

PEMBUATAN MODUL INVERTER 3 FASA SINUSOIDAL PULSE WIDTH MODULATION SEBAGAI PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI 3 FASA TERHUBUNG SEGITIGA 220 VOLT

Sardiyanto
L2F302523

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Semarang

Abstrak

Motor induksi tiga fasa merupakan jenis motor yang paling banyak digunakan di bidang industri dibandingkan motor jenis lain. Ini dikarenakan motor induksi tiga fasa memiliki banyak keunggulan. Tetapi terdapat juga suatu kelemahan dari motor induksi tiga fasa yaitu kesulitan dalam mengatur kecepatan. Karena pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa pada dasarnya dapat dilakukan dengan mengubah jumlah kutub motor atau mengubah frekuensi suplai motor. Pengaturan kecepatan dengan mengubah jumlah kutub sangat sulit karena dilakukan dengan merubah konstruksi fisik motor, jadi pengaturannya akan sangat terbatas sedangkan pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa dengan mengubah frekuensi suplai motor akan jauh lebih mudah dan tidak terbatas tanpa harus merubah konstruksi fisik motor.

Pada tugas akhir ini dibuat suatu modul inverter tiga fasa sinusoidal pulse width modulation (SPWM) untuk mengatur kecepatan motor induksi tiga fasa. SPWM ini dimaksudkan untuk menekan harmonisa pada sisi output Inverter ini pada dasarnya menggunakan modulasi sinus yaitu pendekatan pada hasil akhir gelombang sinus dengan mengatur frekuensi dari 35 Hz sampai 70 Hz dengan range 5 Hz dan tegangan masukan inverter dijaga konstan. Inverter ini menggunakan enam buah mosfet yang dipicu oleh optocoupler dan dikendalikan oleh mikrokontroler AT89S51. Modul ini diuji dengan motor induksi tiga fasa menggunakan sistem open loop tanpa beban. Kecepatan motor akan ditampilkan oleh tachometer yang dikendalikan oleh mikrokontroler AT89S51 lainnya.

Modul dalam tugas akhir ini akhirnya sudah dapat digunakan mengatur kecepatan motor induksi tiga fasa rotor bajing terhubung segitiga 220 volt dari kecepatan sekitar 1045 rpm pada frekuensi 35 Hz sampai sekitar 2085 rpm pada frekuensi 70 Hz. Pada output inverter, walaupun setelah digunakan pemecuan SPWM masih terdapat harmonisa yang timbul.

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Semakin banyaknya penggunaan motor induksi tiga fasa di dunia industri maka dituntut terciptanya kemudahan penggunaannya dalam proses suatu produksi, terutama dalam mengatur kecepatan. Pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa dapat dilakukan dengan beberapa cara yaitu mengubah jumlah kutub dan mengatur frekuensi. Dengan mengatur frekuensi tegangan, yang juga disebut inverter merupakan cara yang lebih efisien dan akan didapatkan kecepatan motor yang bervariasi.

Dengan perkembangan elektronika daya saat ini, muncul beberapa teknik aplikasi dalam pemecuan inverter antara lain *Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)*, *Selected Harmonic Elimination PWM (SHE PWM)*, *Minimum Ripple Current PWM*, *Hysteresis Band Current Control PWM*, *Sigma Delta Modulation*, dan *Space Vector PWM (SVM)*.

Pada tugas akhir ini dirancang dan dianalisa teknik pemecuan inverter tiga fasa menggunakan metode *Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)* dengan 9 pulsa pemecuan. Modulasi sinus ini diharapkan dapat menekan harmonisa yang terjadi di sisi tegangan keluaran.

1.2 Tujuan

Tujuan dari pembuatan tugas akhir ini antara lain :

1. Membuat dan mempelajari modul inverter 3 fasa dengan metode pemecuan SPWM untuk mengatur kecepatan motor induksi tiga fasa dengan 9 pulsa pemecuan dalam setengah periode dan menggunakan tegangan masukan dc yang konstan.

2. Mengamati kecepatan putar motor induksi tiga fasa terhubung segitiga dengan mengontrol frekuensi inverter.

1.3 Pembatasan Masalah

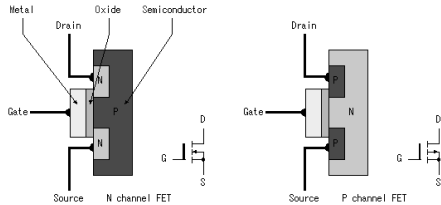
Pembahasan dalam tugas akhir ini dibatasi oleh :

- a. Motor induksi yang digunakan adalah motor induksi tiga fasa yang tersedia di laboratorium dengan terhubung segitiga.
- b. Pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa dilakukan dengan mengatur frekuensi sumber antara 35 Hz sampai 70 Hz dengan range kenaikan 5 Hz.
- c. Sistem pengaturan yang digunakan adalah *open loop*.
- d. Pengaturan frekuensi sumber menggunakan inverter tiga fasa dengan 9 pulsa *sinusoidal pulse width modulation*.
- e. Mikrokontroler yang digunakan adalah AT89S51.
- f. Pembahasan tentang mikrokontroler dibatasi hanya yang berkaitan dengan tugas akhir ini secara langsung.
- g. Pembahasan harmonisa hanya pada sisi output inverter dan sampai harmonisa ke-20 saja
- h. Pengaturan kecepatan dilakukan pada saat motor tidak dibebani (beban nol) dengan pengoperasian terpisah untuk masing-masing frekuensi.
- i. Tidak dibahas mengenai kondisi *starting*, *stopping* dan *braking*
- j. Komponen dan rangkaian elektronika yang digunakan hanya dibahas pada fungsi kerjanya.
- k. Tidak dibahas mengenai blok penyearah (*rectifier*) yang digunakan.

