

**PERANCANGAN VARIABLE FREQUENCY DRIVE (VFD)
SATU PHASA DENGAN MENGGUNAKAN METODE
SINUSOIDA PULSE WIDTH MODULATION
BERBASIS MIKROKONTROLER**

Indrawan Nugrahanto¹⁾, Galih Putra Riatma²⁾, Anindya Dwi Risdhayanti³⁾

^{1,2,3)} Program Studi Teknik Elektronika

Jurusan Teknik Elektro – Politeknik Negeri Malang

Jl. Soekarno Hatta No.9 Kota Malang, Jawa Timur

¹⁾indrawan.nugrahanto@polinema.ac.id

ABSTRAK

Pada jurnal yang kami buat saat ini memiliki tujuan untuk mendesain sebuah rangkaian Variable Frequency Drive (VFD) satu phasa, yang mampu menghasilkan keluaran tegangan AC dan frekuensi yang dapat diubah-ubah dengan masukan dari sumber tegangan AC 220V 50Hz. Rangkaian VFD merupakan implementasi dari sebuah rangkaian Inverter satu phasa, diode Full-bridge rectifier digunakan untuk mengubah tegangan AC menjadi tegangan DC yang selanjutnya tegangan DC akan dirubah kembali menjadi tegangan AC dengan frekuensi yang dapat diubah-ubah yaitu menggunakan rangkaian Full-bridge Inverter. Metode Unipolar Sinusoida Pulse Width Modulation (SPWM) dipakai untuk mengontrol tegangan dan frekuensi keluaran dan juga menghasilkan tegangan keluaran yang mendekati gelombang sinus. Untuk menghasilkan SPWM dipakai mikrokontroler ATmega8535. Sebagai aplikasi rangkaian VFD ini akan diaplikasikan untuk mengatur kecepatan motor AC jenis Motor kapasitor. Pembangkit SPWM menggunakan frekuensi sinyal carrier 1Khz, dengan index modulasi 0,9 . frekuensi keluaran yang dapat diatur antara rentang frekuensi 8 Hz sampai 80 Hz.

Kata Kunci : *Variable Frequency Drive, diode, Full-bridge rectifier, Full-bridge Inverter, Unipolar, Sinusoida Pulse Width Modulation*

ABSTRACT

This paper presents the design a Single –Phase Variable Frequency Drive (VFD) , it can produce AC Voltage and frequency that can adjustable, this circuit get input from PLN line (220V 50Hz). VFD circuit is implementation of a single-phase Inverter, diode full-bridge rectifier is used to rectify the AC line voltage, and than DC voltage will be convert again to AC by DC to AC Converter (Inverter). Unipolar Sinusoida Pulse Width Modulation is employed to control the output voltage magnitude and frequency and also it can produce output pure sine-wave. The Microcontroller ATmega 8535 is used for SPWM generate. Finaly VFD circuit is used to control the AC Motor (Motor Capasitor) as application. SPWM generate by frequency carrier 1KHz, index modulation 0,9. Output frequency can be turn for frequency range 8Hz until 80 Hz.

Keywords: *Variable Frequency Drive, diode, Full-bridge rectifier, Full-bridge Inverter, Unipolar, Sinusoida Pulse Width Modulation.*

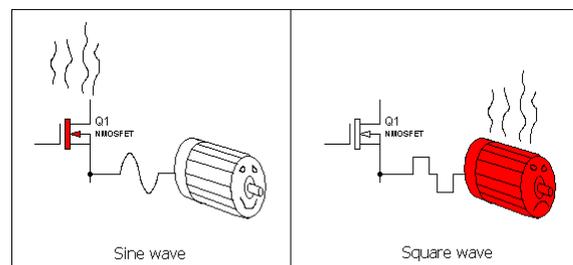
1. PENDAHULUAN

Pemakaian *Variable Frequency Drive* khususnya di dalam dunia industri cukup luas contohnya, untuk mengatur kecepatan motor AC melalui pengaturan frekuensi masukan, pemanasan secara induksi (*induction heating*), *Standby Power supply* dengan frekuensi dan tegangan yang dapat diubah sesuai dengan yang dibutuhkan oleh beban. Alat ini banyak di gunakan untuk penstabil tegangan pada industri terutama industri yang bergerak dibidang *consumable goods* dimana motor 1 phase di gunakan sebagai penggerak conveyor, dengan alat ini maka gelombang sinusoida murni dapat dihasilkan dengan controller yang bersumber tegangan DC. Blok rangkaian pengaturan frekuensi atau yang biasa disebut *Variable Frequency Drive (VFD)*, pada dasarnya terdiri dari rangkaian penyearah atau *Rectifier (AC to DC Converter)*, rangkaian *Filter*, rangkaian kontrol, dan rangkaian *Inverter (DC to AC Converter)*. Jika dilihat dari fungsi masing-masing blok rangkaian yang paling dominan atau berperan penting didalam sistem adalah rangkaian *inverter*, karena pada rangkaian inilah proses pengaturan frekuensi keluaran terjadi.

