

PERANCANGAN MODUL PRAKTIKUM INVERTER SINUSOIDAL PULSE WIDTH MODULATION (SPWM) 2 LEVEL, 3 LEVEL, DAN SINUSOIDAL

Yanuar Mahfudz Safarudin^{*)}, Agung Warsito, and Sudjadi

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro Semarang
Jln. Prof. Sudharto, SH. Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)Email : yanuarmahfudz@yahoo.co.id}

Abstrak

Dewasa ini, kebutuhan akan energi semakin meningkat, terutama energi terbarukan. Hal ini memicu berkembangnya teknologi yang mendukung pemanfaatan energi terbarukan, salah satunya yaitu teknologi sel surya. Teknologi sel surya memanfaatkan sinar matahari yang kemudian dikonversi ke energi listrik DC, kemudian diinvert ke energi AC. Alat untuk mengkonversi listrik DC ke AC dinamakan inverter. Ada beberapa jenis inverter, mulai dari gelombang kotak, gelombang modified sinewave, kotak bertingkat, hingga pure sinewave. Setiap jenis inverter memiliki kelebihan dan kekurangan sendiri. Inverter jenis pure sinewave ialah jenis inverter yang paling canggih, karena gelombang keluarannya nyaris tanpa harmonisa. Tetapi inverter jenis ini jarang ditemukan literatur maupun modulnya, sehingga mahasiswa sulit mempelajarinya. Pada penelitian kali ini, penulis mencoba merancang modul inverter SPWM 2 level, 3 level dan pure sinewave, dengan harapan terciptanya modul yang dapat digunakan untuk kegiatan praktikum, khususnya praktikum elektronika daya. Pembuatan modul ini menggunakan metode pada penelitian Jim Doucet dkk, dari Worcester Polytechnic Institute yaitu dengan metode SPWM 3 level difilter dengan filter L-C, tetapi dengan sedikit penyesuaian yaitu penyesuaian komponen yang dipakai.

Kata Kunci: Inverter, SPWM, Pure Sinewave

Abstract

Nowadays, the demand of energy is rising, especially renewable energy. This triggered the development of technologies that support renewable energy, one of which is solar cell technology. Solar cell technology using sunlight energy which is then converted to DC power, then diinvert into AC energy. So we need device to convert DC to AC that called inverter. There are several types of inverters, for example square wave, modified sinewave waveform, multilevel square, and pure sinewave. Each type of inverter has its own advantages and disadvantages. Pure sinewave inverter type is the most advanced inverter type, because the wave output with almost no harmonics. However, this type of inverter rare literature and modules so the students difficult to learn. At this research, the author tries to design SPWM inverter module 2 level, 3 level and pure sinewave, hoping the creation of modules that can be used for lab work, especially the power electronics lab work. This project based on research methods of Jim Doucetl, from the Worcester Polytechnic Institute is a three-level SPWM method filtered with LC filter, but with a little adjustment of the adjustment components used.

Keywords: Inverter, SPWM, Pure Sinewave

1. Pendahuluan

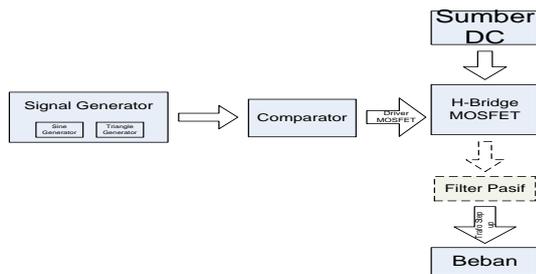
Inverter merupakan piranti elektronika daya yang berfungsi untuk mengubah sumber DC menjadi sumber AC. Inverter menjadi alat yang sangat penting dalam dunia kelistrikan, karena energi yang terbarukan seperti surya dan angin kebanyakan menghasilkan sumber DC, sedangkan piranti rumah tangga menggunakan sumber AC.

Di kampus Teknik Elektro Universitas Diponegoro, sudah banyak senior yang membuat inverter dengan berbagai metode, diantaranya metode push-pull, full-bridge full-bridge SPWM, push-pull resonan, dan inverter multilevel. Akan tetapi modul untuk para mahasiswa, masih menggunakan metode lama, dan tidak ada perkembangan. Atas pertimbangan ini, penulis bertujuan untuk membuat modul praktikum inverter, dengan harapan dapat digunakan untuk keperluan praktikum. Metode yang digunakan adalah seperti metode yang digunakan oleh Jim Doucet dkk, dari Worcester Polytechnic Institute

yaitu dengan metode SPWM 2 level, SPWM 3 level, dan sinusoidal dengan cara difilter dengan filter L-C. Metode ini digunakan karena metode ini belum pernah digunakan di Teknik Elektro Universitas Diponegoro.