II. DASAR TEORI

2.1 MOSFET

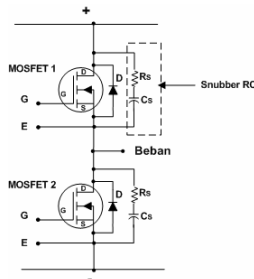
MOSFET merupakan singkatan dari *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* dan bahan-bahan penyusunnya terdiri dari logam, oksida dan semikonduktor. MOSFET dibuat dengan meletakkan lapisan oksida pada semikonduktor dari tipe NPN maupun PNP dan lapisan logam diletakkan di atasnya. Gambar 2.1 memperlihatkan konfigurasi dasar dari MOSFET yang terdiri dari 3 buah kaki yaitu *gate, drain, source*.



Gambar 2.1 Konfigurasi dasar MOSFET^[2]

2.1.1 Rangkaian Pelindung MOSFET

Pada operasi *switching*/pensaklaran inverter, MOSFET membutuhkan suatu rangkaian pelindung yang disebut *snubber*^{[8][9]}. Pada tugas akhir ini digunakan *snubber RC*^{[8][9]} yaitu sebuah rangkaian *snubber* yang terdiri dari sebuah resistor murni dihubungkan seri dengan kapasitor mika. Rangkaian *snubber RC* ini dapat dilihat pada gambar 2.2 di bawah ini :



Gambar 2.2 Rangkaian *snubber RC*^{[8][9]}

Komponen-komponen *snubber* dapat dicari dengan persamaan 2.1 dan 2.2 dibawah ini^[9] :

$$R_s = \frac{V_o}{I} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$C_s = \frac{P_s}{V_o^2 \times f_s} \dots\dots\dots (2.2)$$

dimana :

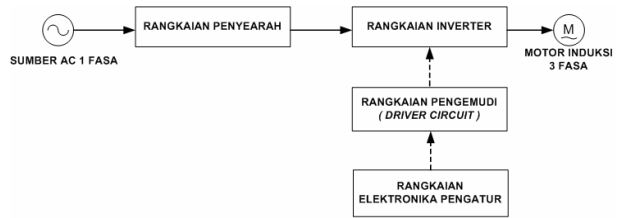
- R_s = resistor *snubber*
- V_o = tegangan DC inverter
- I = arus inverter
- C_s = kapasitor *snubber*
- P_s = daya resistor *snubber*
- f_s = frekuensi

2.2 Inverter Tiga Fasa

Inverter^[2] adalah suatu alat yang berfungsi merubah tegangan searah (DC) menjadi tegangan bolak-balik (AC), dimana besar tegangan dan frekuensi keluarannya dapat diatur. Besar frekuensi dilakukan dengan mengatur periode gelombang keluaran. Seperti pada persamaan 2.3 berikut ini

$$f = \frac{1}{T} (Hz) \dots\dots\dots (2.3)$$

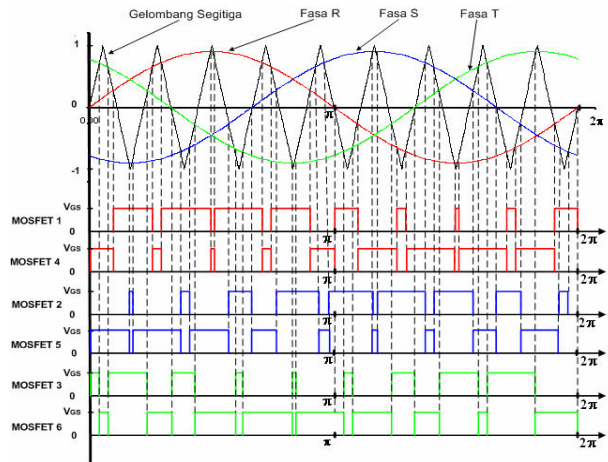
Gambar 2.3 berikut menunjukkan mekanisme dari inverter 3 fasa dalam tugas akhir ini.



Gambar 2.3 Mekanisme Inverter 3 Fasa

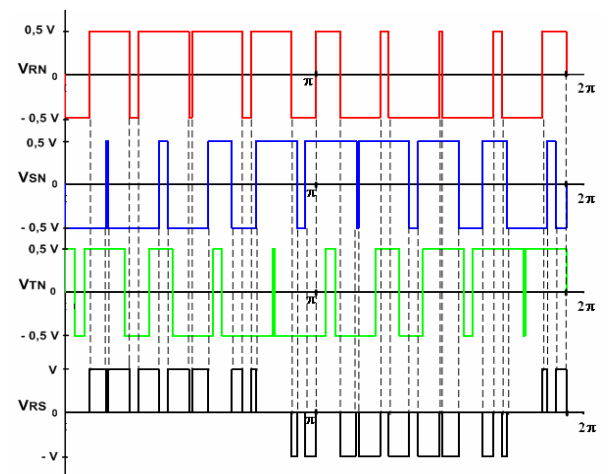
2.2.1 Inverter SPWM (*Sinusoidal Pulse Width Modulation*)^{[10][11][12]}

SPWM adalah suatu metode yang digunakan untuk menentukan sudut pemicuan dengan cara membandingkan gelombang segitiga dengan 3 gelombang sinus (fasa R, fasa S, dan fasa T) yang masing-masing berbeda fasa 120°, seperti ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Pemicuan gelombang SPWM

Setelah didapatkan titik potong antara gelombang segitiga dan tiga gelombang sinus (R, S, dan T), maka di tiap titik dilakukan pemicuan secara bergantian antara MOSFET sisi atas dan bawah sampai satu periode. Sedangkan tegangan pemicuan dapat dilihat dari gambar 2.5 di bawah ini :



Gambar 2.5 Tegangan fasa-netral dan tegangan fasa-fasa

Tegangan V_{RN} , V_{SN} , dan V_{TN} adalah tegangan fasa ke netral yang merupakan hasil pemicuan MOSFET sisi atas dan MOSFET sisi bawah, sedangkan tegangan antar fasa merupakan selisih antara tegangan dua fasa yang berbeda.