Karena motor starter membutuhkan daya dan arus yang sangat tinggi, maka penggunaan inverter atau VFD dapat meminimalkan penggunaan daya dan arus yang dapat menghemat penggunaan energi listrik. Selain itu, pada beberapa aplikasi motor yang tidak menggunakan inverter atau VFD, kecepatan motor (RPM) selalu berada pada kecepatan maksimum, dan kebutuhan mesin tidak selalu pada kecepatan penuh. Dengan menggunakan inverter atau VFD, Anda dapat mengatur kecepatan motor (RPM) sesuai dengan kebutuhan mesin / proses, sehingga mencegah pemborosan daya putaran dan juga hemat daya. Dengan berbagai keunggulan alat ini dan mengingat pentingnya alat ini dibidang pengembangan *power electronics* untuk itu kami menjadikan alat ini sebagai landasan dalam perancangan VFD.

Jika dilakukan survei dipasaran, ada bermacam-macam jenis VFD yang dijual dan dengan harga produk yang berbeda-beda. Perbedaan antara produk yang “bagus” dan “jelek” itu terletak dari sinyal kontrol yang digunakan pada proses pensakelaran saklar elektronik pada rangkaian *Inverter*.

Sebagai contoh pada Gambar 1. terlihat pemakaian VFD untuk mengatur kecepatan motor AC. *Output* dengan gelombang sinus (*sine-waves*) dapat memperkecil *electromagnetic noise* pada motor, motor akan berputar dengan halus (*noise* yang kecil, torsi yang lebih stabil), dan pemakaian efisiensi pada motor lebih tinggi [1]. Sedangkan jika sakelar elektronik dikontrol dengan sinyal kotak (*square-waves*) yang dapat menghasilkan *output* dengan gelombang kotak, rugi-rugi pada sakelar elektronik sangat kecil, tapi rugi-rugi akan terjadi pada beban, dan akan menghasilkan torsi motor yang memiliki getaran cuku tinggi.



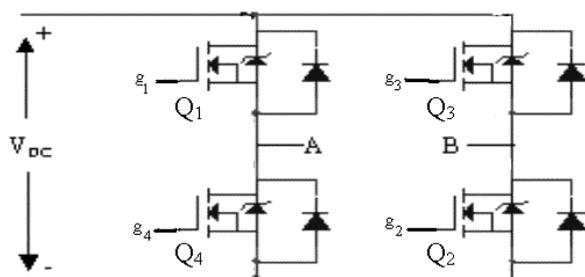
Gambar 1. Gelombang sinus menyebabkan rugi-rugi pada sakelar elektronik, gelombang kotak menghasilkan rugi-rugi pada beban

Untuk menghasilkan *sinusoida pulse width modulation* dilakukan dengan cara membandingkan sinyal referensi sinus dengan sinyal segitiga. secara umum beberapa teknik modulasi yang sudah dikembangkan dan diaplikasikan pada *full-bridge inverter* diantaranya teknik PWM *bipolar* dan *unipolar* [2]. Dalam paper ini metode yang digunakan adalah *Sinusoida Pulse Width Modulation (SPWM)* dengan teknik *unipolar*. Dengan teknik modulasi *unipolar* dapat menghasilkan keluaran tegangan dan frekuensi yang mendekati sinus,

karena pada teknik ini menggunakan dua buah sinyal sinus dan satu buah sinyal segitiga yang termodulasi. Berbeda dengan teknik *bipolar* yang hanya menggunakan satu sinyal sinus dan satu sinyal segitiga pada proses modulasi pembentukan SPWM.

SPWM dibangkitkan menggunakan Mikrokontroler ATmega8535, yang memiliki 4 buah keluaran PWM. Pembangkitan sinyal SPWM secara digital dengan mikrokontroler dapat memberikan unjuk kerja sistem yang baik karena lebih kebal terhadap gangguan, jika dibandingkan dengan pembangkit sinyal SPWM yang dihasilkan dengan menggunakan komponen-komponen pasif. Perancangan sebuah pembangkit sinyal SPWM menggunakan mikrokontroler memiliki beberapa keuntungan yaitu mudah diprogram dan rangkaian VFD menjadi lebih sederhana atau lebih ringkas karena pada rangkaian kontrol hanya mengandalkan ragam chip tunggal.

Seperti yang dikatakan sebelumnya bahwa perubahan frekuensi keluaran diatur pada blok rangkaian *inverter*. Fungsi sebuah Inverter adalah untuk mengkonversi tegangan input dc menjadi tegangan ac pada besar dan frekuensi yang dapat diatur. Prinsip kerja dari rangkaian Inverter *Full-bridge* adalah sebagai berikut:



Gambar 2. Full-bridge Inverter satu fasa

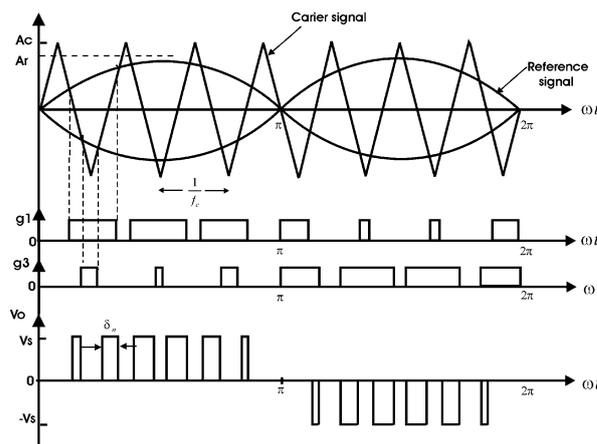
Tegangan bolak-balik pada terminal A-B (Gambar 2.) dihasilkan dari kombinasi penyakelaran komponen daya yang bersilangan sebagaimana Tabel 1. Dengan asumsi urutan penomoran komponen penyakelaran daya seperti Gambar 2, maka ketika Q₁ dan Q₂ “ON”, arus akan mengalir dari Q₁ ke Q₂ melewati beban sehingga

tegangan antara terminal A dan B akan positif ($V_{AB} = +V_{DC}$). Ketika Q₃ dan Q₄ “ON”, arus mengalir dari Q₃ ke Q₄ melalui beban sehingga $V_{AB} = -V_{DC}$.

Tabel 1. Kombinasi Penyakelaran komponen daya dan tegangan keluaran Inverter

Keadaan (state)	Pasangan 1		Pasangan 2		Tegangan Keluaran V_{AB}
	Q ₁	Q ₄	Q ₂	Q ₃	
1	ON	OFF	ON	OFF	+ V_{DC}
2	OFF	ON	OFF	ON	- V_{DC}
3	OFF	ON	ON	OFF	0
4	ON	OFF	OFF	ON	0

Sinyal pembangkit *unipolar* yang bersesuaian dengan Gambar 2. dan Gambar 3. diperoleh dengan cara sebagai berikut:



Gambar 3. Pembangkitan PWM Sinusoida Satu Pasa

- a. Sinyal g_1 diperoleh dengan membandingkan sinyal referensi sinus dan sinyal pembawa segitiga:

$$g_1 = \begin{cases} 1, & \text{jika } A_r \cdot \sin(\omega t) \geq A_c \cdot \text{sgt}(\omega t) \quad (1-1) \\ 0, & \text{lainnya} \end{cases}$$

atau

$$g_1 = \begin{cases} 1, & \text{jika } M \cdot \sin(\omega t) \geq \text{sgt}(\omega t) \quad (1-2) \\ 0, & \text{lainnya} \end{cases}$$

- b. Sinyal g_3 diperoleh dengan membandingkan sinyal referensi $-\sin(\omega t)$ dan sinyal pembawa segitiga ($\text{sgt}(\omega t)$):

$$g_3 = \begin{cases} 1, & \text{jika } A_r \cdot -\sin(\omega t) \geq A_c \cdot \text{sgt}(\omega t) \end{cases} \quad (1-3)$$

atau

$$g_3 = \begin{cases} 1, & \text{jika } M \cdot -\sin(\omega t) \geq \text{sgt}(\omega t) \end{cases} \quad (1-4)$$

- c. Sinyal $g_2 = -g_3$
d. Sinyal $g_4 = -g_1$

Sedangkan tegangan sesaat keluaran Inverter PWM *Sinusoida* satu Phasa adalah sebagai berikut:

- a. Pada setengah periode positif, keluaran tegangan ditentukan oleh sinyal g_1 dan g_2 .

$$V_o = \begin{cases} V_s, & \text{jika } g_1 \text{ dan } g_2 \text{ "ON" bersamaan} \\ 0, & \text{lainnya} \end{cases} \quad (1-5)$$

- b. Pada setengah periode negatif, keluaran tegangan ditentukan oleh sinyal g_3 dan g_4 .

$$V_o = \begin{cases} -V_s, & \text{jika } g_3 \text{ dan } g_4 \text{ "ON" bersamaan} \\ 0, & \text{lainnya} \end{cases} \quad (1-6)$$

Persamaan (1-5) dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$g_3 = \begin{cases} 1, & \text{jika } M \cdot \sin(\omega t) \geq -\text{sgt}(\omega t) \\ 0, & \text{lainnya} \end{cases} \quad (1-7)$$

Dimana, $M = A_r/A_c$ (1-8)

dengan M = Indeks modulasi

A_r = Amplitudo maksimum sinus

A_c = Amplitudo maksimum

Segitiga

Indeks modulasi adalah perbandingan antara amplitudo maksimum sinus (A_r) dan amplitudo maksimum segitiga (A_c). Berdasarkan persamaan (3) dan (5), maka pembangkitan sinyal PWM *sinusoida* satu phasa dapat dilakukan dengan menggunakan 2 buah sinyal sinus ($\sin(\omega t)$ dan $-\sin(\omega t)$) dan 1 sinyal segitiga. Sedangkan berdasarkan persamaan (3) dan (8), pembangkitan sinyal PWM *sinusoida* satu phasa dapat dilakukan dengan menggunakan 1 sinyal sinus ($\sin(\omega t)$) dan 2 sinyal segitiga ($\text{sgt}(\omega t)$ dan $-\text{sgt}(\omega t)$). Indeks modulasi yang nilainya antara 0 sampai

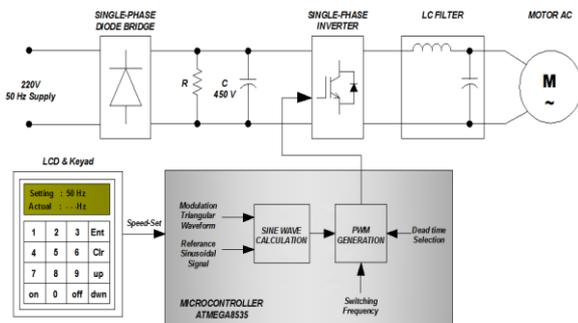
1 akan menentukan lebar pulsa yang akan mengontrol tegangan efektif keluaran. Dan Frekuensi sinyal referensi menentukan.

