

INVERTER MULTI LEVEL TIPE JEMBATAN SATU FASA TIGA TINGKAT DENGAN MIKROKONTROLER AT89S51

A. Warsito, M. Facta, E. Aptono. T.Y *)

Abstract

Inverter is a power electronics circuit which is used to convert DC voltage and current to AC voltage and current. In conventional inverter, most commonly used, only has three level voltage, those are +Vdc, -Vdc, and zero. Meanwhile both square inverters and SWPM inverter has big harmonic distortion. In SPWM inverter scheme, high frequency switching must be used to minimize total harmonic distortion (THD). Multi level inverter is a type of inverter that has more than one level of voltage and current output.

The major advantages of multi level inverters are a good voltage waveform, small harmonic dirtortion, switching component operated under low frequency, and it can supply a big power.

This paper will discuse the construction of single phase three level multi level inverters, hardware testing include output waveform THD, and the comparisson of multilevel inverter with other conventional inverters scheme suc as PWM inverters modulation, and square waveform inverter. Atmel's AT89S51 microcontroller used to control switching scheme in this multi level inverter. By this power electronic circuit, it is expected a low cost and reliable multi level inverters prototipe.

Keywords: inverters, multi level inverters, PWM, harmonics, THD, microcontroller.

Pendahuluan

Penggunaan inverter sebagai peralatan elektronika daya sangat luas. Inverter konvensional yang paling sederhana mempunyai output berupa gelombang kotak, sedikit lebih kompleks menggunakan teknik SPWM (*Sinusoidal Pulse Wide Modulation*) sebagai kontrol *switching* komponen semikonduktor (MOSFET). Inverter konvensional gelombang kotak maupun SPWM hanya mempunyai tiga level tegangan yaitu; +Vdc, -Vdc, dan nol.

Penggunaan teknik SPWM maupun gelombang kotak biasa pada pengontrolan *switching* inverter konvensional menghasilkan bentuk gelombang yang kurang baik se-hingga mempunyai distorsi harmonisa yang cukup besar. Pada Inverter jenis SPWM bentuk gelombang keluaran sangat dipengaruhi oleh frekuensi *switching* komponen semikonduktor. Semakin tinggi frekuensi *switching* komponen semikonduktor, maka bentuk gelombang semakin mendekati *sinusoidal*.

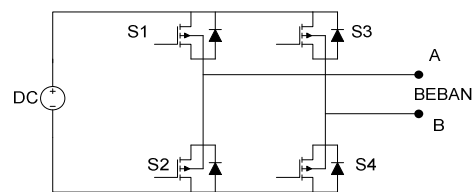
Inverter multi level pada dasarnya merupakan inverter konvensional (tiga level tegangan) seperti halnya inverter gelombang kotak maupun SPWM yang disusun secara bertingkat (*cascade*)^[12]. Bentuk gelombang yang diha-silkan inverter multi-level berupa gelombang tangga atau *staircase*. Dengan inverter multi level diperoleh bentuk gelombang yang baik, semakin banyak level tegangan yang

dihasilkan maka semakin baik pula bentuk gelombang keluaran. Pada inverter multi level tidak diperlukan frekuensi *switching* yang tinggi untuk meng-hasilkan bentuk gelombang sinusoidal.

Dasar Teori

1. Inverter

Inverter merupakan peralatan elektronika daya yang dapat mengkonversi besaran listrik DC (searah) menjadi besaran listrik AC (bolak-balik)^[11]. Salah satu jenis konfigurasi inverter yang biasa digunakan adalah inverter jenis jembatan (*full bridge*). Inverter jenis ini adalah sederhana dan mudah dioperasikan. Rangkaian inverter ini dapat dilihat pada gambar 2.1 dibawah ini.



Gambar 2.1 Inverter tipe jembatan H^{[11][17]}

2. Inverter Multi Level

Pengertian inverter multi level^[2] adalah konverter yang mengubah besaran DC menjadi besaran AC dimana keluaran (*output*) yang dihasilkan mempunyai beberapa (lebih dari dua) level tegangan atau arus.