2.3 Mikrokontroler AT89S51

Mikrokontroler ini mempunyai spesifikasi sebagai berikut: 4 kbytes *flash memory*, *in system programming (ISP)*, 32 I/O yang dapat diprogram, 128 x 8 bit RAM internal, 2 buah timer/counter 16 bit, 6 sumber interupsi, *watchdog timer* dan *dual DPTR*.

Mikrokontroler berfungsi untuk mengatur keseluruhan proses pemicuan inverter dan sebagai alat ukur kecepatan putar motor (*tachometer*).

2.4 Motor Induksi Tiga Fasa

Dari karakteristik motor induksi tiga fasa dimana frekuensi (f) berbanding lurus dengan kecepatan medan putar (N) sesuai persamaan 2.4 berikut ini :

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{P} \dots \dots \dots (2.4)$$

dimana :

- n_s = kecepatan sinkron (rpm)
- f = frekuensi (Hz)
- P = Jumlah kutub

Kecepatan medan putar setelah diperhitungkan dengan slip (s) yang terjadi akan menjadi kecepatan putar rotor sesuai persamaan 2.5 berikut ini

$$n = (1 - s)n_s \dots \dots \dots (2.5)$$

dimana :

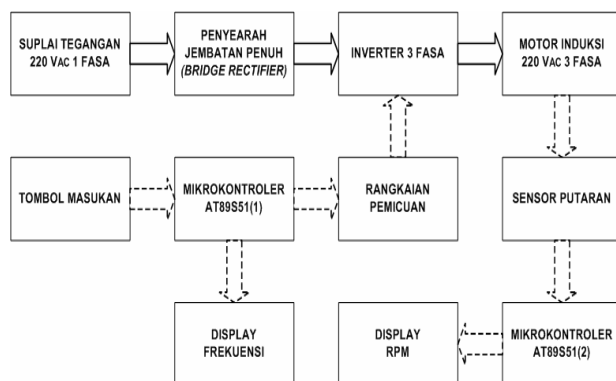
- s = slip
- n_s = kecepatan sinkron [putaran/menit]
- n = Kecepatan *rotor*

Dari persamaan 2.4 dan 2.5 diatas menunjukkan bahwa pengaturan kecepatan motor induksi dapat dilakukan dengan merubah frekuensi *supply* atau merubah jumlah kutub.

III. PERANCANGAN DAN PEMBUATAN ALAT

3.1 Perancangan Perangkat Keras

Peralatan dalam tugas akhir adalah berupa modul inverter 3 fasa dengan metode pemicuan SPWM^{[10] [11] [12]} yang digunakan untuk mengatur kecepatan motor induksi 3 fasa melalui variasi frekuensi dan dirancang menjadi blok-blok sebagai berikut :



Gambar 3.1 Diagram blok perancangan alat

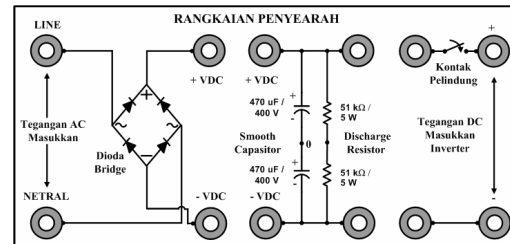
Tiap-tiap blok tersebut diatas diwujudkan/digambarkan berupa layout komponen/symbol yang mewakili fungsi kerjanya dan diletakkan di atas modul.

3.1.1 Suplai Tegangan AC 1 Fasa

Suplai tegangan ac 1 fasa berasal dari tegangan jala-jala PLN 220 V dan frekuensi sumber 50 Hz.

3.1.2 Penyearah Jembatan Penuh

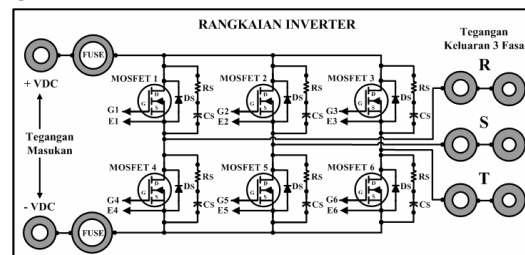
Pada tugas akhir ini menggunakan penyearah gelombang penuh dengan menggunakan dioda jembatan (*bridge*) dan sisi keluarannya dihubung paralel dengan 2 buah kapasitor bipolar 470 μ F/400 V yang masing-masing dihubung seri dan 2 buah resistor 51 kW/5 W yang masing-masing dihubung seri pula. Kapasitor ini digunakan supaya hasil tegangan dc lebih besar dan halus sedangkan resistornya digunakan untuk membuang muatan yang ada dalam 2 kapasitor tersebut apabila sistem dalam keadaan berhenti. Dan untuk pengamanannya digunakan sebuah kontak dari kontaktor. Symbol untuk rangkaian diatas dapat ditunjukkan gambar 3.2 sebagai berikut :



Gambar 3.2 Symbol rangkaian penyearah

3.1.3 Inverter 3 Fasa

Inverter 3 fasa dirancang menggunakan 6 buah MOSFET, dimana masing-masing fasa menggunakan 2 buah MOSFET. Masing-masing MOSFET dilindungi oleh sebuah diode daya yang dipasang anti parallel dan sebuah rangkaian *snubber RC*^{[8] [9]}. Symbol dari inverter 3 fasa dapat dilihat dari gambar 3.3 dibawah ini :