2. Perancangan Hardware

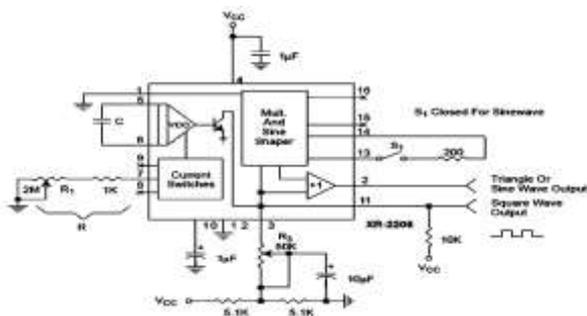
Hardware yang dirancang memiliki beberapa blok. Blok diagram dapat dilihat pada gambar 8.



Gambar 1 Blok diagram penelitian

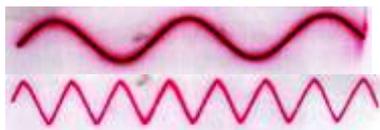
2.1 Blok Signal Generator

Untuk membuat sinyal sinus dan segitiga, digunakan IC XR2206. IC ini digunakan karena dapat menghasilkan sinyal sinus dan segitiga, dengan amplitudo dan frekuensi yang dapat diatur dengan menggunakan potensio R1 dan R3 pada gambar 9.



Gambar 2 Rangkaian umum IC XR2206

Dari hardware yang dirancang, dihasilkan gelombang yang dapat dilihat pada gambar 10.



Gambar 3 Keluaran blok signal generator

2.2 Blok Komparator

Pada penelitian ini, digunakan IC LM339 untuk membuat komparator. IC LM339 ini digunakan karena satu

komponen IC ini memiliki 4 buah komparator, dan hanya membutuhkan satu sumber tegangan (*single supply*).



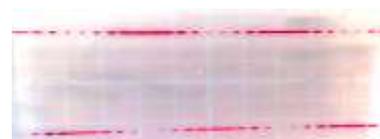
Gambar 4 Keluaran blok komparator

2.3 Blok Driver MOSFET

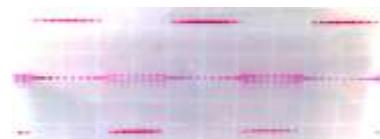
Konfigurasi MOSFET *H-Bridge* digunakan pada tugas ini. Pada konfigurasi *H-Bridge*, drain pada MOSFET bagian atas terhubung dengan masukan sumber DC, yang nilai tegangannya lebih tinggi dari keluaran blok komparator (15 VDC). Sedangkan untuk memicu MOSFET, tegangan *gate* harus lebih tinggi dari tegangan *drain*, sehingga dibutuhkan *driver* MOSFET untuk memicu *gate* pada sisi MOSFET bagian atas^{[1] [11]}. Pada penelitian ini, dua buah *driver* MOSFET tipe IR2110 digunakan untuk memicu keempat MOSFET konfigurasi *H-Bridge*.

2.4 Blok H-Bridge MOSFET

Blok H-Bridge MOSFET menggunakan MOSFET tipe IRFZ44N. MOSFET ini memiliki karakteristik yaitu V_{DS} 55 Volt, I_D 49 Ampere, dan respon time dalam orde nano detik. Gambar keluaran H-Bridge MOSFET yang berupa SPWM 2 level dan 3 level dapat dilihat pada gambar 12 dan 13.



