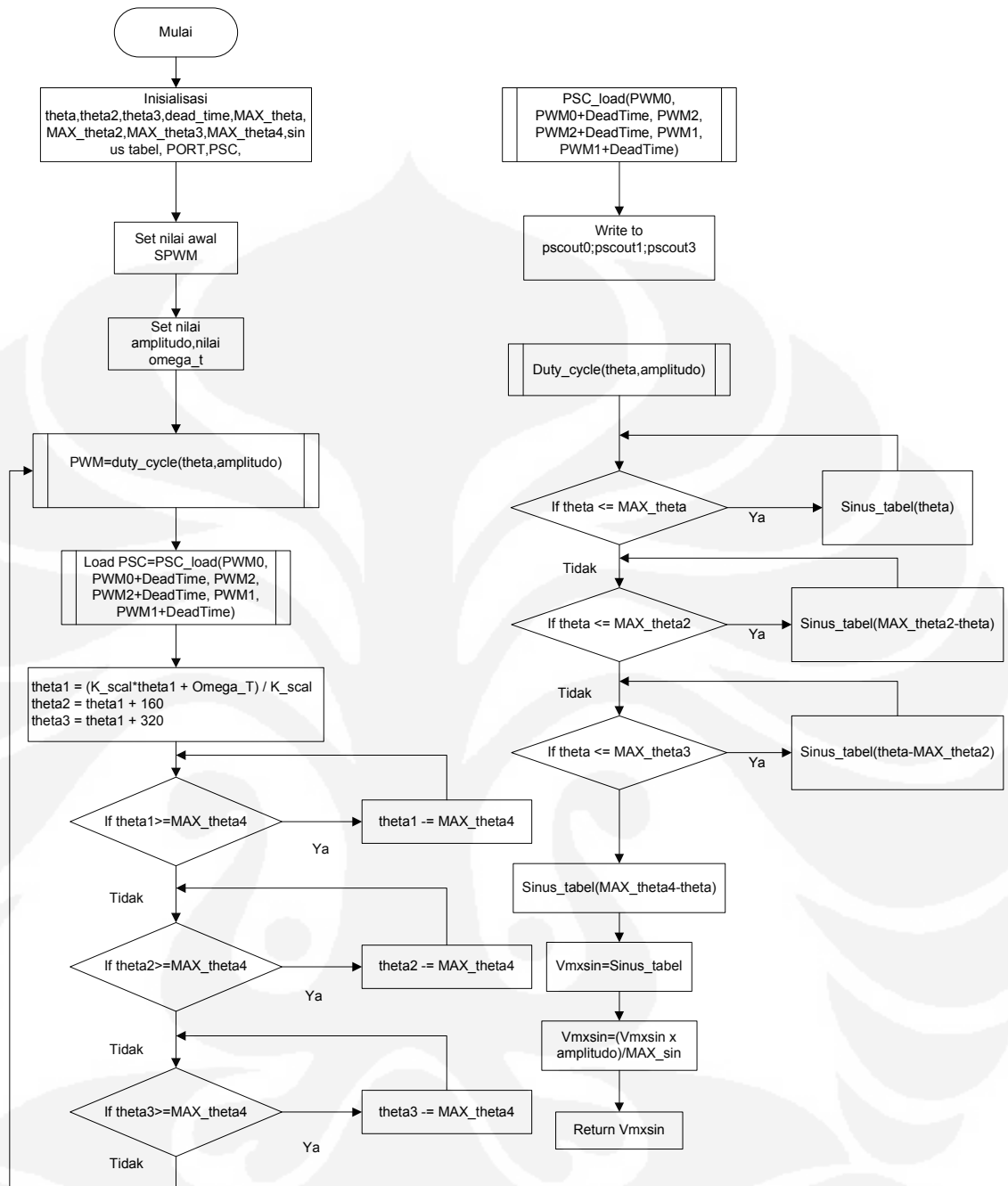


Gambar 3.10 : Diagram alir data *Natural PWM*

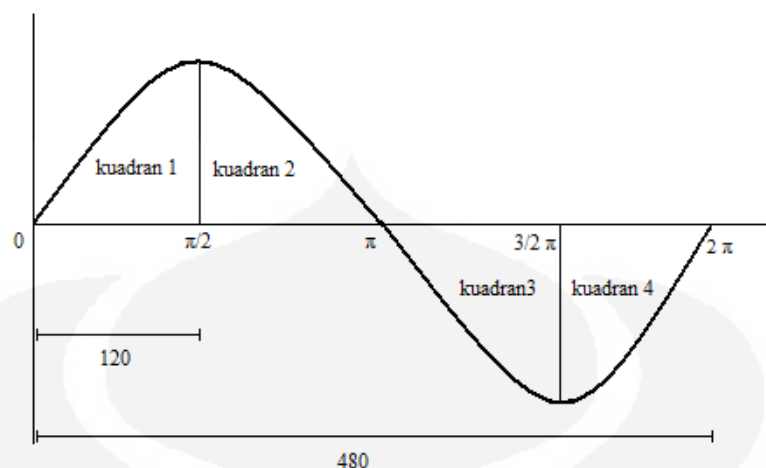
3.2.2.1. Flowchart Program

Alur program ditunjukkan pada Gambar 3.11. Dari gambar tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut: Pertama-tama dilakukan inisialisasi terlebih dahulu. Inisialisasi mencakup inisialisasi port, nilai theta, nilai batas theta penentuan nilai awal PWM dan inisialisasi PSC serta penentuan nilai parameter program lainnya. Memasuki looping utama ditentukan nilai amplitudo dan nilai ωT . Kemudian dilakukan update nilai SPWM dengan memanggil *function* `duty_cycle`. Setelah itu nilai SPWM dibangkitkan menjadi gelombang dan dikeluarkan ke port PSCnOUTx dengan memanggil *function* `PSC_load`. Selanjutnya adalah dilakukan update nilai θ_1 , θ_2 , dan θ_3 untuk gelombang SPWM berikutnya. Agar nilai θ_1 , θ_2 , dan θ_3 selalu diantara 0 sampai 480, maka dilakukan pembatasan nilai θ_1 , θ_2 , dan θ_3 . Jika salah satu sudut ini nilainya lebih dari 480, maka nilai 480 akan dikurangi 1, Kemudian program akan kembali ke awal looping utama, demikian seterusnya.

Pada skripsi ini sebuah sinus tabel digunakan untuk membangkitkan 3 buah gelombang sinus yang masing-masing memiliki pergeseran fasa sebesar 120 derajat. Ilustrasi aplikasi sinus tabel untuk membangkitkan gelombang sinus diperlihatkan pada Gambar 3.12.