Gambar 3.3 Symbol rangkaian inverter 3 fasa

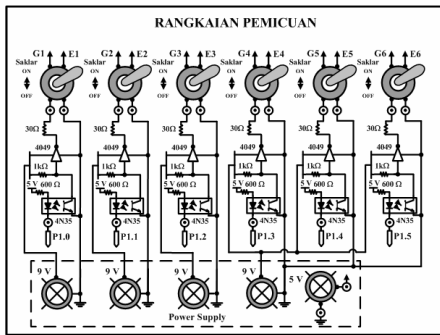
MOSFET dalam tugas akhir ini menggunakan seri IRFP460 buatan IR yang memiliki Tegangan *Drain-Source* 500 V dan Arus *Drain* 20 A. Komponen *snubber RC* dapat dicari dengan persamaan 2.1 dan 2.2. Dalam sistem ini, inverter beroperasi pada tegangan masukan maksimal 500 Vdc dan arus nominal 4 Ampere serta penghitungan pada saat frekuensi 50 hz. Sehingga didapatkan :

$$R_s = \frac{V_o}{I} = \frac{500}{4} = 125 \Omega / 10 W$$

$$C_s = \frac{P_s}{V_o^2 \times f_s} = \frac{10}{500^2 \times 50} = 0,8 \mu F$$

3.1.4 Rangkaian Pemicuan

Rangkaian pemicuan untuk inverter gambar 3.3 diatas dapat ditunjukkan pada gambar 3.4 di bawah ini



Gambar 3.4 Simbol rangkaian pemicuan inverter

3.1.5 Tombol Masukan, Display RPM, dan Display Frekuensi

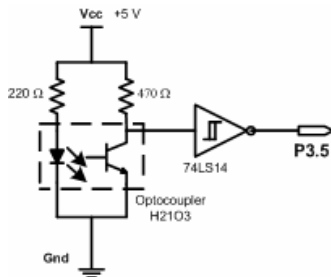
Blok disini terdapat beberapa layout komponen yang terdiri dari 2 bagian penting yaitu yang pertama 5 tombol pengatur untuk inverter serta yang kedua indikator kerja dari inverter berupa lampu LED, display rpm, dan display frekuensi inverter yang masing-masing berupa tampilan *sevensegment*.

3.1.6 Mikrokontroler 1 dan 2

Pada modul ini digunakan 2 buah Mikrokontroler yang masing-masing bekerja secara terpisah dan dapat diprogram dengan mudah, mikrontroller 1 untuk mengontrol inverter sedangkan mikrontroller 2 untuk menampilkan kecepatan motor induksi (*tachometer*).

3.1.7 Sensor Putaran

Sensor putaran disini disebut *Tachometer* yang diperlihatkan pada gambar 3.5 di bawah ini :



Gambar 3.5 Rangkaian sensor untuk *tachometer*^[13]

Rangkaian sensor di atas untuk mendeteksi lubang pada piringan *disc* yang mempunyai 60 lubang. Keluaran dari sensor ini diteruskan ke mikrokontroler 2 pada port 3.5 untuk diolah menjadi data *tachometer*.

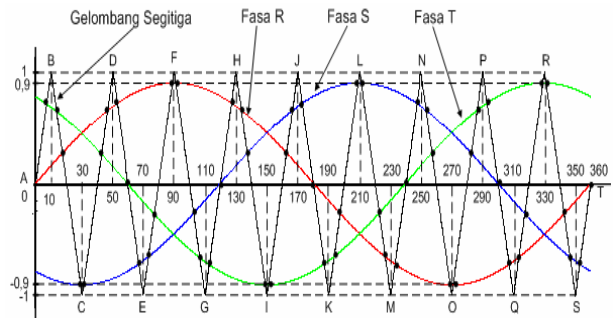
3.2 Perancangan Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)

Untuk mendapatkan pemicuan SPWM ada beberapa hal yang diperhatikan dalam perancangan pemicuan SPWM pada inverter tiga fasa adalah^{[11] [12]} :

1. Perbandingan frekuensi gelombang segitiga dan gelombang sinus (m_f) harus kelipatan 3 dan ganjil. Supaya masing-masing fasa mendapatkan pemicuan

yang sama dan memperoleh bentuk tegangan yang simetris serta untuk menghilangkan harmonisa genap.

2. Perbandingan antara amplitudo gelombang sinus dan gelombang segitiga (m_a) harus ≤ 1 untuk menjaga agar tidak terjadi *overmodulation*. *Overmodulation* adalah kondisi dimana amplitudo gelombang kontrol melebihi amplitudo gelombang segitiga.



Gambar 3.6 Perpotongan gelombang kontrol dan segitiga

Seperti gambar 3.6 di atas, pada tugas akhir ini diambil nilai $m_f=9$ (kelipatan 3 serta ganjil) dan $m_a=0,9$.

Adapun sudut pemicuan SPWM dapat dicari dari perpotongan antara gelombang segitiga dan gelombang kontrol masing-masing fasa.

Misal: garis AB

$$y_{AB} = mx + c \rightarrow A(0,0); B(10,1)$$

$$m = \frac{(y_B - y_A)}{(x_B - x_A)} = \frac{(1-0)}{(10-0)} = 0,1 \quad (x_B \text{ adalah } \frac{1}{36} \text{ bagian garis AT, AT}=360)$$

$$y_{AB} = 0,1x + c$$

misal titik uji di A(0,0), maka :

$$c = y_{AB} - 0,1x = 0 - 0 = 0; \text{ jadi : } y_{AB} = 0,1x$$

Dengan cara yang sama dapat diperoleh persamaan untuk garis-garis yang lainnya.