Gambar 5 Keluaran SPWM 2 level



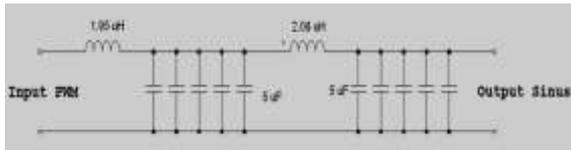
Gambar 6 Keluaran SPWM 3 level

2.5 L-C Filter

Filter pasif yang digunakan pada penelitian kali ini adalah filter pasif *lowpass* filter tipe L-C dua kutub. Penggunaan filter LC dua kutub ini memiliki karakteristik yaitu membutuhkan komponen induktor dan kapasitor yang lebih banyak, tetapi komponen yang digunakan memiliki nilai induktansi yang lebih kecil^[1]. Ini menjadi pertimbangan, karena keterbatasan komponen toroid yang digunakan. Selain itu juga bertujuan agar gelombang

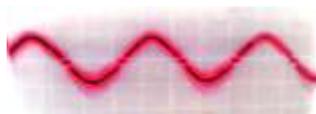
sinus keluaran yang dihasilkan lebih halus, dan harmonisnya lebih kecil.

Induktor yang digunakan adalah induktor tipe toroid, dengan induktansi 1,95 μH , dan 2,08 μH . Sedangkan kapasitor yang digunakan adalah kapasitor 1 μF yang disusun paralel 5 buah, sehingga menghasilkan kapasitansi total 5 μF tiap kutub filter. Diagram skematik perangkat keras ditunjukkan pada gambar 14.



Gambar 7 Diagram skematik blok L-C filter

Dengan konfigurasi filter di atas, apabila diberikan masukan berupa sumber SPWM 3 level dengan frekuensi *switching* 150 kHz, maka akan dihasilkan sumber sinus. Gambar gelombang keluaran sinus dapat dilihat pada gambar 15.

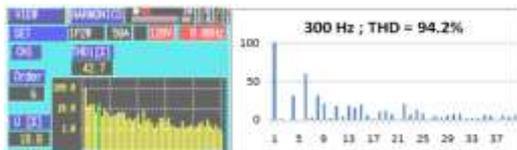


Gambar 8 Keluaran blok L-C filter

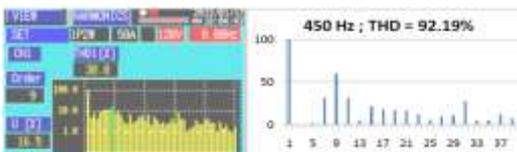
3. Penelitian dan Analisa

3.1 Harmonisa SPWM 2 Level

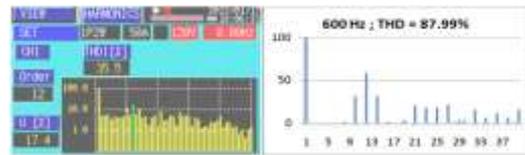
Penelitian dilakukan dengan mengamati nilai harmonisa keluaran inverter SPWM 2 level, dengan menggunakan Power Quality Analyzer HIOKI, kemudian dibandingkan dengan hasil simulasi PSIM versi 6.0.



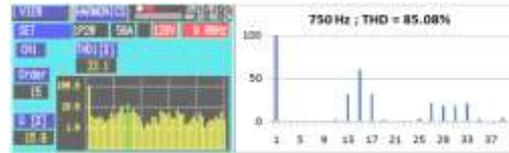
Gambar 9 Hasil pengamatan 300,5 Hz dan simulasi



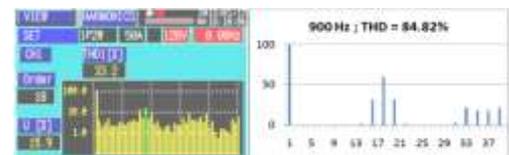
Gambar 10 Hasil pengamatan 450,1 Hz dan simulasi



Gambar 11 Hasil pengamatan 601,9 Hz dan simulasi



Gambar 12 Hasil pengamatan 750,7 Hz dan simulasi



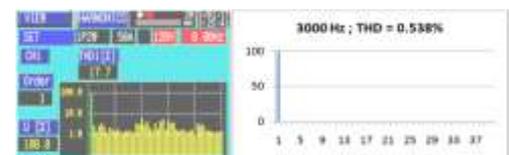
Gambar 13 Hasil pengamatan 900,3 Hz dan simulasi



Gambar 14 Hasil pengamatan 1202 Hz dan simulasi



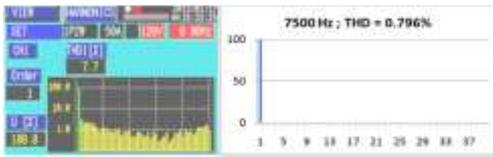
Gambar 15 Hasil pengamatan 1502 Hz dan simulasi