Gambar 3.11. Flowchart Program



Gambar 3.12. Aplikasi sinus tabel

Dari Gambar 2.12 dapat dijelaskan, sinus tabel yang digunakan dalam skripsi ini mempunyai panjang 120 *step*. Untuk menghemat memory maka sinus tabel dibuat dengan nilai $\sin(\theta)$ dari 0 sampai dengan $\pi/2$. Untuk menghasilkan satu gelombang sinus utuh, gelombang sinus dibagi menjadi 4 kuadran yaitu :

- a. Kuadran 1 : untuk θ antara 0 sampai dengan $\pi/2$
- b. Kuadran 2 : untuk θ antara $\pi/2$ sampai dengan π
- c. Kuadran 3 : untuk θ antara π sampai dengan $3/2 \pi$
- d. Kuadran 4 : untuk θ antara $3/2 \pi$ sampai dengan 2π

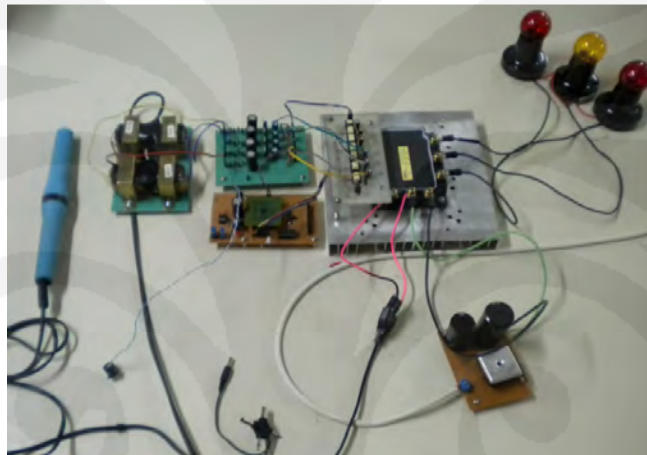
Pada kuadran 1, nilai $\sin(\theta) = \text{sinus tabel}(\theta)$, kemudian pada kuadran 2, nilai $\sin(\theta) = \text{sinus tabel}(\pi - \theta)$. Selanjutnya pada kuadran 3, nilai $\sin(\theta) = -\text{sinus tabel}(\theta - \pi)$, terakhir pada kuadran 4, nilai $\sin(\theta) = -\text{sinus tabel}(2\pi - \theta)$. Sehingga untuk menghasilkan satu gelombang sinus utuh sinus table diulang 4 kali atau $4 \times 120 = 480 \text{ step}$. Oleh karena itu nilai θ_1 , θ_2 , dan θ_3 dibatasi agar nilainya tidak melebihi 480.

BAB 4

PENGUJIAN

Pada bab 4 akan dibahas tentang pengujian dan analisa hasil dari sistem inverter yang telah di rancang dan direalisasikan. Pengujian yang dilakukan yaitu:

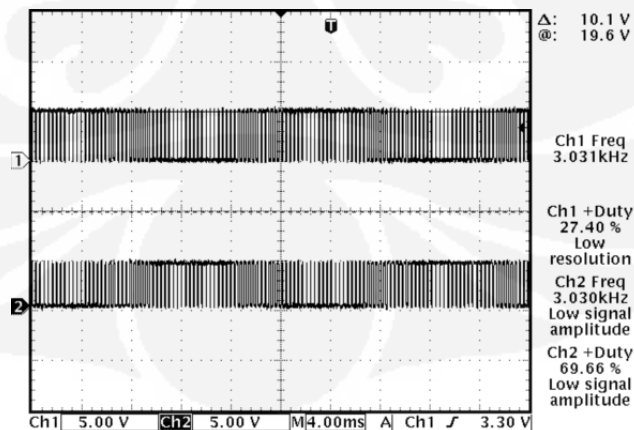
1. Pengujian keluaran sinusoidal PWM dari PSC0, PSC1 dan PSC2.
2. Pengujian sinyal keluaran driver U, V, W, X, Y dan Z
3. Pengujian parameter amplitudo dan frekuensi



Gambar 4.1 : Pengujian rangkaian inverter 3 fasa di laboratorium

4.1. Pengujian Keluaran Sinusoidal PWM dari PSC0, PSC1 dan PSC2

Hasil pengujian keluaran sinusoidal PWM dari PSC0 ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 : Keluaran sinusoidal PWM kaki pin PSCOUT0 dan PSCOUT01.

Dari gambar 4.2 tampak frekuensi *carrier*-nya adalah 3 KHz. Sedang frekuensi SPWM-nya adalah:

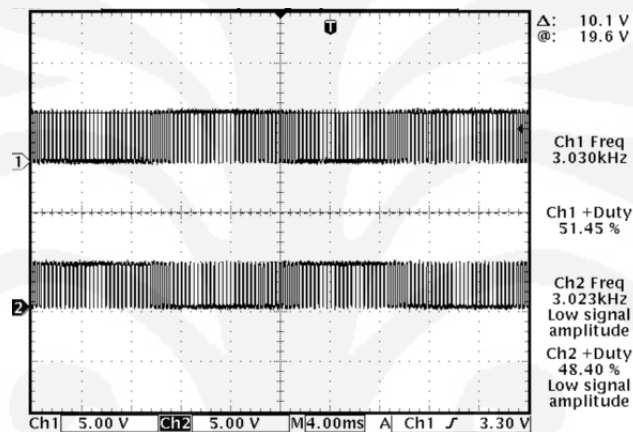
Nilai $time/div = 4\text{ ms}$

Panjang 1 gelombang = 5 kotak

Periode gelombang = $5 \times 4\text{ms} = 20\text{ms}$

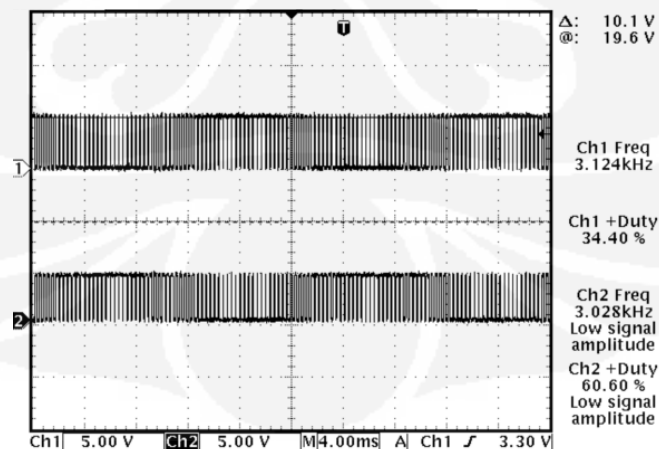
Frekuensi gelombang = $1/20\text{ms} = 0.005\text{kHz} = 50\text{ Hz}$

Keluaran sinusoidal PWM dari kaki pin PSCOUT10 dan PSCOUT11 ditunjukkan pada Gambar 4.3.