2. DASAR TEORI

Pada gambar dibawah terlihat bahwa rangkaian dibagi menjadi 2 bagian, yaitu rangkaian kontrol dan rangkaian tenaga atau daya. Bagian yang diblok pada rangkaian kontrol adalah mikrokontroler ATmega8535 yang difungsikan sebagai penghasil signal SPMW (*Sinusoida Pulse Wide Modulation*) *Unipolar*. Pada penelitian ini, rangkaian VFD ini akan diaplikasikan untuk mengatur kecepatan motor AC satu phasa jenis Shaded Pole, kecepatan motor akan diatur secara *close-loop* dengan *feed-back* berupa sensor kecepatan. Untuk *Setting Point* kecepatan dapat di-set melalui tombol kontrol dengan tampilan berupa LCD 16x2, tombol "Inc" dan "Dec" untuk menaikkan dan menurunkan *Setting Point* kecepatan. Pada aplikasi ini diharapkan bahwa kecepatan dari motor AC satu phasa dapat mengikuti atau sesuai dengan *setting point* kecepatan yang diinginkan. Jika tombol "Start" ditekan diharapkan motor akan mulai berputar sampai mencapai kecepatan yang telah ditentukan, dan jika tombol "Stop" ditekan motor akan berhenti berputar. Agar kecepatan motor AC sesuai dengan *setting point* kecepatan yang diinginkan yang atur-atur adalah frekuensi dan tegangan dari *supply* motor.

Pada rangkaian tenaga atau daya terdiri dari rangkaian penyearah atau *rectifier* (*AC To DC Converter*) satu phasa, rangkaian *filter*, dan rangkaian *Inverter* (*DC To AC Converter*) satu phasa. Rangkaian *rectifier* berfungsi sebagai rangkaian penyearah, mengubah tegangan AC menjadi tegangan DC, menggunakan penyearah gelombang penuh (*full-wave rectifier*). Setelah rangkaian penyearah terdapat rangkaian *filter* kapasitor (*C filter*) yang fungsinya untuk membatasi riak/ripel pada tegangan keluaran dari rangkaian penyearah gelombang penuh yang kemudian akan menjadi inputan dari rangkaian *Inverter*. Rangkaian *inverter*

berfungsi untuk mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC dengan frekuensi dan tegangan keluaran yang dapat dirubah-ubah. Setelah rangkaian *inverter* dipasang sebuah rangkaian *filter* pasif, yang fungsinya untuk meredam frekuensi harmonisa, perlunya pemasangan *filter* pasif ini dikarenakan keluaran AC yang diinginkan adalah mendekati sinusoida murni, dan sinusoida murni akan menjadi cacat akibat distorsi harmonisa. Sebelum masuk ke rangkaian penyearah dipasang sebuah resistor yang diparalel dengan kontak relay yang terkendali sebagai fungsi memperkecil arus start, merupakan pembatas arus pada saat pengoperasian awal jika rangkaian telah terhubung dengan beban.



Gambar 4. Blok diagram sistem

3. HASIL DAN DISKUSI

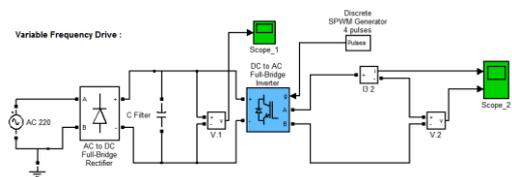
3.1. Simulasi

Rangkaian akan disimulasikan dengan menggunakan Simulink dari *software* Matlab, untuk melihat sinyal keluaran dari masing- masing bagian dari rangkaian tenaga. Kondisi pengujian untuk simulasi dan percobaan adalah sbb:

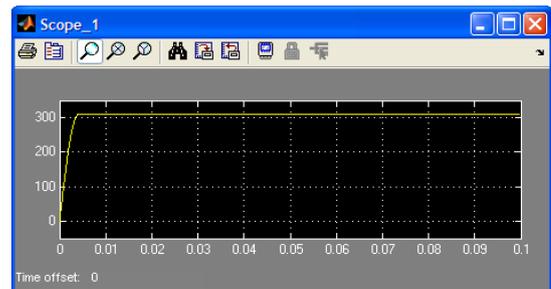
- | | |
|------------------------|-----------------------|
| $V_{line} = 220$ Volt. | $C_{dc} = 1000$ uF. |
| $L_{filter} = 2$ mH. | $C_{filter} = 6$ uF. |
| $M = 0,9$. | $F_{ref} = 50$ Hz. |
| $F_{carier} = 1$ KHz. | $R_{Beban} = 220$ Ohm |
| $L_{Beban} = 2$ mH. | |

Hasil simulasi yang akan ditampilkan mulai dari rangkaian PFD tanpa beban, kemudian dengan beban resistif dan dengan beban induktif.