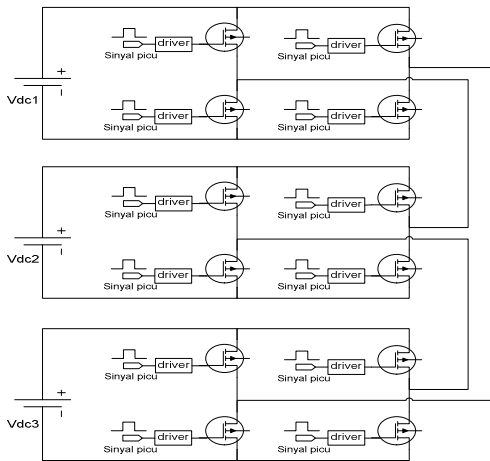
*) Staf Pengajar Jurusan T. Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro

Secara umum terdapat tiga tipe inverter multi level, antara lain^{[12][16]}:

1. Inverter multi level tipe *Diode-clamped*.
2. Inverter multi level tipe *Flying capacitor*.
3. Inverter multi level tipe jembatan (*H-bridge*).

Pada makalah ini hanya membahas jenis inverter multi level tipe jembatan (*H-bridge*), karena inverter multi level jenis ini mempunyai kelebihan sebagai berikut :

1. konstruksi paling sederhana dibandingkan dengan tipe lain.
 2. mempunyai pengaturan yang sederhana.
- Gambar 2.2 menunjukkan struktur inverter multi level s-tingkat tipe jembatan (*H-bridge*).



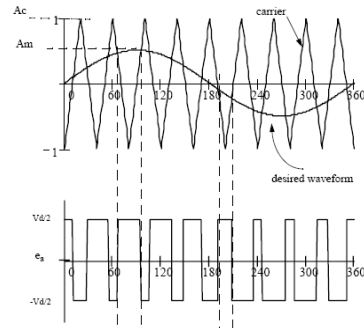
Gambar 2.2 Inverter multi level s-tingkat tipe jembatan-H (*H-bridge*)^[3]

Besar tegangan output pada inverter multi level ini adalah penjumlahan tegangan output inverter dari tiap tingkat.

$$V_{(output)} = \sum_{i=1}^p V_{aci} \dots\dots\dots (2.1)$$

p adalah jumlah inverter yang disusun secara bertingkat

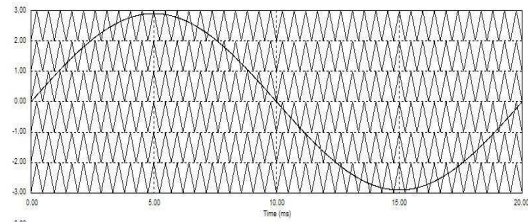
3. Teknik Modulasi Inverter SPWM (*Sinusoidal Pulse Wide Modulation*)^[5] adalah teknik modulasi yang paling umum digunakan untuk mengontrol komponen semikonduktor pada inverter. SPWM ini diperoleh dengan cara membandingkan gelombang *sinusoid* dengan gelombang *carrier* yang berupa gelombang segitiga.



Gambar 2.3 Prinsip dasar modulasi SPWM^[5]

4. Modulasi SPWM untuk inverter multi level Metode pensaklaran komponen semikonduktor pada inverter multi level inverter berbeda dengan inverter konvensional. Pengaturan inverter multi level sedikit lebih kompleks dari pada teknik SPWM biasa. Hal ini dilakukan agar diperoleh gelombang output yang lebih mendekati gelombang sinus, dan untuk mencegah terjadinya kerusakan pada komponen *switching* pada inverter itu sendiri.

Pada inverter multi level tipe jembatan-H, tiap-tiap tingkat inverter dimodulasi secara terpisah. Gambar 2.4 menunjukkan metoda modulasi untuk inverter multi level tipe jembatan.



Gambar 2.4 Modulasi SPWM untuk inverter multi level tiga tingkat^{[2][3]}

5. Harmonisa Komponen harmonisa adalah komponen gelombang sinusoidal yang memiliki frekuensi berupa kelipatan bilangan bulat dari frekuensi fundamentalnya. Pada inverter, gelombang output tidak berupa gelombang sinus murni, tetapi berupa gelombang sinus yang terdistorsi. Dalam gelombang yang terdistorsi terdapat komponen harmonisa.
6. Analisa deret Fourier^[1] Seorang matematikawan dan fisikawan Prancis, Joseph Fourier^[1] menyatakan bahwa suatu fungsi periodik dalam interval waktu tertentu dapat dinyatakan dalam penjumlahan komponen fundamentalnya dan komponen harmonisanya yang mempunyai frekuensi kelipatan bilangan bulat dari frekuensi komponen harmonisa.