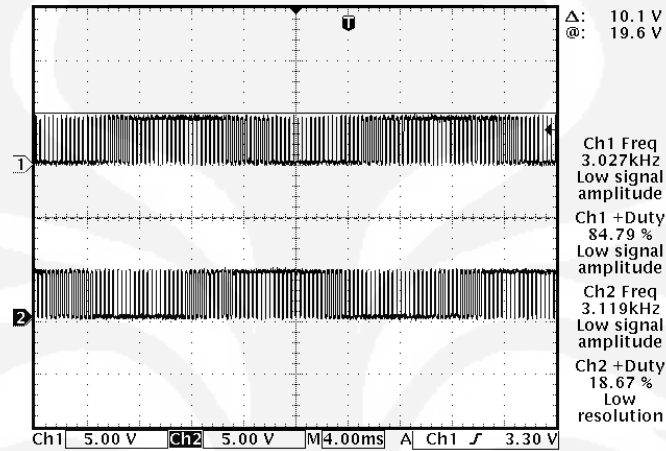
Gambar 4.3 : Keluaran sinusoidal PWM kaki pin PSCOUT10 dan PSCOUT11.

Karena ketiga PSC dikonfigurasi untuk bekerja secara *synchronous* maka gelombang keluaran SPWM dari PSC1 pada gambar 4.3 mempunyai frekuensi SPWM dan frekuensi *carrier* yang sama dengan gelombang keluaran SPWM dari PSC0. Namun fasa gelombang keluaran SPWM PSC1 digeser sejauh 120° .

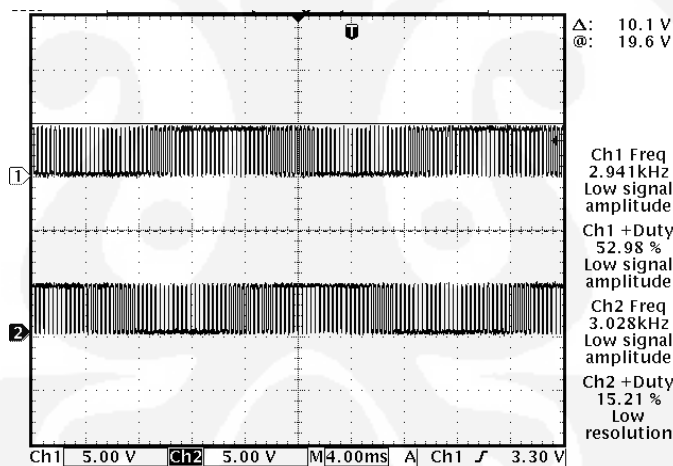


Gambar 4.4 : Keluaran sinusoidal PWM kaki pin PSCOUT20 dan PSCOUT21.

Pada Gambar 4.4 ditunjukkan hasil keluaran sinusoidal PWM dari PSC2. Keluaran gelombang SPWM dari PSC2 mempunyai frekuensi yang sama dengan keluaran gelombang SPWM dari PSC0 dan PSC1. Selain itu masing-masing keluaran gelombang SPWM dari PSC0, PSC1 dan PSC2 berbeda fasa 120^0 . Hal ini dibuktikan pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.6.



Gambar 4.5 : Keluaran sinusoidal PWM dari PSC0 vs Keluaran sinusoidal PWM dari PSC1.



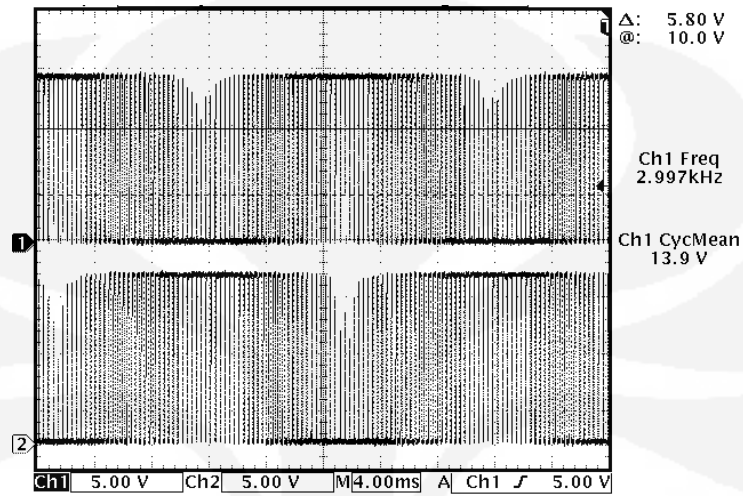
Gambar 4.6 : Keluaran sinusoidal PWM dari PSC1 vs Keluaran sinusoidal PWM dari PSC2.

4.2. Pengujian Sinyal Keluran *Driver* U, V, W, X, Y dan Z

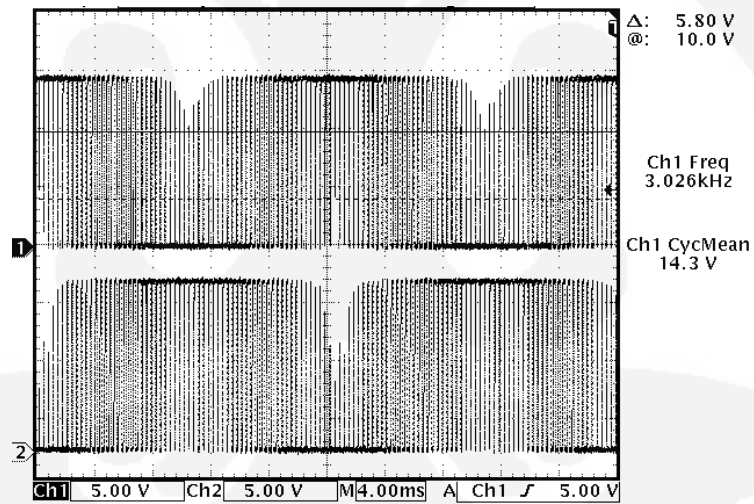
Pin U, V, dan W merupakan lengan *gate* IGBT bagian atas dimana masing-masing pin tersebut *floating* (terpisah), sedangkan pin X, Y dan Z merupakan lengan *gate* IGBT bagian bawah, ketiga pin ini mempunyai Vcc dan GND yang sama. Jadi U dan X, V dan Y, serta W dan Z merupakan pasangan-pasangan

IGBT yang bekerja secara komplementer. besar tegangan keluaran dari *optocoupler* U, V, W, X, Y, dan Z adalah sekitar 15 Vdc.