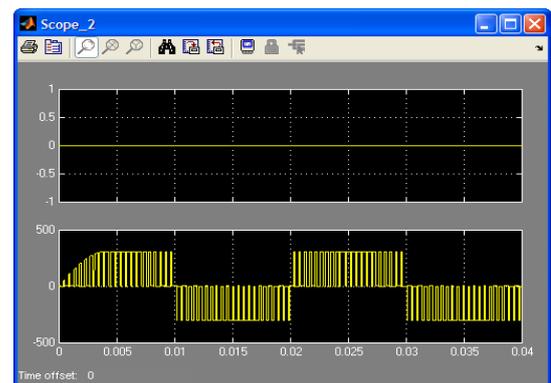
a. Simulasi rangkaian PFD Tanpa beban



Gambar 5. Simulasi sistem tanpa beban.

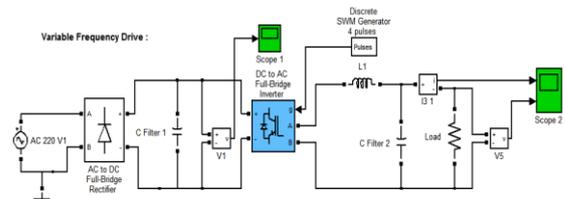


Gambar 6. Keluaran pada Scope_1 (tanpa beban).

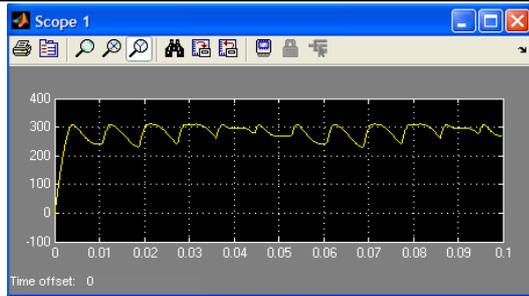


Gambar 7. Keluaran pada Scope_2 (tanpa beban).

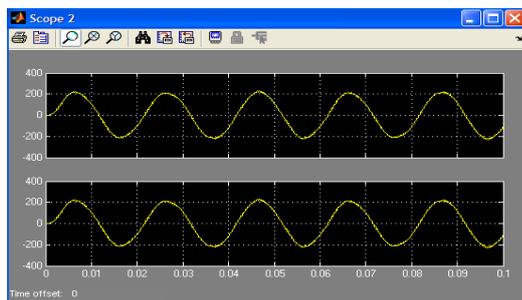
b. Simulasi rangkaian PFD dengan beban Resistif



Gambar 8. Simulasi sistem dengan beban Resistif.

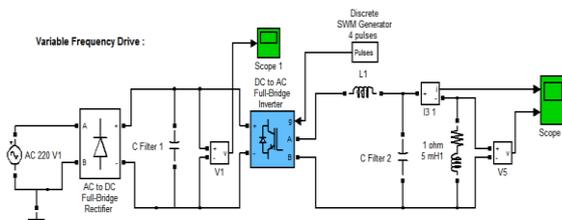


Gambar 9. Sinyal keluaran pada scope 1 untuk beban Resistif.

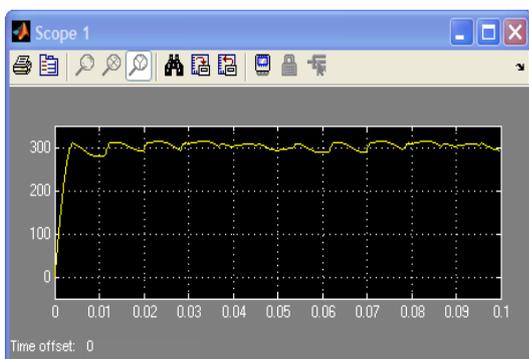


Gambar 10. Sinyal keluaran pada scope 2 untuk beban Resistif.

c. Simulasi rangkaian PFD dengan beban Induktif

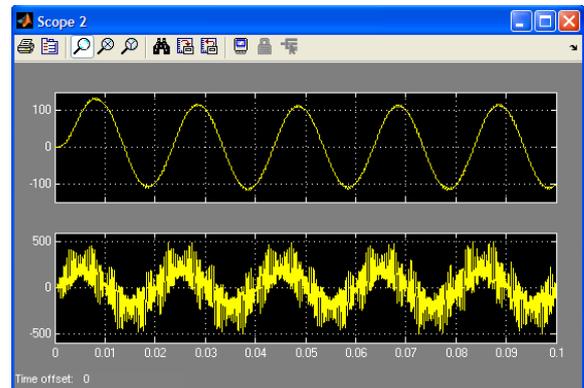


Gambar 11. Simulasi sistem dengan beban induktif.



Gambar 12. Sinyal keluaran pada scope 1 untuk beban induktif.

Beban induktif pada gambar di atas akibat penggunaan rangkaian inductor pada beban.

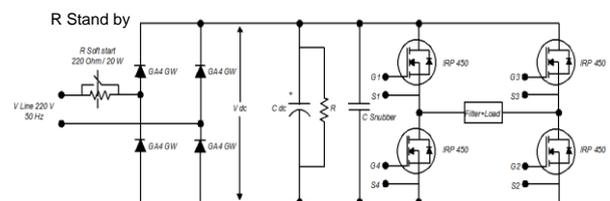


Gambar 13. Sinyal keluaran pada scope 2 untuk beban induktif.