Gambar 16 Hasil pengamatan 3007 Hz dan simulasi



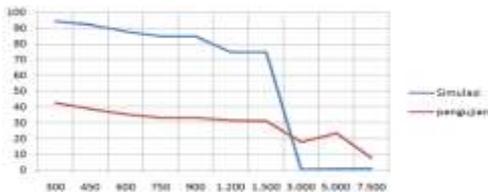
Gambar 17 Hasil pengamatan 5004 Hz dan simulasi



Gambar 18 Hasil pengamatan 7528 Hz dan simulasi

Dari keseluruhan perbandingan pengamatan dan simulasi, terdapat beberapa kesamaan dan perbedaan antara pengamatan dan simulasi. Kesamaannya antara lain:

1. Nilai harmonisa terbesar terdapat pada frekuensi *switching*. Misalkan pada frekuensi *switching* 30 Hz, maka harmonisa terbesar pada urutan ke-6. Secara keseluruhan nilainya hampir sama, yaitu $\pm 60\%$
2. Ada kemiripan bentuk, antara pengamatan dan simulasi, di mana nilai harmonisa yang tinggi pada simulasi, nilainya juga tinggi pada pengamatannya.
3. Pada simulasi, frekuensi *switching* kelipatan ganjil tidak memiliki nilai harmonisa urutan genap sama sekali.
4. Semakin besar nilai frekuensi *switching*, maka semakin besar pula nilai THDnya, artinya hubungan keduanya adalah berbanding terbalik.



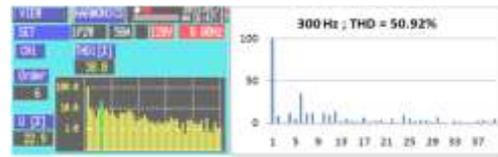
Gambar 19 Grafik perbandingan frekuensi *switching* dan THD

Tetapi ada perbedaan antara pengujian dan simulasi, yaitu antara lain:

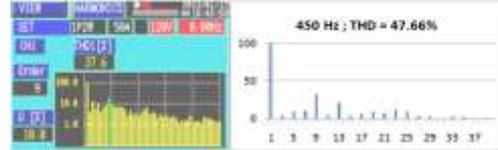
1. Ada beberapa nilai harmonisa pada pengamatan yang pada simulasi seharusnya tidak ada. Kemudian nilai THD sangat jauh perbedaannya, antara simulasi dan pengamatan. Hal ini sangatlah dimungkinkan, karena beberapa hal, di antaranya frekuensi *switching* pada pengamatan nilainya tidak pasti, misal 300,2 Hz. Kemudian karena adanya faktor respon time, dan hasil pengamatan sangat rentan dengan *noise*.
2. Nilai harmonisa frekuensi *switching* 3000 Hz ke atas, turun secara drastis. Hal ini disebabkan karena alat ukur yang hanya mampu mengamati nilai harmonisa hingga kelipatan 50 (2500 Hz) sehingga nilai harmonisa di atasnya tidak dapat terbaca.

3.2 Harmonisa SPWM 3 Level

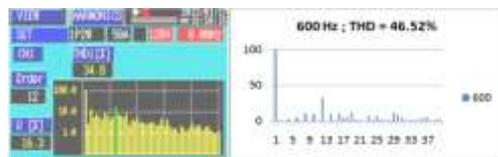
Penelitian ini sama dengan penelitian harmonisa SPWM 2 level, yaitu membandingkan antara hasil pengamatan dengan *Power Quality Analyzer* dengan simulasi PSIM versi 6.0



Gambar 20 Hasil pengamatan 300,3 Hz dan simulasi



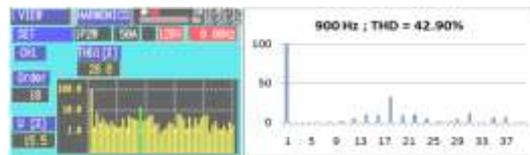
Gambar 21 Hasil pengamatan 450,3 Hz dan simulasi



Gambar 22 Hasil pengamatan 600,8 Hz dan simulasi



Gambar 23 Hasil pengamatan 750,9 Hz dan simulasi



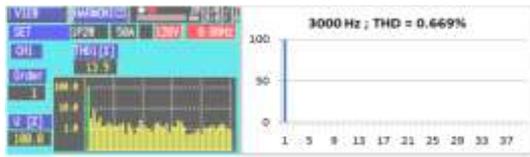
Gambar 24 Hasil pengamatan 900,2 Hz dan simulasi