Deret Fourier dari fungsi periodik adalah sebagai berikut :

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \{a_h \cos(h\omega_0 t) + b_h \sin(h\omega_0 t)\} \dots\dots\dots(2.2)$$

7. Total Harmonic Distortion (THD)

Total Harmonic Distortion atau biasa dengan disingkat THD didefinisikan sebagai rasio perbandingan antara nilai komponen harmonisa dengan nilai komponen fundamental. THD menyatakan besarnya distorsi atau deviasi suatu gelombang yang mengandung komponen harmonisa^[1]. THD dinyatakan dalam persen. THD tegangan dan arus dirumuskan sebagai berikut^{[1],[13]}:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \dots\dots\dots(2.3)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \dots\dots\dots(2.4)$$

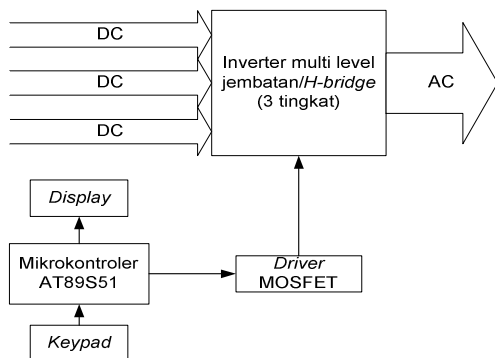
8. Mikrokontroler AT89S51

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 pada makalah ini digunakan untuk mengatur keseluruhan proses pemicuan inverter.

Perancangan dan Pembuatan Alat

1. Perancangan perangkat keras

Gambaran dari rangkaian dasar perancangan inverter multi level tipe jembatan H dapat dilihat pada gambar 3.1 berikut.



Gambar 3.1 Diagram Blok inverter multi level tiga tingkat tipe jembatan.

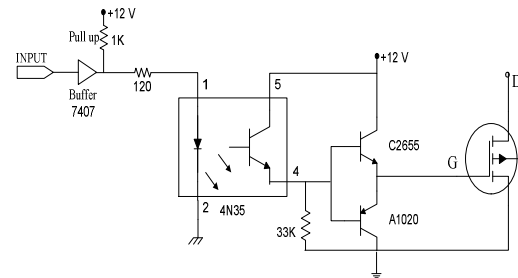
2. Inverter multi level tipe jembatan

Inverter multi level^[2] yang dirancang pada makalah ini terdiri dari tiga tingkat inverter tipe jembatan konvensional. Menggunakan

MOSFET IRFP 460 sebagai komponen pensaklarannya. Empat buah MOSFET dirangkai dengan susunan seperti pada inverter jembatan konvensional, terminal output tiap inverter disusun secara bertingkat (*cascade*) seperti terlihat pada gambar 2.2

3. Driver MOSFET

MOSFET IRF 460 mempunyai tegangan *threshold* sebesar 4 volt, dan akan bekerja optimal jika diberikan tegangan pada *gatenya* sebesar 10 volt^[18]. Sinyal pemicuan dari mikrokontroler AT89S51 hanya mampu memberikan sinyal picu sebesar Vcc 5 volt. Oleh karena itu diperlukan rangkaian *driver* untuk mengaktifkan MOSFET. Rangkaian *driver* juga berfungsi sebagai rangkaian isolasi atau pemisah antara tegangan rangkaian kontrol yang berupa tegangan rendah DC terhadap tegangan rangkaian daya.



Gambar 3.2 Rangkaian *driver* MOSFET

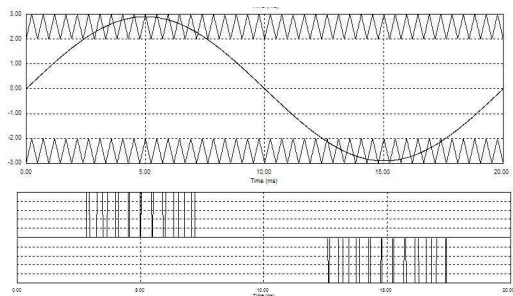
4. Perancangan *Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)* untuk inverter multi level.

Pada makalah ini digunakan enam buah gelombang segitiga sebagai gelombang *carrier* dengan indeks modulasi frekuensi $mf=42$. Untuk gelombang kontrol (sinus) dengan frekuensi 50 Hz, maka frekuensi gelombang *carrier* adalah :