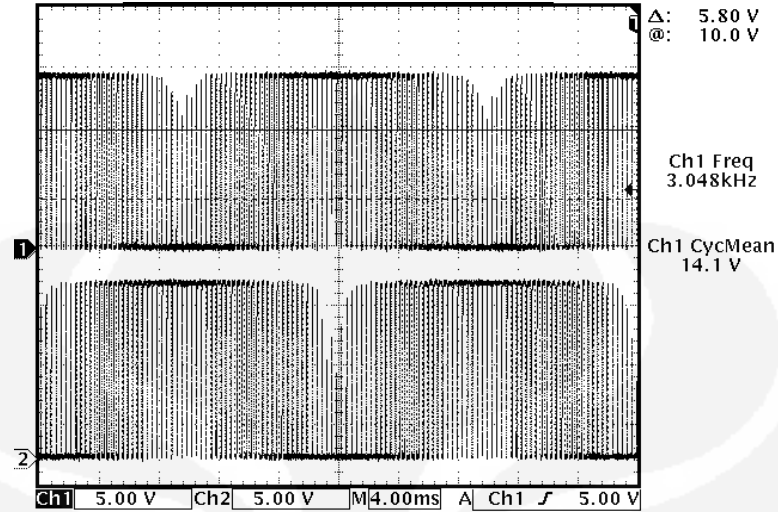
Hasil pengujian sinyal pada pin U dan X ditunjukkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 : Keluaran sinusoidal PWM pada *driver* U dan X.



Gambar 4.8 : Keluaran sinusoidal PWM pada *driver* V dan Y.



Gambar 4.9 : Keluaran sinusoidal PWM pada *driver* W dan Z.

Dari gambar keluaran sinusoidal PWM pada keluaran optocoupler tampak bentuk gelombangnya sedikit berbeda dengan bentuk gelombang keluaran dari pin PSC mikrokontroler, Hal ini dikarenakan adanya *switching time dispersion* dari *optocoupler* sebesar 0,25 sampai 0,8 μ s. *Switching time dispersion* merupakan selisih antara tundaan waktu propagasi dari L ke H dan tundaan waktu propagasi dari H ke L.

4.3. Pengujian parameter Amplitudo dan Frekuensi

Agar menghasilkan bentuk sinyal yang terbaik maka dilakukan pengujian dengan memasukkan parameter yang berbeda pada program. Perubahan nilai amplitudo akan menghasilkan perubahan panjang t_{on} dan t_{off} . Sedangkan untuk frekuensi ditentukan oleh besarnya *update* nilai θ . Nilai θ untuk siklus gelombang SPWM berikutnya dihitung dengan rumus

$$\theta' = ((k \cdot \theta) + \omega T) / k$$

Dengan k adalah konstanta untuk *angel integrator*

Resolusi gelombang SPWM yang dihasilkan adalah

$$\text{Resolusi} = \frac{\text{panjang sinus tabel}}{\theta'}$$

berikut Tabel 4.1 dan Tabel 4.2 menunjukkan hasil pengujian nilai ωT dan k

Tabel 4.1. Pengujian nilai k

k	ωT	Perioda	Frekuensi	Resolusi
16	157	8ms	125 Hz	11,09
32	157	20ms	50 Hz	20,31
64	157	40ms	25 Hz	34,75
128	157	80ms	12.5 Hz	53,89
16	314	4ms	250 Hz	5,81
32	314	8ms	125 Hz	11,09
64	314	20ms	50 Hz	20,31
128	314	40ms	25 Hz	34,75
16	471	2ms	500 Hz	3,94
32	471	6ms	166,7 Hz	7,63
64	471	10ms	100 Hz	14,35
128	471	30ms	33.3 Hz	25,6

Tabel 4.2. Pengujian nilai ωT

k	ωT	Perioda	Frekuensi	Resolusi
16	157	8ms	125 Hz	11,09
16	314	4ms	250 Hz	5,81
16	471	2ms	500 Hz	3,94
32	157	20ms	50 Hz	20,31
32	314	8ms	125 Hz	11,09
32	471	6ms	166,7 Hz	7,63
64	157	40ms	25 Hz	34,75
64	314	20ms	50 Hz	20,31
64	471	10ms	100 Hz	14,35
128	157	80ms	12.5 Hz	53,89
128	314	40ms	25 Hz	34,75
128	471	30ms	33.3 Hz	25,6

Dari Tabel 4.1 dapat diketahui bahwa semakin tinggi nilai k maka nilai resolusi gelombangnya akan semakin baik, namun nilai frekuensi maksimalnya rendah. sebaliknya dari Tabel 4.2 dapat diketahui bahwa semakin tinggi nilai ωT maka frekuensinya akan semakin tinggi namun resolusinya akan semakin buruk.



BAB 5

KESIMPULAN

Berdasarkan proses-proses yang telah dilakukan pada rancang bangun perangkat inverter 3 fasa dengan perangkat *switching* IGBT dan metode *Natural PWM* berbasis mikrokontroler AVR AT90PWM3 maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

1. Algoritma natural PWM dapat digunakan sebagai *control switching* pada inverter PWM.
2. IC AT90PWM3 dapat diaplikasikan untuk inverter 3 fasa karena dapat menghasilkan 3 buah PWM sekaligus yang dapat diatur sesuai kebutuhan.
3. Semakin besar nilai ωT maka frekuensi akan semakin tinggi namun resolusi akan semakin buruk.
4. Semakin besar nilai k maka resolusi akan semakin bagus, namun frekuensi maksimalnya rendah.

DAFTAR ACUAN

- [1] Daniel W. Hart (1997). "Introduction To Power Electronics", London.

DAFTAR PUSTAKA

Daniel W. Hart (1997). "Introduction To Power Electronics", London

Application note Atmel(2005). "AVR494 : AC Induction Motor Control Using the constant V/f Principle and Natural PWM Algorithm".www.atmel.com

Application note Atmel(2006). "AVR434 : PSC Cookbook".www.atmel.com

Application note Fuji Electric(2004) "Fuji IGBT Modules Application Note".www.fujielectric.com

Application note Advance Power Technology(2002) "IGBT Tutorial"
www.advancedpower.com