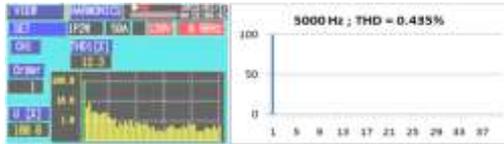
Gambar 25 Hasil pengamatan 1208 Hz dan simulasi



Gambar 26 Hasil pengamatan 1501 Hz dan simulasi



Gambar 27 Hasil pengamatan 3003 Hz dan simulasi



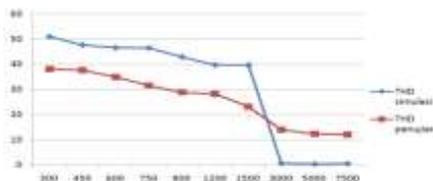
Gambar 28 Hasil pengamatan 5002 Hz dan simulasi



Gambar 29 Hasil pengamatan 7516 Hz dan simulasi

Analisa harmonisa SPWM 3 level ini kurang lebih hampir sama dengan analisa pada SPWM 2 level, yaitu terdapat beberapa kesamaan dan perbedaan antara hasil pengamatan dan simulasi. Kesamaannya antara lain:

1. Nilai harmonisa terbesar berada pada urutan harmonisa frekuensi *switching*. Misalkan pada frekuensi *switching* 300 Hz, harmonisa terbesarnya pada urutan ke-6. Secara keseluruhan nilainya hampir sama, yaitu $\pm 33\%$ (simulasi).
2. Ada kemiripan bentuk, antara pengamatan dan simulasi, di mana nilai harmonisa yang tinggi pada simulasi, nilainya juga tinggi pada pengamatannya.
3. Pada simulasi, frekuensi *switching* kelipatan ganjil tidak memiliki nilai harmonisa urutan genap sama sekali.
4. Semakin besar nilai frekuensi *switching*, maka semakin besar pula nilai THDnya, artinya hubungan keduanya adalah berbanding terbalik.



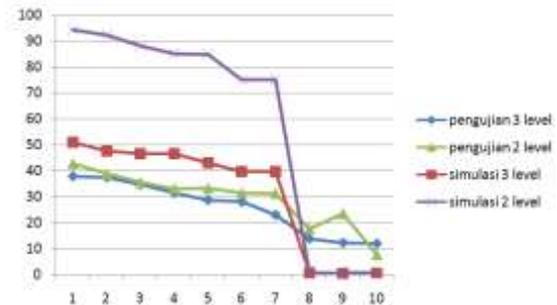
Gambar 30 Grafik perbandingan frekuensi *switching* dan THD

Sama seperti SPWM 2 level, ada beberapa perbedaan dan kejanggalan, yaitu:

1. Ada beberapa nilai harmonisa pada pengamatan yang pada simulasi seharusnya tidak ada. Kemudian nilai THD sangat jauh perbedaannya, antara simulasi dan pengamatan. Hal ini sangatlah dimungkinkan, karena beberapa hal, di antaranya frekuensi *switching* pada pengamatan nilainya tidak pasti, misal 300,3 Hz. Kemudian karena adanya faktor respon time, dan hasil pengamatan sangat rentan dengan *noise*.
2. Nilai harmonisa frekuensi *switching* 3000 Hz ke atas, turun secara drastis. Hal ini disebabkan karena alat ukur yang hanya mampu mengamati nilai harmonisa hingga kelipatan 50 (2500 Hz) sehingga nilai harmonisa di atasnya tidak dapat terbaca.

3.3 Perbandingan SPWM 2 level dengan 3 level

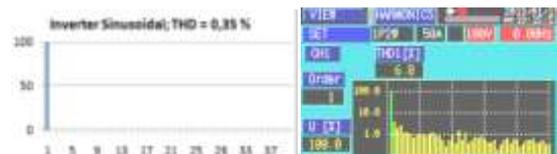
Pada subbab ini akan dianalisa mengenai perbandingan nilai harmonisa pada SPWM 2 level dengan SPWM 3 level. Secara garis besar, nilai harmonisa SPWM 2 level lebih besar dari SPWM 3 level, begitupun nilai THD-nya. Sehingga secara kualitas sumber tegangan, SPWM 3 level lebih baik nilai THDnya daripada SPWM 2 level. Kemudian SPWM 3 level ini juga lebih mudah difilter secara pasif, dan dijadikan gelombang sinus.^[2]



Gambar 31 Perbandingan THD SPWM 2 level dan 3 level

3.4 Harmonisa Inverter Sinusoidal

Pada subbab ini, akan dibahas penelitian mengenai inverter sinusoidal yang dirancang. Penelitian meliputi pengamatan nilai harmonisa dengan *Power Quality Analyzer*, kemudian dibandingkan nilainya dengan simulasi PSIM versi 6.0.