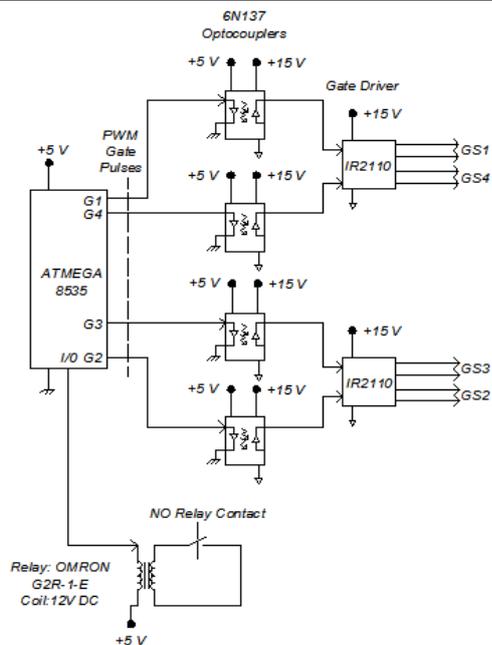
Dapat dilihat sinyal keluaran pada tampilan osiloskop scope 2 sinyal sinusoidal tampak sesuai dengan frekuensi yang diinginkan

3.2. Implementasi

Scematic Diagram diperlihatkan pada Gambar 14. untuk rangkaian power, dan Gambar 15. untuk rangkaian kontrol yang terdiri dari rangkaian mikrokontroler dan rangkaian driver MOSFET. Pada rangkaian power terlihat menggunakan *Full-Bridge Rectifier*, *Filter Capacitor*, dan *Full-Bridge Inverter*. Untuk rangkaian kontrol, menggunakan mikrokontroler ATmega 8535 sebagai pembangkit PWM, dan untuk pengaman rangkaian digunakan *optocoupler* type 6N136 yang merupakan jenis sensor *high speed optocoupler*. Untuk driver MOSFET digunakan IC IR2110 *High and Low Side MOSFET Driver*.



Gambar 14. Skematik diagram rangkaian Tenaga



Gambar 15. Blok diagram rangkaian Driver Mosfet.

Foto untuk setiap bagian dari rangkaian *Variable Frequency Drive* diperlihatkan pada gambar berikut ini :



Gambar 16. Foto rangkaian Tenaga

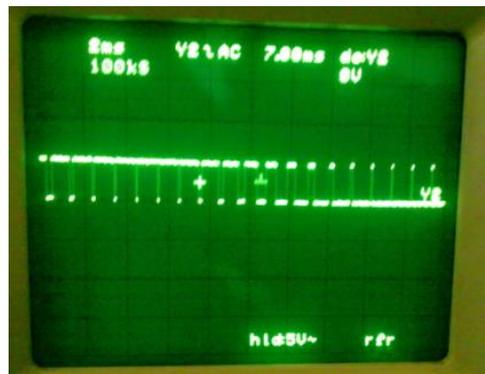


Gambar 17. Foto Rangkaian Kontrol

3.3.Pengujian

Pada tahap pertama ini dilakukan pengujian keluaran pada pin OC mikrokontroler, yang akan mengeluarkan *Sinusoida Pulse Width Modulation*, merupakan hasil perbandingan antara gelombang segitiga yang dihasilkan oleh timer *Counter-up* dan *Counter-down (Mode Phase Correct)* dengan frekuensi osilator yang dipilih adalah 4 Mhz dengan prescale 8, yang akan menghasilkan sfrekuensi sinyal segitiga (*carrier*) ± 1 Khz, gelombang segitiga ini dibandingkan dengan sinyal sinus (referensi) yang dihasilkan secara pemrograman dengan menggunakan *Sinetable* yang sudah dicari, yaitu dengan index modulasi $M=0,9$.

```
const int sinewave[] =
{0x80, 0x83, 0x86, 0x89, 0x8C, 0x8E, 0x91,
0x94, 0x97, 0x9A, 0x9D, 0x9F, 0xA2, 0xA5,
0xA8, 0xAA, 0xAD, 0xB0, 0xB2, 0xB5,
0xB7, 0xBA, 0xBC, 0xBF, 0xC1, 0xC4,
0xC6, 0xC8, 0xCA, 0xCD, 0xCF, 0xD1,
0xD3, 0xD5, 0xD7, 0xD9, 0xDA, 0xDC,
0xDE, 0xE0, 0xE1, 0xE3, 0xE4, 0xE5, 0xE7,
0xE8, 0xE9, 0xEA, 0xEB, 0xEC, 0xED,
0xEE, 0xEF, 0xF0, 0xF0, 0xF1, 0xF1, 0xF2,
0xF2, 0xF3, 0xF3, 0xF3, 0xF3, 0xF3, 0xF3,
0xF3, 0xF3, 0xF3, 0xF3, 0xF3, 0xF2, 0xF2,
0xF1, 0xF1, 0xF0, 0xF0, 0xEF, 0xEE, 0xED,
.....0x7D }
```



Gambar 18. Foto sinyal keluaran pada pin OC0 (SPWM)

Gambar 18. merupakan hasil dari SPWM yang telah dibuat dengan frekuensi sinyal referensi 50Hz.