LAMPIRAN
DATASHEET IC MIKROKONTROLER AVR AT90PWM3

Features

- High Performance, Low Power AVR[®] 8-bit Microcontroller
- Advanced RISC Architecture
 - 129 Powerful Instructions - Most Single Clock Cycle Execution
 - 32 x 8 General Purpose Working Registers
 - Fully Static Operation
 - Up to 1 MIPS throughput per MHz
 - On-chip 2-cycle Multiplier
- Data and Non-Volatile Program Memory
 - 8K Bytes Flash of In-System Programmable Program Memory
 - Endurance: 10,000 Write/Erase Cycles
 - Optional Boot Code Section with Independent Lock Bits
- In-System Programming by On-chip Boot Program
- True Read-While-Write Operation
 - 512 Bytes of In-System Programmable EEPROM
- Endurance: 100,000 Write/Erase Cycles
 - 512 Bytes Internal SRAM
 - Programming Lock for Flash Program and EEPROM Data Security
- On Chip Debug Interface (debugWIRE)
- Peripheral Features
 - Two or three 12-bit High Speed PSC (Power Stage Controllers) with 4-bit Resolution Enhancement
 - Non Overlapping Inverted PWM Output Pins With Flexible Dead-Time
 - Variable PWM duty Cycle and Frequency
 - Synchronous Update of all PWM Registers
 - Auto Stop Function for Event Driven PFC Implementation
 - Less than 25 Hz Step Width at 150 kHz Output Frequency
 - PSC2 with four Output Pins and Output Matrix
 - One 8-bit General purpose Timer/Counter with Separate Prescaler and Capture Mode
 - One 16-bit General purpose Timer/Counter with Separate Prescaler, Compare Mode and Capture Mode
 - Programmable Serial USART
 - Standard UART mode
 - 16/17 bit Biphase Mode for DALI Communications
 - Master/Slave SPI Serial Interface
 - 10-bit ADC
 - Up To 11 Single Ended Channels and 2 Fully Differential ADC Channel Pairs
 - Programmable Gain (5x, 10x, 20x, 40x on Differential Channels)
 - Internal Reference Voltage
 - 10-bit DAC
 - Two or three Analog Comparator with Resistor-Array to Adjust Comparison Voltage
 - 4 External Interrupts
 - Programmable Watchdog Timer with Separate On-Chip Oscillator
- Special Microcontroller Features
 - Low Power Idle, Noise Reduction, and Power Down Modes
 - Power On Reset and Programmable Brown Out Detection
 - Flag Array in Bit-programmable I/O Space (4 bytes)