Gambar 32 Perbandingan harmonisa pengamatan dan simulasi

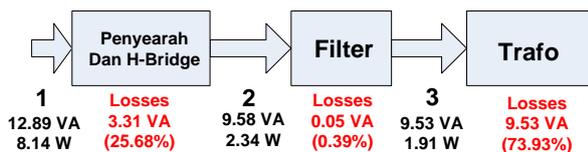
Dari hasil simulasi dan pengujian, dapat dilihat bahwa antara bentuk gelombang sinus hasil simulasi dan

pengujian hampir sama bentuknya. Kemudian dilihat dari nilai THD, nilai harmonisa simulasi adalah 0,35%, sedangkan dalam pengujiannya bernilai 6,8%.

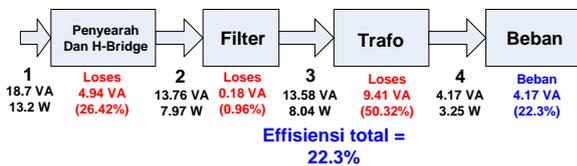
Nilai harmonisa dari sinusoidal pengujiannya sudah kecil, yaitu 6,8%, dan bentuk gelombangnya sudah menyerupai sinus. Artinya filter pasif sudah bekerja dengan baik. Hanya saja nilai harmonisa tadi masih belum sesuai dengan standarisasi THD tegangan dari PUIL, yaitu 5%.

3.5 Pengujian Efisiensi Inverter

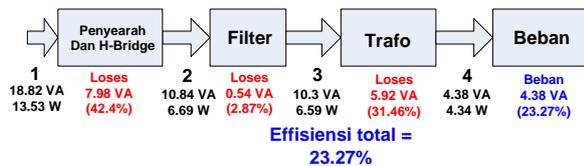
Pengujian adalah dengan menguji efisiensi dari inverter SPWM 2 level dan 3 level pada frekuensi *switching* 900 Hz. Dan efisiensi inveter sinusoidal. Metode yang digunakan adalah dengan pengujian beban nol, lampu pijar 15 W, dan lampu SL 8 W. Kemudian arus, tegangan, dan *cosphi* dari masing-masing komponen rangkaian daya diukur untuk mendapatkan nilai daya, dan dapat diketahui *losses* dari masing-masing komponen.



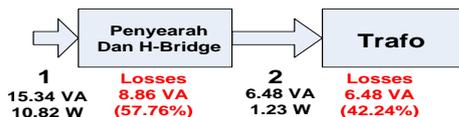
Gambar 33 Efisiensi inverter sinusoidal beban nol



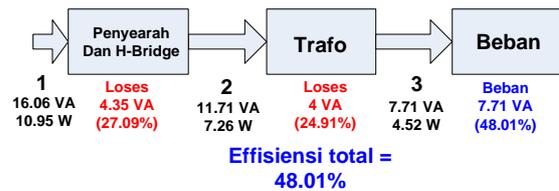
Gambar 34 Efisiensi inverter sinusoidal beban lampu pijar



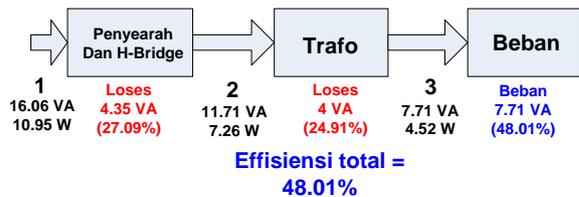
Gambar 35 Efisiensi inverter sinusoidal beban lampu SL