Pada pengujian rangkain *driver* MOSFET, dilakukan pengukuran pada tegangan keluaran *Optocoupler* 6N136 (Lihat pada Gambar 15.) yang merupakan *Logic Input* (HIN & LIN) untuk MOSFET *Driver* IR2110, dan juga dilakukan pengukuran tegangan keluaran dari MOSFET *Driver* IR2110 (HO & LO), dengan masukan berupa *logic Low* (0 Volt) dan *High* (± 5 Volt). Berikut hasil pengukurannya.

Tabel 2. Tegangan Keluaran Optocoupler dan keluaran IC Gate Driver IR2110

No	Input (Volt)	Output Optocoupler (Volt)	Output IR210 (Volt)
1	0,12	11,78	11,94
2	4,95	0,13	0,12

Pengujian di lakukan 2 kali seperti pada Tabel 2 dikarenakan untuk mendapatkan nilai pada logic low dan logic high dimana output optocoupler berbanding terbalik hal ini dilakukan untuk menguji kinerja pada sensor tersebut, sedangkan untuk pengujian pada rangkaian tenaga, dilakukan pengukuran pada masing-masing blok rangkaian. Pengukuran dilakukan secara bertahap mulai dari pengukuran rangkaian *Rectifier*, kemudian pengukuran keluaran rangkaian *C filter*, dan pengukuran terhadap keluaran dari rangkaian *Inverter*.

Pada rangkaian FVD digunakan *Full-Bridge Rectifier*, berikut adalah hasil pengukuran dari keluaran blok rangkaian *rectifier*. Tegangan keluaran (Vdc) yang diukur berdasarkan tegangan masukan (Vs) yang bervariasi (*Variable*). Tegangan keluaran Vdc yang didapat dari hasil pengukuran akan dibandingkan dengan tegangan Vdc berdasarkan perhitungan secara teori.

Tabel 3. Tegangan keluaran (Vdc) rangkaian *Rectifier*.

No	Vs (Volt)	VDC (Volt) Pengukuran	VDC (Volt) Teori	%Kesalahan
1	0	0	0	0
2	20	17,2	17,98	4,53
3	40	35,5	35,96	1,30
4	60	53,8	53,94	0,26
5	80	71,8	71,92	0,17
6	100	89,7	89,9	0,22
7	120	107,7	107,88	0,17
8	140	125,6	125,86	0,21
9	160	143,5	143,84	0,24
10	180	161,5	161,82	0,20
11	200	181	179,8	0,66
12	220	199	197,78	0,61

Untuk memperkecil ripel atau riak pada tegangan DC keluaran dari rangkaian *Rectifier*, dipasang sebuah rangkaian *C filter*. Dengan nilai Capacitor yaitu 990 uF dengan tegangan kerja sebesar 400 Volt. Berikut adalah tegangan keluaran Vdc setelah melewati rangkaian *C filter*. Hasil pengukuran akan dibandingkan dengan hasil perhitungan.

Tabel 4. Tegangan keluaran (Vdc) setelah rangkaian *C Filter*.

No	Vs (Volt)	VDC (Volt) Pengukuran	VDC (Volt) Teori	%Kesalahan
1	0	0	0	0
2	20	27,3	28,28	3,61
3	40	53,9	56,57	4,95
4	60	81,1	84,85	4,63
5	80	108,4	113,14	4,37
6	100	135,6	141,42	4,29
7	120	163,2	169,71	3,99
8	140	190,3	197,99	4,04
9	160	217	226,27	4,27
10	180	245	254,56	3,90
11	200	274	282,84	3,23
12	220	301	311,13	3,36

Untuk pengujian rangkaian inverter Rangkaian VFD diinputkan dengan tegangan AC 220 Volt Rms, dengan frekuensi tetap yaitu 50 Hz, dan untuk frekuensi referensi yang telah ditetapkan dan dapat diatur mulai dari 8 Hz sampai 80Hz, dengan mengatur frekuensi referensi dalam artian disini dengan merubah nilai OCR0 yang akan mempengaruhi *timing* dari *vector interrupt* maka frekuensi keluaran dari rangkaian VFD yang terukur pada keluaran blok rangkaian inverter juga akan berubah-ubah.