**8-bit AVR[®]
Microcontroller
with 8K Bytes
In-System
Programmable
Flash**

**AT90PWM2
AT90PWM3**

**AT90PWM2B
AT90PWM3B**

4317I-AVR-01/08



3. Pin Configurations

Figure 3-1. SOIC 24-pin Package

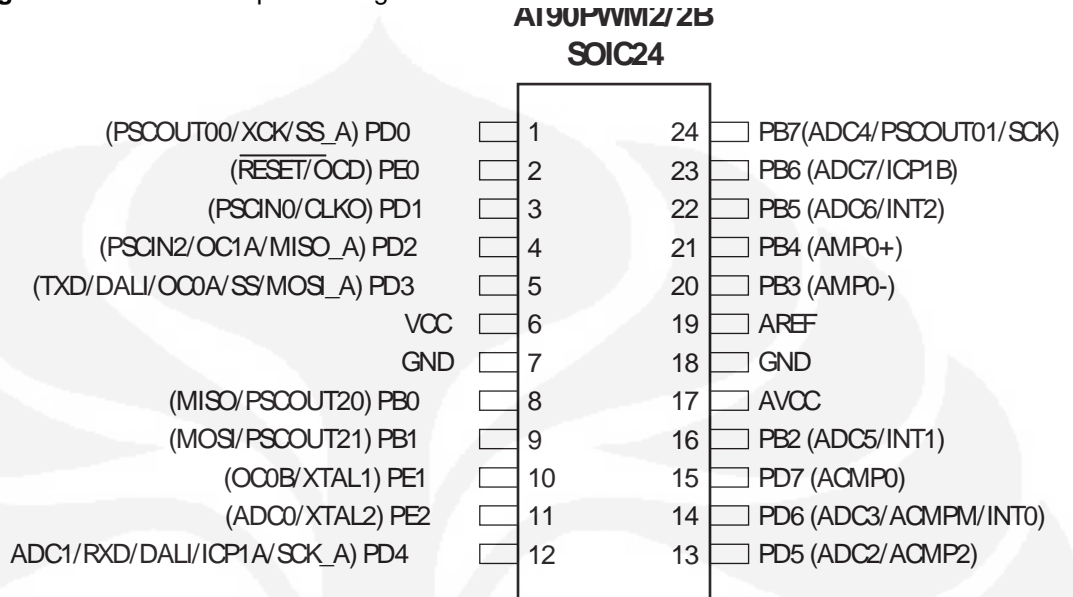


Figure 3-2. SOIC 32-pin Package

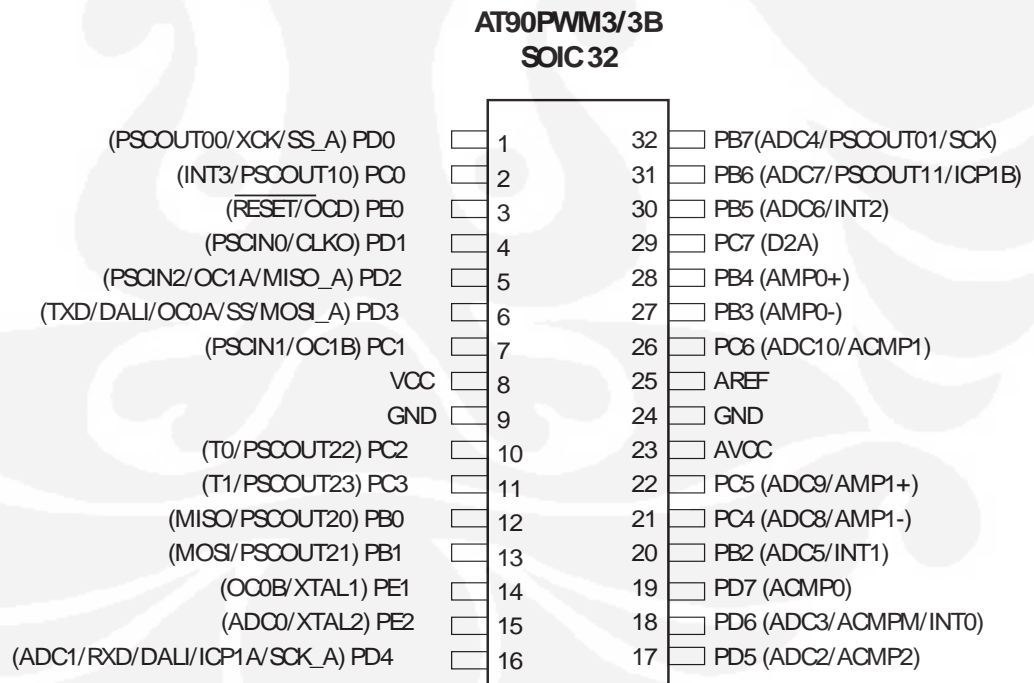
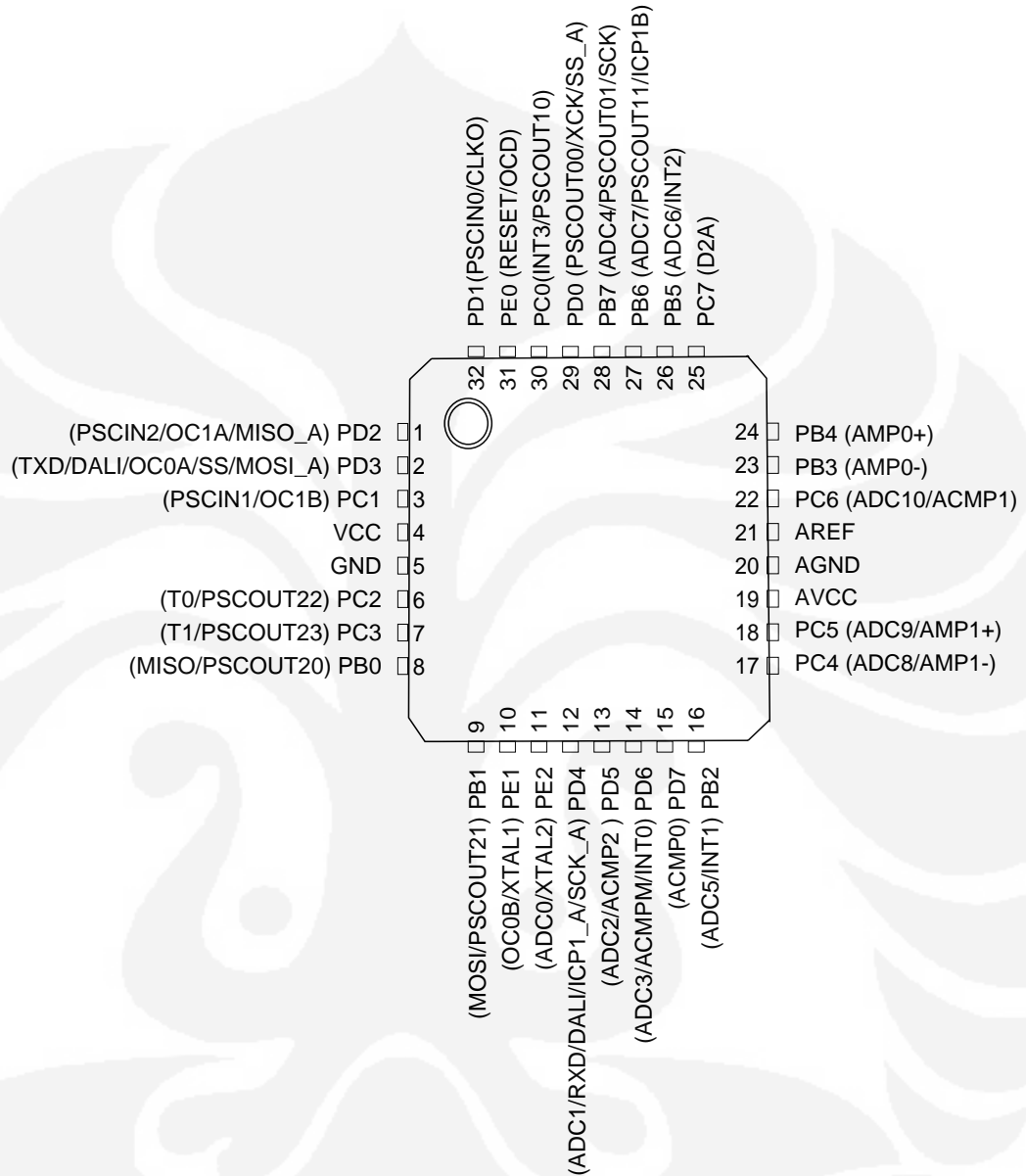


Figure 3-3. QFN32 (7*7 mm) Package.

AT90PWM3/3B QFN 32



3.1 Pin Descriptions

Table 3-1. Pin out description

S024 Pin Number	SO32 Pin Number	QFN32 Pin Number	Mnemonic	Type	Name, Function & Alternate Function
7	9	5	GND	Power	Ground: 0V reference
18	24	20	AGND	Power	Analog Ground: 0V reference for analog part

Table 3-1. Pin out description (Continued)

S024 Pin Number	SO32 Pin Number	QFN32 Pin Number	Mnemonic	Type	Name, Function & Alternate Function
6	8	4	VCC	power	Power Supply:
17	23	19	AVCC	Power	Analog Power Supply: This is the power supply voltage for analog part For a normal use this pin must be connected.
19	25	21	AREF	Power	Analog Reference : reference for analog converter . This is the reference voltage of the A/D converter. As output, can be used by external analog
8	12	8	PBO	I/O	MISO (SPI Master In Slave Out) PSCOUT20 output
9	13	9	PB1	I/O	MOSI (SPI Master Out Slave In) PSCOUT21 output
16	20	16	PB2	I/O	ADC5 (Analog Input Channel5) INT1
20	27	23	PB3	I/O	AMP0- (Analog Differential Amplifier 0 Input Channel)
21	28	24	PB4	I/O	AMP0+ (Analog Differential Amplifier 0 Input Channel)
22	30	26	PB5	I/O	ADC6 (Analog Input Channel 6) INT 2
23	31	27	PB6	I/O	ADC7 (Analog Input Channel 7) ICP1B (Timer 1 input capture alternate input) PSCOUT11 output (see note 1)
24	32	28	PB7	I/O	PSCOUT01 output ADC4 (Analog Input Channel 4) SCK (SPI Clock)
NA	2	30	PC0	I/O	PSCOUT10 output (see note 1) INT3
	7	3	PC1	I/O	PSCIN1 (PSC 1 Digital Input) OC1B (Timer 1 Output Compare B)
	10	6	PC2	I/O	T0 (Timer 0 clock input) PSCOUT22 output
	11	7	PC3	I/O	T1 (Timer 1 clock input) PSCOUT23 output
	21	17	PC4	I/O	ADC8 (Analog Input Channel 8) AMP1- (Analog Differential Amplifier 1 Input Channel)
	22	18	PC5	I/O	ADC9 (Analog Input Channel 9) AMP1+ (Analog Differential Amplifier 1 Input Channel)
	26	22	PC6	I/O	ADC10 (Analog Input Channel 10) ACMP1 (Analog Comparator 1 Positive Input)
	29	25	PC7	I/O	D2A : DAC output