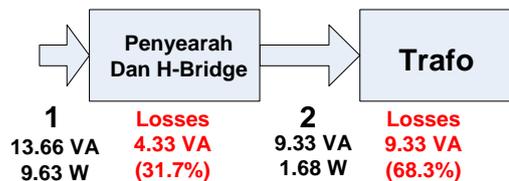
Gambar 36 Efisiensi inverter SPWM 3 level beban nol



Gambar 37 Efisiensi inverter SPWM 3 level beban lampu pijar



Gambar 38 Efisiensi inverter SPWM 3 level beban lampu SL



Gambar 39 Efisiensi inverter SPWM 2 level beban nol

Pada inverter sinusoidal, dapat dilihat pada gambar 40 hingga 42, efisiensinya sangat kecil, yaitu hanya 22% hingga 23% saja. Apabila kita amati, *losses* terbesar adalah pada trafo daya yang dipakai. Dari 100% daya sumber, *losses* trafonya sebesar 31,46% hingga 73,93%. Analisa *losses* mengacu pada persamaan sebagai berikut.

$$S_{total} = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h$$

Dari rumus di atas, dapat dilihat bahwa besarnya harmonisa memberikan kontribusi pada besarnya daya. Semakin besar harmonisanya, maka harmonisa arus juga akan besar, sehingga daya total akan semakin besar. Pada inverter sinusoidal, harmonisanya adalah bernilai 6,8%, sehingga sangat memungkinkan apabila efisiensi trafo menjadi sangat rendah.

Kemudian efisiensi total dari inverter SPWM 3 level lebih baik daripada inverter sinusoidal. Apabila mengacu pada persamaan, seharusnya, inverter SPWM 3 level lebih rendah kualitasnya daripada inverter sinusoidal, karena nilai harmonisanya lebih besar (hasil simulasi dan pengujian). Harmonisa inverter sinusoidal adalah 6,8%, sedangkan harmonisa inverter SPWM 3 level frekuensi *switching* 900 Hz adalah 28,8%. Seharusnya kualitas inverter sinusoidal lebih baik daripada inverter SPWM 3 level.

Untuk penyebab pastinya belum diketahui, perlu diteliti lebih lanjut, apakah penyebab *losses* ini karena kualitas filter pasif kurang baik, atau kualitas trafo, atau karakteristik trafo, atau karena data diambil pada beban rendah. Tetapi untuk *losses*-nya, *losses* terbesar, seperti pada inverter sinusoidal, adalah terdapat pada trafo step up kecuali pada beban nol.

Dilihat dari data, *losses* inverter SPWM 2 level sangat besar, terbukti dengan tegangan rendah (12,2 V) arusnya sudah sangat besar, yaitu 2,12 Ampere. Hal ini sesuai dengan teori, yaitu harmonisa yang sangat besar sehingga menyebabkan *losses* yang sangat besar pula. Harmonisa pada inverter SPWM 2 level pada frekuensi *switching* 900 Hz adalah 33,2 % (pengujian).

Sesuai dengan tujuan awal, penelitian ini bertujuan untuk merancang suatu modul praktikum SPWM 2 level, 3 level, dan sinusoidal, dengan menggunakan metode analog, sehingga mahasiswa pada generasi berikutnya (praktikan) dapat memahami salah satu metode pembuatan inverter.

Karena yang dirancang adalah berupa modul praktikum, maka tegangan kerja inverter sengaja dibuat kecil, yaitu maksimal 30 Volt, agar apabila terjadi kesalahan dalam merangkai kabel, tidak berdampak fatal pada alat, dan mengganggu jalannya praktikum. Konsekuensinya, apabila modul ini digunakan untuk menyalakan beban rumah tangga, diperlukan trafo step up untuk menaikkan tegangannya, sehingga *losses* trafo tidak dapat dihindari. Apabila akan membuat inverter dengan metode yang sama, tetapi dengan tujuan aplikasi, dapat dilakukan dengan meniadakan trafo step up, memperbaiki konfigurasi filter, agar *losses* tidak terlalu besar. Pada referensi^[2], metode ini pernah digunakan untuk membuat inverter dengan efisiensi hingga 80%.