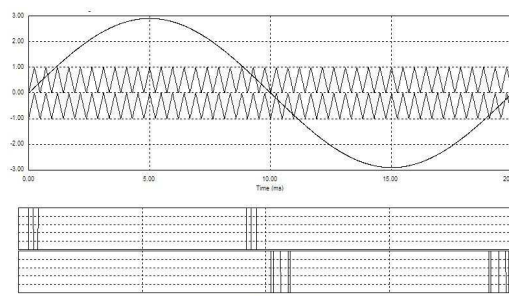
$$f_c = 42 \times 50 \text{ Hz}$$

$$f_c = 2100 \text{ Hz}$$

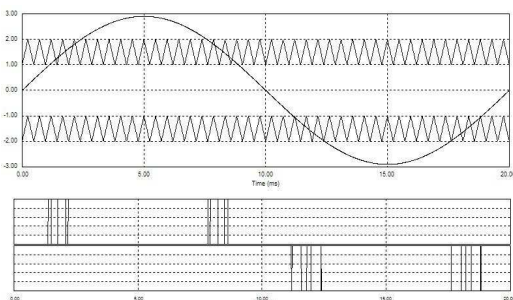
Perhitungan modulasi SPWM pada makalah ini menggunakan program PSIM versi 4.1 yang dikembangkan oleh *Powersim Technologies Inc*^[20]. Modulasi SPWM diperoleh dengan membandingkan sebuah gelombang sinusoid dengan enam buah gelombang segitiga. Sehingga didapatkan gelombang sinus dan gelombang segitiga seperti terlihat pada gambar 2.4. Modulasi SPWM untuk tiap tingkat pada inverter multi level dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 3.3 Modulasi SPWM pada inverter tingkat pertama