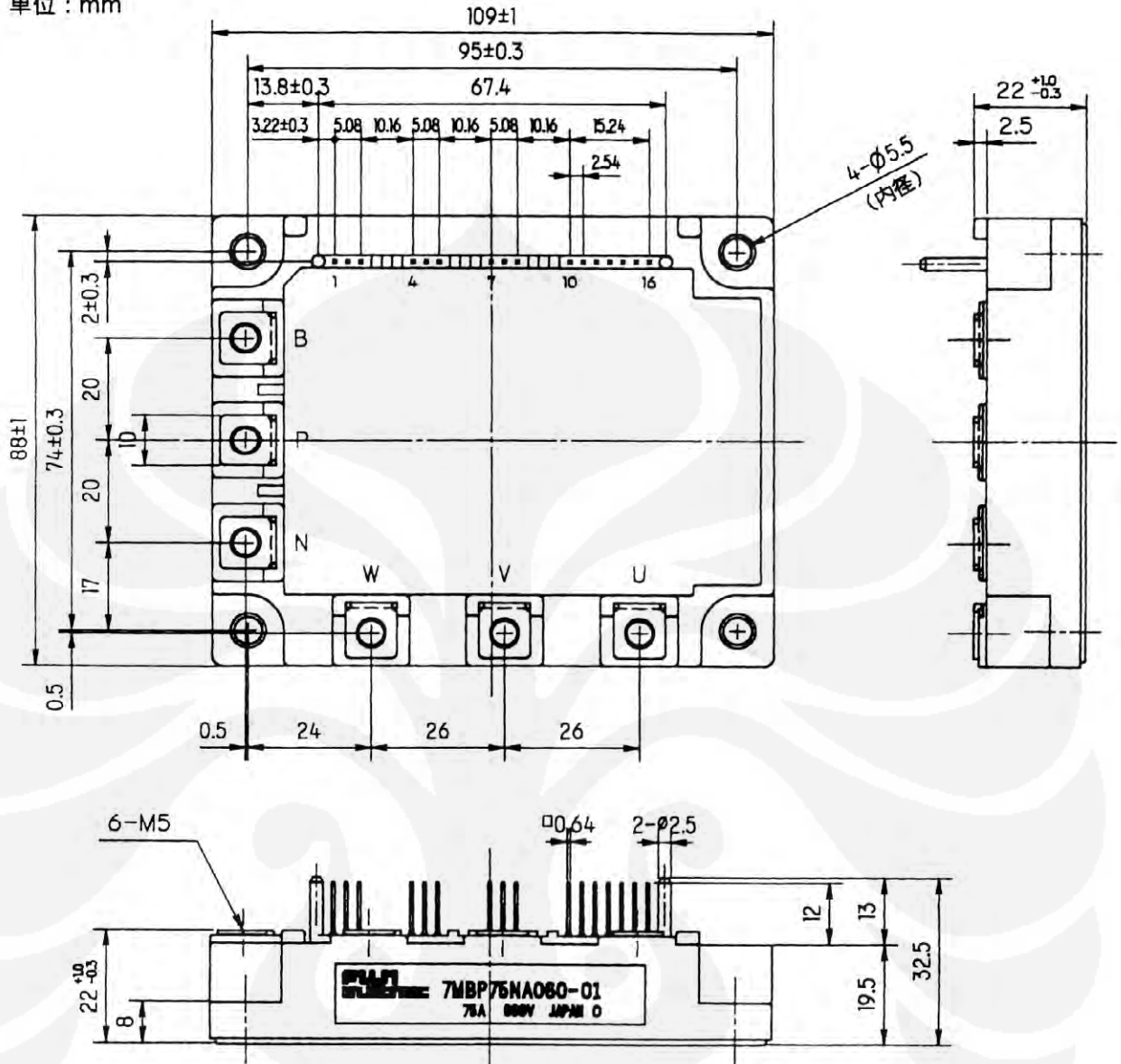
LAMPIRAN
DATASHEET MODUL IGBT 7MBP75JB060-01

1. Outline Drwing

外形図

Unit : mm

単位 : mm



This material and the information herein is the property of Fuji Electric Co., Ltd. They shall be neither reproduced, copied, lent, or disclosed in any way whatsoever for the use of any third party, nor used for the manufacturing purposes without the express written consent of Fuji Electric Co., Ltd.

Fuji Electric Co., Ltd.

DWG.NO.