4. Kesimpulan dan Saran

Dari hasil pengujian dan analisa penelitian dengan judul Perancangan Modul Praktikum Inverter Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) 2 Level, 3 Level, dan Sinusoidal, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa inverter yang dirancang dapat mengkonversi sumber DC menjadi sumber AC dalam bentuk SPWM 2 level, SPWM 3 level, maupun sinusoidal. Kemudian nilai THD simulasi frekuensi *switching* 300 Hz hingga 1,5 kHz, untuk SPWM 2 level, berkisar antara 75,02% hingga 94,17%. Untuk SPWM 3 level, berkisar antara 39,66% hingga 50,92%. Sedangkan untuk inverter sinusoidal nilai THDnya 0,35%. Kemudian nilai THD pengujian berbeda dengan simulasinya, pada frekuensi *switching* 300 Hz hingga 1,5 kHz, untuk SPWM 2 level, berkisar antara 31,3% hingga 42,7%. Untuk SPWM 3 level, berkisar antara 23,1% hingga 38%. Sedangkan untuk inverter sinusoidal nilai THDnya 6,8%. Selanjutnya, semakin tinggi nilai frekuensi *switching*, maka nilai THD akan semakin

rendah. Artinya, hubungan antara frekuensi *switching* dengan nilai THD adalah berbanding terbalik. Kemudian nilai efisiensi inverter yang dibuat sangat rendah, berkisar antara 22,3% hingga 48,01%. Nilai efisiensi yang sangat rendah paling besar dipengaruhi oleh penggunaan trafo *step up* pada modul ini. Sedangkan saran dari penulis adalah sebaiknya filter pasif direncanakan dengan baik untuk mencapai nilai THD seminimal mungkin, dan untuk aplikasinya, alat ini dapat digunakan untuk pengaturan motor listrik.

Referensi

- [1]. Doucet, Jim, dkk, *DC/AC Pure Sine Wave Inverter*, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, 2007.
- [2]. Crowley, Ian F. and Leung, Ho Fong, *Pure Sinewave Inverter*, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, 2011.
- [3]. Sardiyanto, *Pembuatan Modul Inverter 3 Fasa Sinusoidal Pulse Width Modulation sebagai Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Terhubung Segitiga 220 Volt*. Universitas Diponegoro.
- [4]. ---, <http://www.energymatters.com.au/renewable-energy/inverters/>.
- [5]. ---, <http://encon.fke.utm.my/nikd/SEM4413/inverter/SPWM-Ma-Mf-varies.pdf>
- [6]. Wikipedia, <http://en.wikipedia.org/>
- [7]. Severns, Rudy. *Design of Snubber for Power Circuit*. <http://www.newark.com/pdfs/techarticles/cornell/design.pdf>.
- [8]. Dwi Pradipta, Bagas, *Perancangan Inverter Dual Conversion Full Bridge-Full Bridge Pada Aplikasi Fotovoltaik*, Universitas Diponegoro, Semarang, 2011.
- [9]. Elektro Indonesia, <http://www.elektroindonesia.com/elektro/elek34.html>
- [10]. ---, <http://en.wikipedia.org/wiki/Opto-isolator>
- [11]. ---, <http://www.alldatasheet.com>
- [12]. Yuwono, Eko Aptono Tri, *Inverter Multi Level Tipe Jembatan Satu Fasa Tiga Tingkat dengan Mikrokontroler AT89S51*, Universitas Diponegoro, Semarang, 2006.
- [13]. Aribowo, Cahyo, *Perancangan Inverter Dual Conversion Push-Pull Full Bridge pada Aplikasi Photovoltaik*. Universitas Diponegoro, Semarang, 2011.
- [14]. Wardhana, Ibnu Surya, *Perancangan Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) dengan Konfigurasi Full Bridge-Full Bridge Untuk Aplikasi Fotovoltaik*. Universitas Diponegoro, Semarang, 2012.
- [15]. LEM, *Power Quality Analyzer Analyst 3Q datasheet*.
- [16]. Giesselmann, Michael, dkk, *The Power Electronics Handbook*. CRC Press LCC, 2002.
- [17]. Rashid, Muhammad, *Power Electronics Handbook*, Academic Press, Canada, 2001.
- [18]. ---, <http://www.phys.uri.edu/>
- [19]. Sutanto, Jusmin dan Herniadi Buhron, *Implikasi Harmonisa Dalam Sistem Tenaga Listrik dan Alternatif Solusinya*. Politeknik Negeri Bandung, Bandung.
- [20]. Heydt, G.T, *Contemporary Topics in Electric Power Quality*, Arizona State University, Arizona, 2000.
- [21]. Grady, W. Mack, *Harmonics and How They Relate to Power Factor*, The University of Texas at Austin, Texas, 1993.