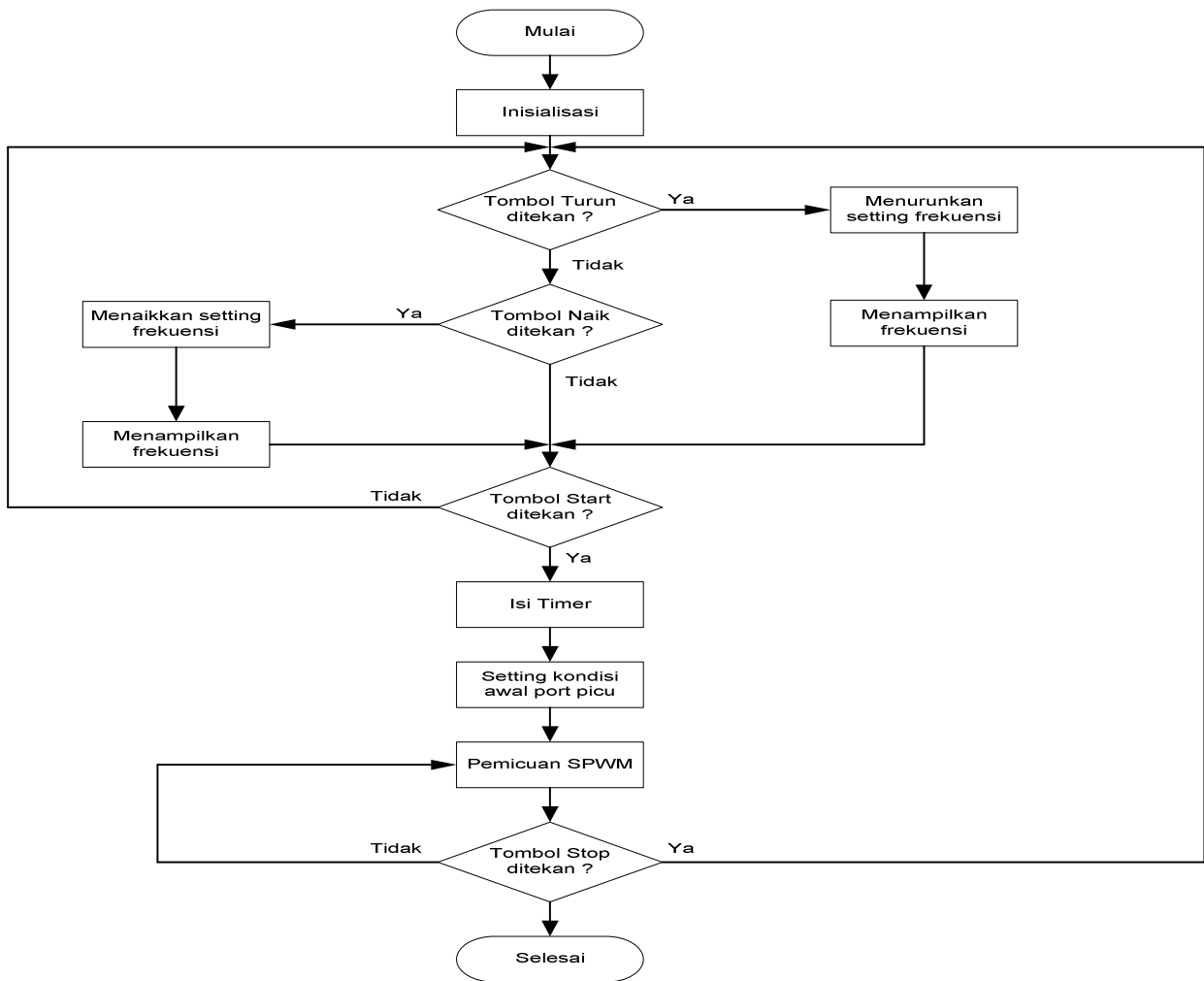


Gambar 3.5 Modulasi SPWM pada inverter tingkat ketiga



Gambar 3.4 Modulasi SPWM pada inverter tingkat kedua

Pada inverter tingkat 2 dan tingkat 3 ini terjadi overmodulasi pada sebagian gelombangnya sehingga terbentuk garis lurus saja pada bagian tengah belombang pemicuan



Gambar 3.6 Flowchart program utama

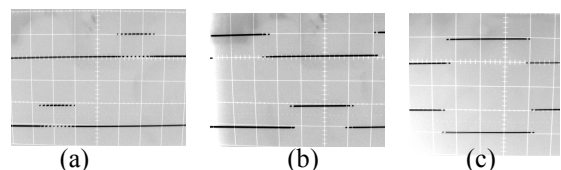
5. Perancangan Perangkat Lunak (Program Mikrokontroler)

Secara garis besar dalam program pemicuan inverter multi level ini terdiri dari tiga bagian utama, yaitu bagian pemicuan SPWM, bagian tampilan *seven segment*, dan bagian penyapuan keypad. Flowchart dari program pemicuan MOSFET pada inverter multi level dapat dilihat pada gambar 3.6

Pengujian dan Analisa

1. Sinyal Pemicuan

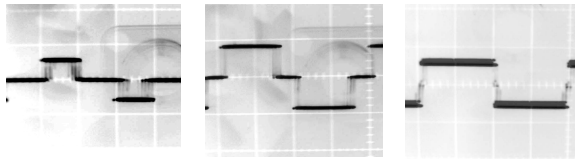
Sinyal pemicuan MOSFET merupakan sinyal PWM yang dihasilkan oleh port 0 mikrokontroler. Sinyal picu MOSFET untuk tiap tingkat inverter tidak sama. Sinyal picu untuk tiap inverter dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 4.1 Sinyal pemicuan (a) inverter tingkat 1 (b) inverter tingkat 2 (c) inverter tingkat 3

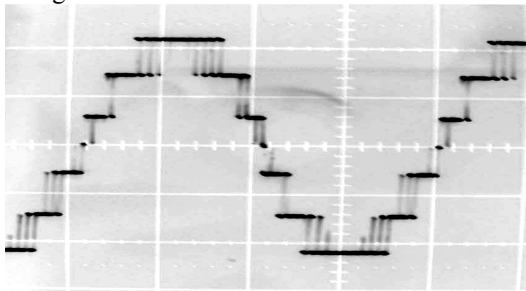
2. Output Inverter

Pengujian output inverter meliputi pengujian dan pengukuran tegangan, arus, serta harmonisa tegangan dan arus dengan variasi beban. Dari pengujian tegangan pada kondisi tanpa beban dengan menggunakan osiloskop diperoleh gambar seperti pada gambar 4.2.



(a) (b) (c)
 Gambar 4.2 Gelombang output tegangan tanpa beban inverter (a) tingkat 1 (b) tingkat 2 (c) tingkat 3

Ketiga gambar di atas adalah bentuk gelombang output tegangan pada tiap tingkat inverter pada inverter multi level. Gambar diambil saat ketiga inverter tersebut belum dihubungkan secara *casca-de* satu sama lain. Setelah ketiganya dihubungkan maka didapatkan bentuk gelombang pada beban sebagai berikut ini:

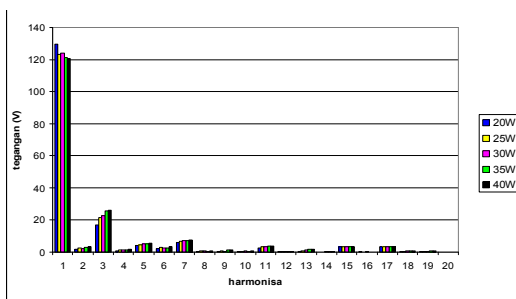


Gambar 4.3 Gelombang output tegangan tanpa beban inverter multi level

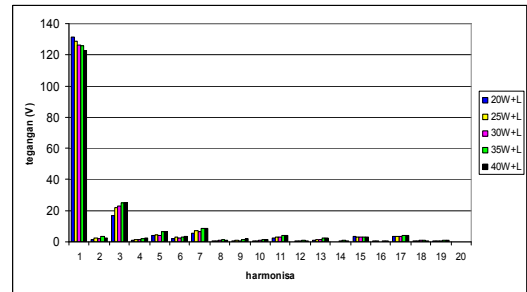
Dari gambar di atas terlihat bahwa bentuk gelombang output inverter multi level adalah resultan atau hasil penjumlahan dari output tegangan tiga buah inverter yang menyusunnya.

3. Pengujian Harmonisa

Analisa harmonisa dilakukan berdasarkan pengukuran alat ukur digital HIOKI 3286-20. sampai harmonisa ke-20 dan pada frekuensi dasar 50 Hz. Dari hasil pengukuran harmonisa gelombang output baik arus maupun tegangan dibuat grafik spektrum amplitudonya sebagai berikut:



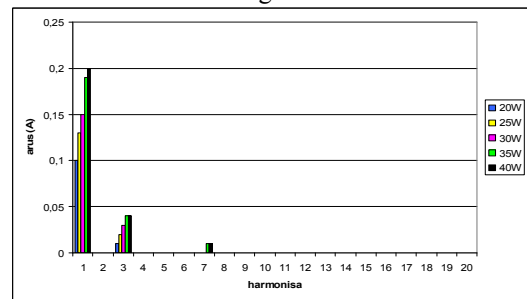
(a)



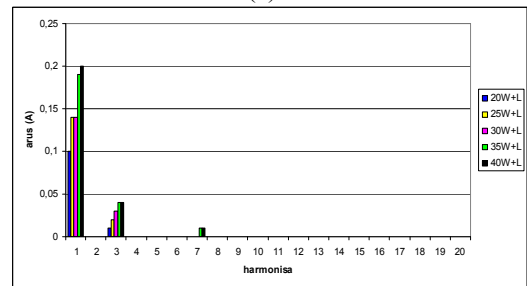
(b)

Gambar 4.4 Spektrum harmonisa tegangan hasil pengukuran (a) beban R (b) beban R+L

Spektrum harmonisa arus untuk beban R dan beban R+L adalah sebagai berikut:



(a)

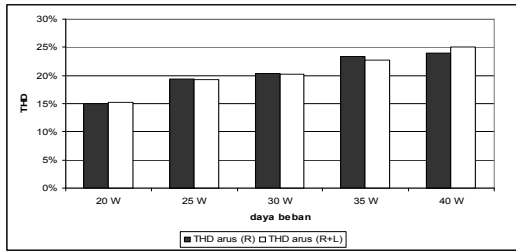


(b)

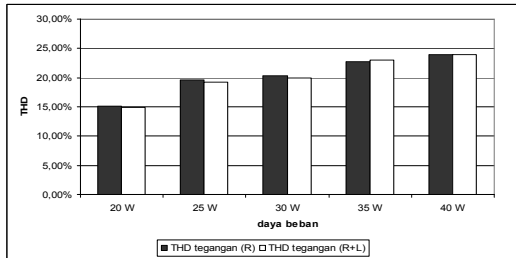
Gambar 4.5 Spektrum harmonisa arus hasil pengukuran dengan (a) beban R (b) beban R+L

Spektrum harmonisa tegangan maupun arus diatas terlihat bahwa terdapat beberapa kesamaan spektrum harmonisanya, baik pada beban R maupun beban R+L terdapat kecenderungan amplitudo yang semakin kecil untuk nilai harmonisa yang lebih tinggi. Pada kedua grafik juga terlihat bahwa komponen harmonisa ganjil lebih dominan daripada komponen harmonisa genapnya, hal ini disebabkan karena bentuk gelombang tegangan maupun arus output mempunyai simetri ganjil.

Berikut adalah grafik yang menunjukkan pengaruh penambahan beban terhadap THD gelombang output baik arus maupun tegangan.