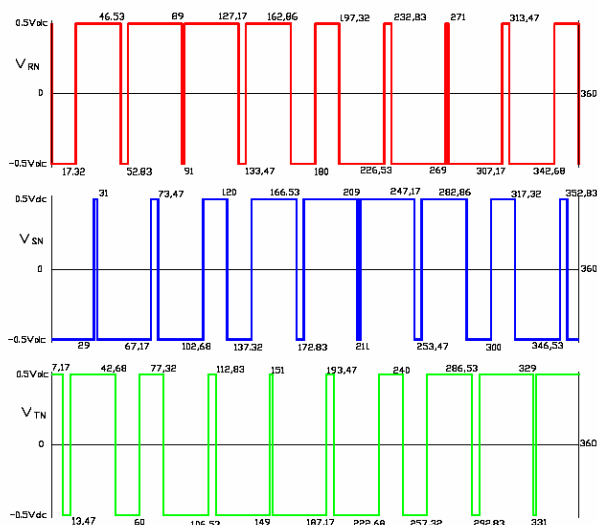
Selanjutnya persamaan-persamaan garis lurus ini dipotongkan dengan persamaan gelombang kontrol masing-masing fasa sehingga diperoleh nilai-nilai sudut pemicuan sebagai berikut

Tabel 3.1 Sudut pemicuan SPWM

PERSAMAAN GARIS	SUDUT PEMICUAN (x) (derajat)		
	FASA R $y = V_R$	FASA S $y = V_S$	FASA T $y = V_T$
$y_{AB} = y$	0	-	-
$y_{BC} = y$	17,32	29	7,17
$y_{CD} = y$	46,53	31	13,47
$y_{DE} = y$	52,83	67,17	42,68
$y_{EF} = y$	89	73,47	60
$y_{FG} = y$	91	102,7	77,32
$y_{GH} = y$	127,2	120	106,5
$y_{HI} = y$	133,5	137,3	112,8

$y_{IJ} = y$	162,7	166,5	149
$y_{JK} = y$	180	172,8	151
$y_{KL} = y$	197,3	209	187,2
$y_{LM} = y$	226,5	211	193,5
$y_{MN} = y$	232,8	247,2	222,7
$y_{NO} = y$	269	253,5	240
$y_{OP} = y$	271	282,7	257,3
$y_{PQ} = y$	307,2	300	286,5
$y_{QR} = y$	313,5	317,3	292,8
$y_{RS} = y$	342,7	346,5	329
$y_{ST} = y$	360	352,8	331

Setelah mendapatkan nilai dari sudut picu, gelombang dengan modulasi SPWM yang dihasilkan untuk masing-masing fasanya ditunjukkan pada gambar 3.7



Gambar 3.7 Sudut pemicuan masing-masing fasa

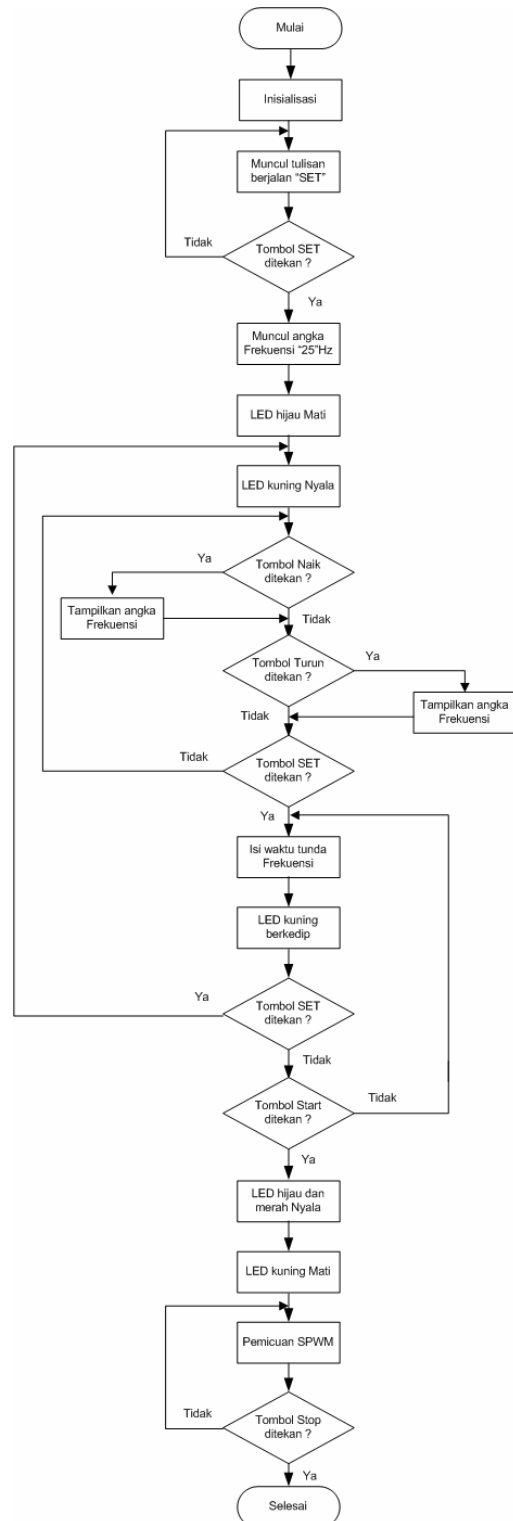
Hasil gelombang output antar fasa di atas sangat simetri yaitu dengan 18 pulsa setiap 1 periode (9 pulsa pada siklus positif dan 9 pulsa pada siklus negatif). Hal yang sama berlaku pula untuk tegangan antar fasa yang lain.

3.3 Perancangan Program

Pada subbab ini akan dikemukakan mengenai perancangan program yang nantinya diisikan ke dalam 2 mikrokontroller. Disini terdapat 2 macam program yaitu program utama untuk inverter dan program bantu untuk *tachometer*. Untuk mempermudah melakukan pemrograman pada mikrokontroller, terlebih dahulu dibuat *flowchart* dari perancangan program.