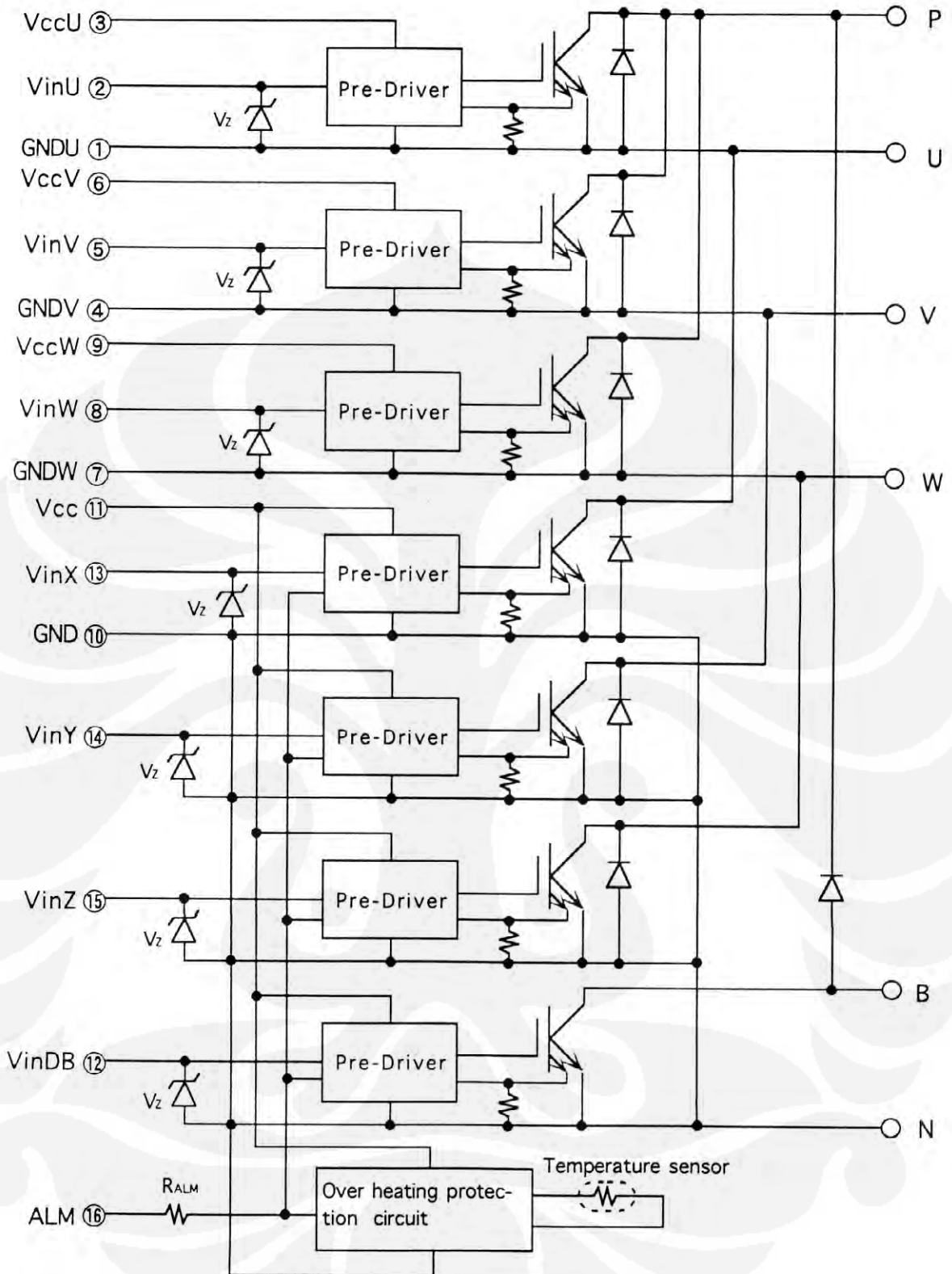
MS6M0279

3/16

H04-004-03

2 Block Diagram

ブロック図

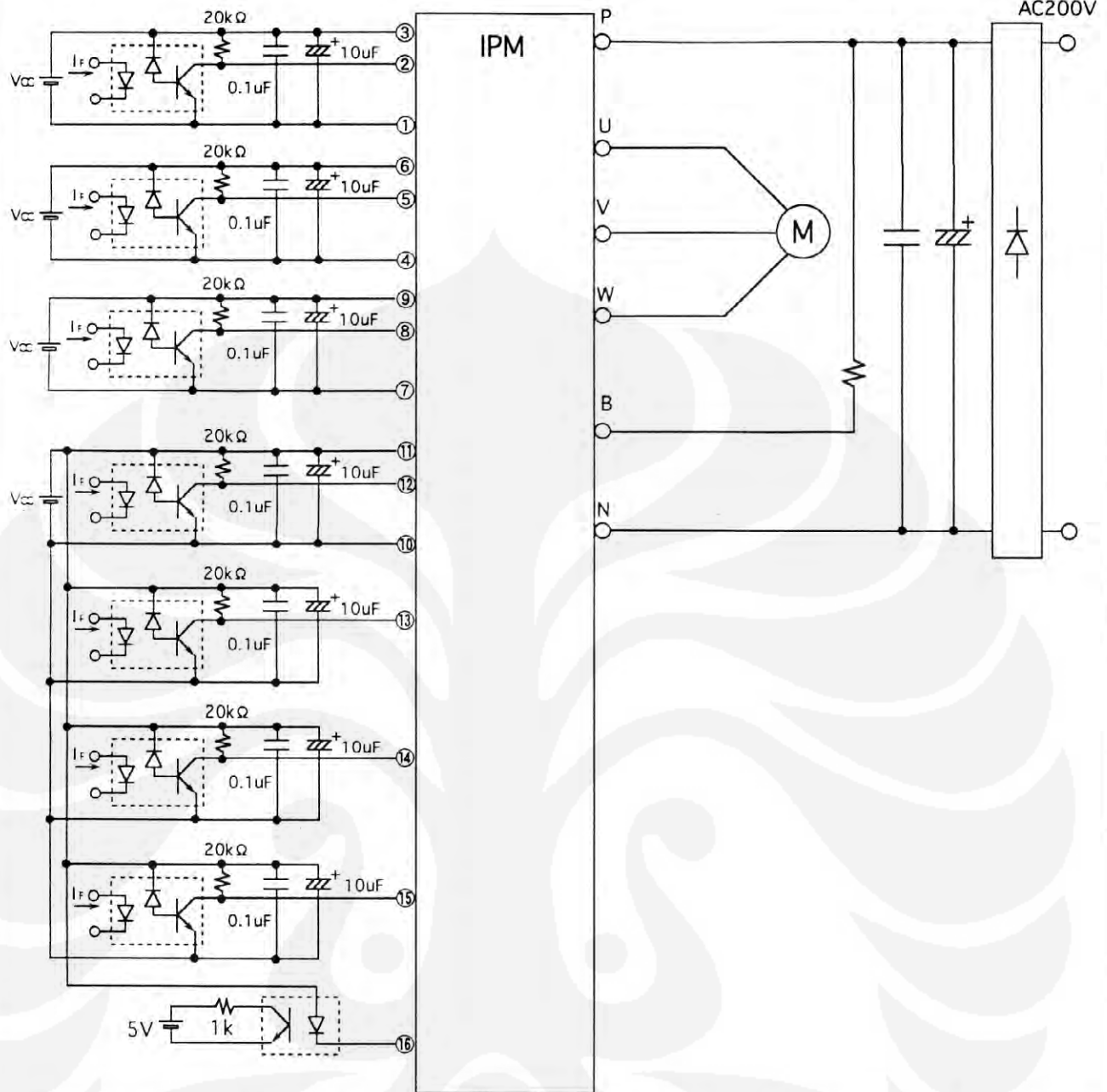


Pre-Drivers include following functions

- ① Short Circuit Protection Circuit
- ② Amplifier for Driver
- ③ Under Voltage Lockout Circuit
- ④ Over current Protection Circuit

This material and the information herein is the property of Fuji Electric Co., Ltd. They shall be neither reproduced, copied, lent, or disclosed in any way whatsoever for the use of any third party, nor used for the manufacturing purposes without the express written consent of Fuji Electric Co., Ltd.

12.Example of applied circuit (応用回路例)



- The wiring between opto-coupler and input terminal of IPM should be shorter as much as possible. The stray-capacitance between primary and secondary side of opto-coupler should not be increased by pattern lay-out.

ホトカプラとIPMの入力端子間配線は、できるだけ短くしホトカプラの1次・2次間の浮遊容量を増加させないパターンレイアウトとして下さい。

- Capacitor should be installed to VCC-GND terminal of high-speed opto-coupler closely as much as possible.

高速ホトカプラのVcc-GND間には、コンデンサをできるだけ近接して取り付けて下さい。

- Use high-speed opto-coupler : $t_{PLH}, t_{PHL} \leq 0.8\mu s$, high CMR type. (Example : HCPL-4504)

高速ホトカプラ : $t_{PLH}, t_{PHL} \leq 0.8\mu s$, 高CMRタイプをご使用下さい。(例 HPCL-4504)

- Low-speed opto-coupler : $CTR \geq 100\%$

低速ホトカプラ : $CTR \geq 100\%$

Fuji Electric Co.,Ltd.

DWG.NO.

MS6M0279

15/16