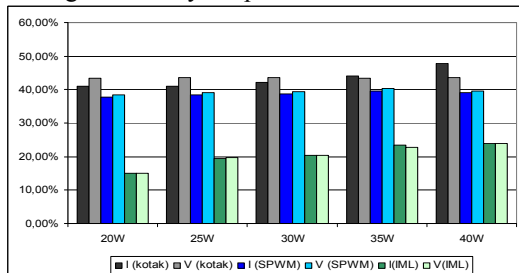
Gambar 4.6 Perbandingan THD arus untuk tiap variasi beban R dan beban R+L



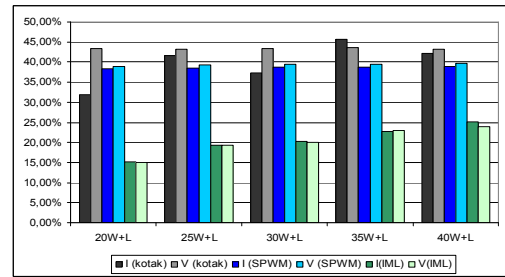
Gambar 4.7 Perbandingan THD tegangan untuk tiap variasi beban R dan beban R+L

THD tegangan maupun arus pada beban R maupun pada beban R+L mempunyai nilai yang dapat dikatakan sama. Semakin besar beban, maka nilai THD-nya semakin besar, hal ini terjadi karena penambahan beban menyebabkan berubahnya bentuk gelombang. Hal ini disebabkan oleh adanya pembagian beban yang tidak merata antara ketiga inverter yang disusun secara bertingkat. Penambahan L pada beban juga tidak begitu berpengaruh pada nilai THD, hal ini terlihat dari nilai THD yang tidak berbeda jauh dengan THD beban tanpa L.

Sebagai perbandingan, dilakukan pengukuran harmonisa pada inverter biasa dengan output gelombang kotak dan inverter SPWM. Grafik perbandingan THD-nya dapat dilihat sbb:



Gambar 4.8 Grafik perbandingan THD arus dan tegangan inverter multi level dengan inverter kotak beban R



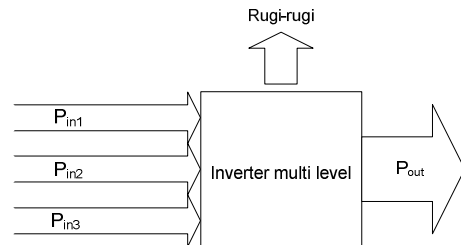
Gambar 4.9 Grafik perbandingan THD arus dan tegangan inverter multi level dengan inverter kotak beban R+L

Dari gambar di atas terlihat adanya perbedaan yang cukup mencolok antara THD inverter multi level (pada grafik disebut IML), dengan THD inverter konvensional kotak (pada grafik disebut kotak) dan THD inverter SPWM (pada grafik disebut SPWM). Perbedaan tersebut terjadi pada THD arus dan tegangan, tampak bahwa inverter kotak mempunyai nilai THD yang terbesar, kemudian diikuti oleh inverter SPWM dan inverter multi level mempunyai THD yang terkecil. Hal ini karena inverter multi level mempunyai bentuk gelombang output yang lebih mendekati sinusoid daripada inverter gelombang kotak maupun inverter modulasi SPWM.

4. Efisiensi

Efisiensi menggambarkan efektifitas konverter inverter multi level mengkonversikan besaran DC menjadi besaran AC. Aliran daya pada inverter multi level tiga tingkat ini dapat dilihat pada gambar 4.10.

$$\eta = \frac{V \times I \times \cos \phi}{P_{dc1} + P_{dc2} + P_{dc3}} \times 100\%$$



Gambar 4.10 Aliran daya pada inverter multi level jembatan tiga tingkat

Tabel 4.1 Perhitungan efisiensi inverter multi level beban R

Beban	INPUT (sisi DC)				P _{out}	Ef (%)
	P _{dc1}	P _{dc2}	P _{dc3}	P _{in}		
20	4,95	13,63	8,83	27,42	12,88	46,98
25	5,78	15,61	10,33	31,71	17,70	55,81
30	5,79	16,48	10,74	33,01	21,04	63,74
35	6,83	18,16	12,20	37,19	26,06	70,09
40	9,49	20,25	13,18	42,93	30,84	71,85

Tabel 4.2 Perhitungan efisiensi inverter multi level beban R+L

Beban	INPUT (sisi DC)				P _{out}	Eff (%)
	P _{dc1}	P _{dc2}	P _{dc3}	P _{in}		
20+L	6,97	19,35	12,58	38,9	14,69	37,76
25+L	8,76	23,99	15,73	48,48	18,21	37,56
30+L	8,36	24,31	15,70	48,37	21,05	43,51
35+L	9,39	25,34	17,04	51,77	28,01	54,09
40+L	13,09	28,38	18,43	59,9	30,85	51,51

Tampak dari kedua tabel bahwa inverter multi level tipe jembatan mempunyai efisiensi yang kecil. Hal ini disebabkan oleh banyaknya rugi-rugi switching pada MOSFET. Efisiensi pada beban L lebih kecil dibandingkan beban R saja disebabkan karena faktor daya pada beban dengan L lebih kecil.

Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

Dari hasil pengujian dan analisa, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Inverter Multi Level Tipe Jembatan (*H-bridge*) membutuhkan suplai DC yang terpisah untuk tiap tingkat inverter yang dirangkai secara bertingkat (*casacade*). Hal ini membuat rangkaian inverter ini menjadi cukup besar.
2. Karakteristik waktu tunda baik t_{on} maupun t_{off} pada optoisolator maupun pada MOSFET menyebabkan bentuk gelombang output yang berbeda dengan sinyal picunya.
3. Bentuk gelombang output inverter multi level tipe jembatan adalah resultan dari bentuk gelombang tiap inverter yang disusun secara *cascade*. Sehingga nilai tegangan output (V_{out}) inverter multi level tipe jembatan (*H-bridge*) adalah resultan dari tegangan output tiap inverter yang menyusunnya. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.3

4. Pada inverter multi level, komponen harmonisa yang dominan adalah pada harmonisa ke-3, dan ke-7
5. Distorsi harmonisa inverter multi level tipe jembatan lebih kecil dari pada inverter satu phase konvensional yang menggunakan modulasi gelombang kotak maupun modulasi SPWM untuk beban yang sama.
6. Nilai distorsi harmonisa output inverter multi level tipe jembatan masih dipengaruhi beban, semakin besar beban maka nilai distorsi harmoniknya semakin besar.
7. Efisiensi inverter multi level pada tugas akhir ini berada pada kisaran angka 37% sampai 70%.

Daftar Pustaka

1. Arrilaga, J, D.A Bradley, P.S. Bodger, *Power System Harmonics*, John Wiley & Sons, 1985
2. Corzine, Dr. Keith, *Operation and Design of Multi-level Inverters*, University of Missouri. Desember 2003.
3. Corzine, Keith, *Multilevel Converters*, CRC Press LLC, 2002
4. Dixon, Juan dan Luis Moran, *Multi-level Inverter Based on Multi-Stage Connection of Three-Level Converters Scaled in Power of Three*, IEEE Transaction on Power Electronics.
5. G.Ledwich, *Pulse Width Modulation (PWM) Basics*, <http://www.Powerdesigners.com>, 1998
6. Hartono, Andy, *Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa dengan menggunakan Inverter Sinusoidal Pulse Wide Modulator*, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro, Semarang, 2004
7. Karpati, Attila, *DC-AC Conversion*, CRC Press LLC, 2002
8. Nalwan, Paulus Andi, *Panduan Praktis Teknik Antarmuka dan Pemrograman Mikrikontroler AT89C51*, PT Elex Media Komputindo Kelompok Gramedia, Jakarta, 2003
9. Nguyen, Phu dan Ishtiak Rahman, *Power Electronics, H-Bridge Inverter*, <http://www.powerdesigners.com>, 2005
10. Putra, Agfianto Eko, *Belajar Mikrokontroler AT89C51/52/55 (Teori dan Aplikasi)*, Gava Media, Jakarta, 2002.
11. Rashid, Muhammad H, *Power Electronics Handbook*, Academic Press, Kanada, 2001
12. Sirisukprasert, Siriroj, *Optimized Harmonic Stepped-Waveform for Multilevel Inverter*, <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/td-100899-000251/>, 1999

13. Sutanto, Jusmin dan Herniadi Buhron, Implikasi Harmonisa Dalam Sistem Tenaga Listrik dan Alternatif Solusinya, Politeknik Negeri Bandung, Bandung
14. Tolbert, Leon M, John N Chiasson dan Fang Z Peng, *Modulation Index Regulation of a Multilevel Inverter for Static Var Compensation*, IEEE Transaction on Power Electronics.
15. V.T. Somasekhar, K. Gopakumar, *a PWM Scheme for a 3-level Inverter Cascading two 2-level Inverters*, Center for Electronics Design and Technology, Indian Institute of Science, Bangalore, India,
16. Walker, Geoffrey R, *Modulation and Control of Multilevel Converters*, Department of Computer Science and Electrical Engineering University of Queensland, USA, 1999.
17. _____, *Fatec Inverter Application Course*, Mitsubishi
18. _____, <http://www.alldatasheet.com>
19. _____, <http://www.atmel.com>
20. _____, *PSIM User's Guide Version 6.0*, Powersimtech Inc, 2004