3.3.1 Program Utama

Program utama adalah program inverter yang diisikan ke mikrokontroller 1 dimana berfungsi untuk mengatur seluruh proses inverter.



Gambar 3.8 Flowchart program utama

3.3.2 Program Bantu

Program bantu adalah program *tachometer* yang diisikan ke mikrokontroller 2 dimana berfungsi untuk menampilkan kecepatan motor. Adapun *flowchart* programnya adalah sebagai berikut



Gambar 3.9 Flowchart program untuk tachometer

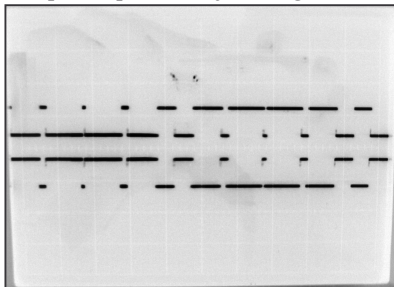
IV. PENGUJIAN DAN ANALISIS

Pengujian dan pengukuran modul inverter *sinusoidal pulse width modulation* yang bertujuan mengatur kecepatan motor induksi 3 fasa ini meliputi:

1. Pengujian sinyal pemucuan
2. Pengujian output inverter
3. Pengujian kecepatan
4. Pengukuran harmonisa

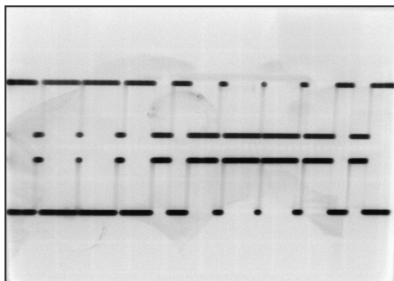
4.1 Pengujian Sinyal Pemucuan

Sinyal pemucuan SPWM dari port 1 mikrokontroller untuk memicu *optocoupler* ditunjukkan gambar 4.1



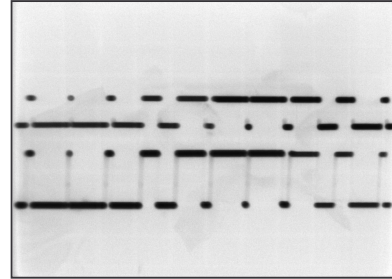
Gambar 4.1 Sinyal pemucuan SPWM dari mikro pada frekuensi 50 hz

Pada gambar 4.1 terlihat bahwa sinyal yang dihasilkan oleh mikrokontroller untuk memicu *optocoupler* sisi atas dan sisi bawah saling berlawanan.



Gambar 4.2 Sinyal pemucuan SPWM dari *optocoupler* pada frekuensi 50 hz

Pada gambar 4.2 bentuk sinyal pemucuan sama dengan gambar 4.1, hanya saja beda tegangan. Untuk membandingkan langsung sinyal pemucuan dari mikrokontroller dan *optocoupler* dapat ditunjukkan dengan gambar 4.3

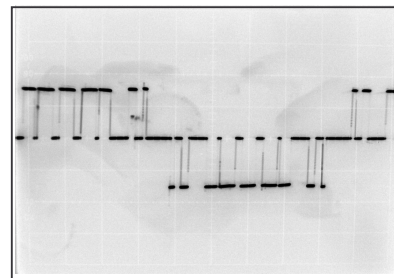


Gambar 4.3 Sinyal pemucuan SPWM dari mikrokontroller (gambar atas) dan sinyal pemucuan dari *optocoupler* (gambar bawah) pada frekuensi 50 hz

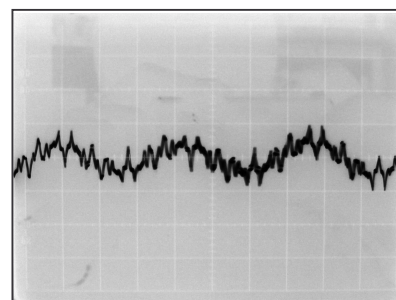
Ketiga gambar di atas diambil dari gambar Oscilloscope dengan *setting* 5volt/div dan 2ms/div.

4.2 Pengujian Output Inverter

Pengujian output inverter meliputi pengujian dan pengukuran tegangan, arus, serta $\cos \phi$ pada masing-masing frekuensi ketika terbebani oleh motor induksi 3 fasa terhubung segitiga. Dari pengujian tegangan dan arus dengan menggunakan Oscilloscope diperoleh gambar berikut :



Gambar 4.4 Tegangan antar fasa (R-S) pada frekuensi 50 Hz



Gambar 4.5 Arus fasa R pada frekuensi 50 Hz

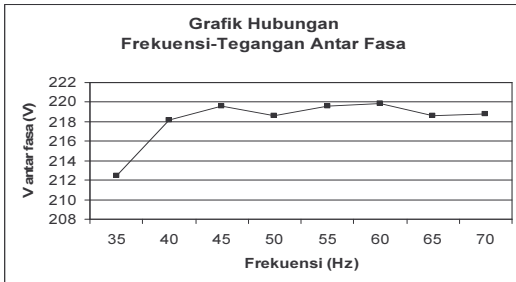
Dari gambar 4.4 di atas terlihat bahwa setiap periode terdiri dari 18 pulsa SPWM. Untuk gambar 4.4 digunakan setting 5volt/div dan 2ms/div, sedangkan gambar 4.5 yang berupa arus fasa R di setting 5volt/div dan 5ms/div.

Selain pengujian bentuk gelombang menggunakan oscilloscope, juga dilakukan pengukuran terhadap tegangan input (V_{IN}), arus input (I_{IN}), tegangan antar fasa (V_{RS} , V_{ST} , V_{TR}), arus fasa (I_R , I_S , I_T), dan $\cos \phi$ yang ditunjukkan pada tabel 4.1 berikut ini

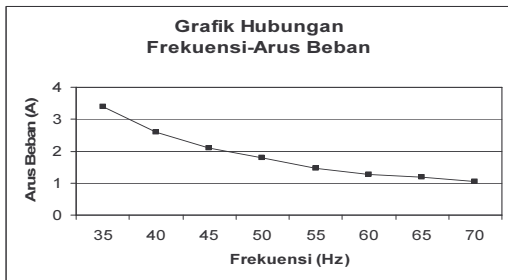
Tabel 4.1 Data pengukuran tegangan, arus dan cos ϕ

f Hz	V _{IN} (V _{ac})	I _{IN} (A _{ac})	Tegangan Antar Fasa (V _{ac})			Arus Fasa (A _{ac})			Cos ϕ
			V _{RS}	V _{ST}	V _{TR}	I _R	I _S	I _T	
35	308,3	1,89	213,9	212,9	212,5	3,54	3,55	3,40	0,277
40	313,8	1,42	217,8	216,0	218,2	2,68	2,67	2,59	0,269
45	317,1	1,13	219,0	219,2	219,6	2,13	2,12	2,10	0,237
50	317,1	0,94	219,7	219,8	220,5	1,90	1,80	1,79	0,234
55	317,3	0,84	220,8	219,6	219,6	1,62	1,63	1,45	0,195
60	318,6	0,69	218,2	217,0	219,9	1,37	1,32	1,28	0,227
65	317,9	0,61	218,1	218,3	218,6	1,22	1,20	1,18	0,254
70	318,8	0,54	217,1	218,0	218,8	1,08	1,07	1,05	0,263

Hubungan komponen tersebut dapat diperlihatkan oleh gambar grafik di bawah ini :



Gambar 4.6 Grafik antara frekuensi dan Tegangan antar fasa



Gambar 4.7 Grafik antara frekuensi dan arus beban

Dari gambar 4.6, dapat dijelaskan bahwa ketika frekuensi dinaikkan maka tegangan antar fasa akan naik tetapi kenaikannya cenderung berhenti dan konstan pada frekuensi 50 hz dan seterusnya. Ini dikarenakan adanya *base frequency*^[5] yaitu frekuensi dasar dari motor induksi. Untuk gambar 4.7 arus beban akan turun dengan kenaikan frekuensi, ini dikarenakan *Magnetic Flux*^[5] juga turun.

4.3 Pengujian Kecepatan

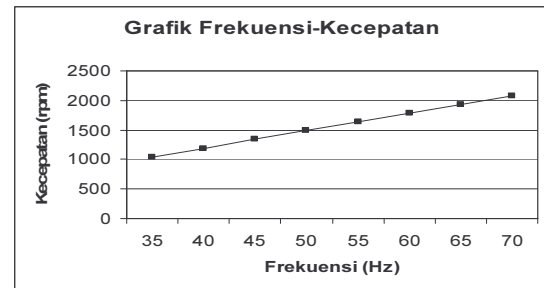
Pengujian kecepatan dilakukan pada kondisi motor tidak berbeban dengan menggunakan *tachometer* digital Lutron DT 2235B dan *tachometer* yang dimiliki oleh modul.

Tabel 4.2 Data pengukuran kecepatan

f (Hz)	Kec. Sinkron (n _s)	Kecepatan Rotor (n)		Slip (s)
		DT 2235B	Dgn. Mikro	
35	1050	1044	1045	0,005

40	1200	1192	1195	0,004
45	1350	1340	1345	0,004
50	1500	1490	1490	0,007
55	1650	1639	1640	0,006
60	1800	1787	1788	0,007
65	1950	1934	1934	0,008
70	2100	2083	2085	0,007

Adapun grafik hubungan antara frekuensi dan kecepatan putar rotor ditunjukkan pada gambar 4.8 di bawah ini



Gambar 4.8 Grafik antara frekuensi dan kecepatan

Dari gambar grafik di atas dapat ditarik kesimpulan bahwa terbukti pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa dapat dilakukan dengan merubah frekuensi yang masuk ke dalam motor induksi. Hal ini juga sesuai dengan perhitungan dari persamaan 2.4.

4.4 Pengukuran Harmonisa

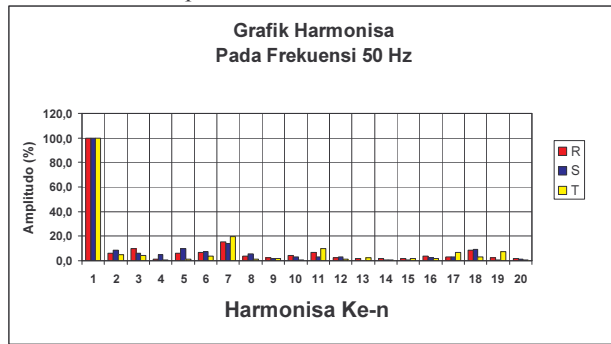
Sedangkan dari pengukuran menggunakan alat ukur digital HIOKI 3286-20 diperoleh data seperti berikut

Tabel 4.3 Data pengukuran harmonisa arus

Har Ke	Parameter	R	S	T	Har Ke-	Parameter	R	S	T
1	(A)	0,52	0,23	0,65	11	(A)	0,03	0,00	0,06
	%	100	100	100		%	6,6	3,3	9,9
2	(A)	0,03	0,02	0,03	12	(A)	0,01	0,00	0,00
	%	6,1	8,6	4,6		%	2,4	3,3	1,3
3	(A)	0,05	0,01	0,03	13	(A)	0,01	0,00	0,02
	%	9,9	6,3	4,3		%	2,0	0,1	2,5
4	(A)	0,00	0,01	0,00	14	(A)	0,00	0,00	0,00
	%	1,4	5,0	0,9		%	1,7	0,6	0,9
5	(A)	0,03	0,02	0,00	15	(A)	0,00	0,00	0,01
	%	6,1	9,7	1,4		%	1,7	0,7	1,9
6	(A)	0,04	0,02	0,02	16	(A)	0,02	0,00	0,01
	%	6,9	7,1	3,5		%	3,8	2,5	1,7
7	(A)	0,08	0,03	0,12	17	(A)	0,01	0,00	0,05
	%	15,1	13,8	18,7		%	2,8	3,1	7,0
8	(A)	0,02	0,01	0,00	18	(A)	0,04	0,02	0,02
	%	3,6	5,6	1,2		%	8,5	9,1	3,3
9	(A)	0,01	0,00	0,01	19	(A)	0,01	0,00	0,05
	%	2,2	1,7	1,7		%	2,3	0,6	7,4
10	(A)	0,02	0,00	0,00	20	(A)	0,01	0,00	0,00
	%	4,3	3,0	0,4		%	2,1	1,0	0,9
THD(%)							24,7	24,1	24,4

Pengukuran yang dilakukan menggunakan HIOKI 3286-20 hanya dilakukan sampai harmonisa ke-20 dan pada frekuensi

dasar 50 Hz saja. Dan dari data ini dapat dibuat spektrum harmonisa arus seperti berikut



Gambar 4.9 Spektrum harmonisa hasil pengukuran

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari hasil pengujian dan analisa tugas akhir dengan judul Pembuatan Modul Inverter 3 Fasa *Sinusoidal Pulse Width Modulation* sebagai pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa terhubung segitiga 220 volt maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Modulasi lebar pulsa sinus dihasilkan dengan memotongkan gelombang segitiga dan gelombang sinus, dimana amplitudo gelombang segitiga lebih besar dari gelombang sinus dengan perbandingan 0,9 dan menggunakan 18 pulsa pemicuan dalam satu periode.
2. Mikrokontroler AT89S51 *optocoupler* 4N35 dapat digunakan dengan baik untuk proses pemicuan 6 buah MOSFET pada inverter tiga fasa menggunakan modulasi sinus.
3. Sinyal pemicuan yang dihasilkan mikrokontroler dengan *optocoupler* hasilnya sama karena menggunakan ic hex inverter 4049.
4. Modul yang telah dibuat dapat digunakan untuk pengaturan kecepatan motor induksi dari kecepatan sekitar 1045 rpm pada frekuensi 35 hz sampai sekitar 2085 rpm pada frekuensi 70 hz.
5. Pengaturan kecepatan dilakukan dengan mengatur frekuensi inverter, semakin kecil frekuensi maka kecepatan putar motor akan menurun dan semakin besar frekuensi maka kecepatan putar motor akan meningkat.

5.2. Saran

1. *Optocoupler* yang digunakan sebaiknya dipilih yang memiliki karakteristik waktu tunda yang kecil sehingga akan mengurangi cacat gelombang yang terjadi.
2. Pengembangan tugas akhir ini dapat dilakukan untuk kondisi motor berbeban dengan menggunakan sistem umpan balik kecepatan.
3. Pengembangan tugas akhir ini dapat dilakukan dengan membuat perbandingan gelombang segitiga dan gelombang sinus diperbesar ataupun diperkecil dari 0,9
4. Untuk tegangan masukkan inverter supaya dapat dikontrol juga, sehingga dapat dianalisa torsi motornya.
5. Alat ini dapat dikembangkan dengan menambah filter harmonisa pada sisi outputnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1], *Power MOSFET*, Philips Semiconductor.
- [2] Lukman Hakim, Agung Warsito, Mochammad Facta,” “ Laporan TA Jurusan Teknik Elektro FT Undip, 2001.
- [3] <http://www.irf.com>.
- [4] Paulus Wijayacitra, *Buku Data IC Catu Daya*, Elex Media Komputindo, 1996
- [5], *FATEC Inverter Appication Course*, Mitsubishi Electric.
- [6], *Topology: Three phase*, Internet
- [7] M. Rashid, *Power Electronics Circuit, Device, and Application 2nd*, Prentice-Hall International Inc, 1988.
- [8] Rudy Severns, *Design Of Snubbers For Power Circuits*, Internet
- [9] Cornel Dubilier, *Designing an RC Snubber*, Internet
- [10] A.M. Gole, *Sinusoidal Pulse width modulation*, Power Electronics, Internet, 2000
- [11] Dr. Zainal Salam, *Power Electronics and Drives*, FKE, UTM Skudai, Johor Baru, 2002
- [12] Dr. Zainal Salam, *Power Electronics and Drives (Version 2)*, Internet, 2002
- [13] Andi Hartono, Agung Warsito, Mochammad Facta,” *Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Dengan Inverter Sinusoidal Pulse Wide Modulaton* “ Laporan TA Jurusan Teknik Elektro FT Undip, 2004.
- [14] Agfianto Eko Putra, *Belajar Mikrokontroler AT89C51/52/55 (teori dan aplikasi)*, Penerbit Gava Media, 2002.
- [15] B.L. Theraja, *Electrical Technology*, Nirja



Sardiyanto

Lahir dan besar di Semarang, Jawa Tengah. Setelah lulus D-III POLINES 2001 jurusan Teknik Elektro program studi Teknik Listrik, melanjutkan studi di Teknik Elektro Universitas Diponegoro dengan konsentrasi Ketenagalistrikan.

Mengetahui / Mengesahkan :
Dosen Pembimbing

Pembimbing I

Pembimbing II

Ir Agung Warsito, DHET
NIP 131 668 485

Mochammad Facta, ST. MT
NIP. 132 231 134