Tabel 5. Perubahan Frekuensi keluaran rangkaian VFD terhadap perubahan nilai register OCR0 (referensi)

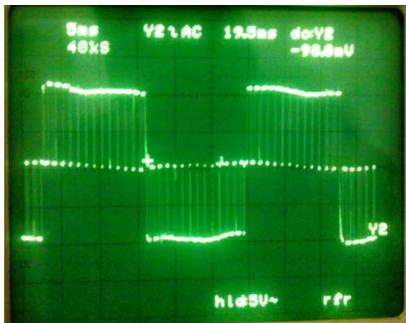
No	Frekuensi keluaran	Periode (s)	OCR	
			Desimal	Hexa
1	8	0,125	235	EB
2	9	0,111	205	CD
3	10	0,100	192	C0
4	11	0,091	170	AA
5	12	0,083	157	9D
6	13	0,077	149	95
7	14	0,071	131	83
8	15	0,067	127	7F
9	16	0,063	120	78
10	17	0,059	111	6F
11	18	0,056	107	6B
12	19	0,053	103	67
13	20	0,050	97	61
14	21	0,048	92	5C
15	22	0,045	87	57
16	23	0,043	83	53
17	24	0,042	80	50
18	25	0,040	77	4D
19	26	0,038	74	4A
20	27	0,037	70	46
21	28	0,036	68	44
22	29	0,034	65	41
23	30	0,033	63	3F
24	31	0,032	60	3C
25	32	0,031	58	3A
26	33	0,030	57	39
27	34	0,029	55	37
28	35	0,029	54	36
29	36	0,028	51	33
30	37	0,027	50	32

31	38	0,026	49	31
32	39	0,026	48	30
33	40	0,025	47	2F
34	41	0,024	46	2E
35	42	0,024	45	2D
36	43	0,023	44	2C
37	44	0,023	43	2B
38	45	0,022	42	2A
39	46	0,022	41	29
40	47	0,021	40	28
41	48	0,021	39	27
42	49	0,020	38	26
43	50	0,020	37	25
44	51	0,020	36	24
45	52	0,019	35	23
46	53	0,019	35	23
47	54	0,019	34	22
48	55	0,018	33	21
49	56	0,018	33	21
50	57	0,018	32	20
51	58	0,017	31	1F
52	59	0,017	31	1F
53	60	0,017	30	1E
54	61	0,016	30	1E
55	62	0,016	30	1E
56	63	0,016	29	1D
57	64	0,016	29	1D
58	65	0,015	29	1D
59	66	0,015	28	1C
60	67	0,015	28	1C
61	68	0,015	28	1C
62	69	0,014	27	1B
63	70	0,014	27	1B
64	71	0,014	27	1B
65	72	0,014	26	1A
66	73	0,014	26	1A
67	74	0,014	26	1A
68	75	0,013	25	19
69	76	0,013	25	19
70	77	0,013	24	18
71	78	0,013	24	18
72	79	0,013	24	18
73	80	0,013	23	17

Jadi dari hasil pengukuran yang telah dilakukan antara perubahan frekuensi keluaran *Inverter* terhadap perubahan nilai OCR, jika melakukan *setting point* frekuensi pada harga tertentu yang diinputkan melalui

keypad, nilai *setting point* tersebut ditujukan pada settingan nilai *Output Compare Register 0 (OCR0)* yang sesuai (lihat pada tabel 4.), dalam artian disini data yang tertera pada tabel 1.5 dimasukkan kedalam program.

berikut adalah contoh hasil pengukuran, diukur pada keluaran blok rangkaian *inverter*, pada frekuensi referensi ± 33 Hz dengan tegangan masukan untuk uji coba sebesar 9 Volt AC dengan frekuensi 50 Hz (tegangan jala-jala yang telah diturunkan *amplitude*-nya dengan menggunakan *Voltage divider*) sinyal keluarannya adalah sebagai berikut :

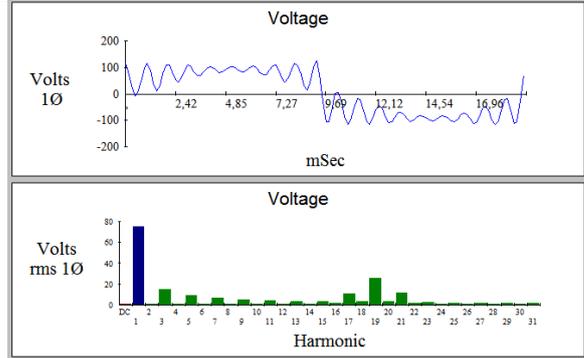


Gambar 19. Tegangan keluaran dari rangkaian VFD

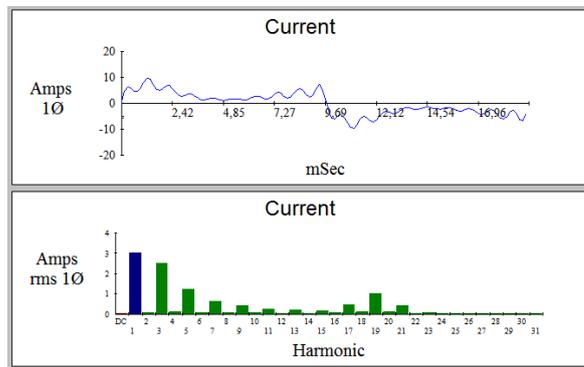
Untuk pengujian rangkaian *filter* akan dibandingkan nilai *Total Harmonic Distortion* Arus dan tegangan sebelum dan sesudah difilter.

Pada hasil perancangan *low-pass filter* dengan komponen pasif L dan C didapat besarnya nilai induktor yaitu 9.4 mH dan besarnya kapasitor yaitu 6,6 uF, rangkaian *Low-pass Filter* ini dipasang pada keluaran rangkaian inverter, sebagai pengujian akan dibandingkan besarnya nilai THD untuk arus dan tegangan keluaran *inverter* sebelum dan sesudah dipasang *filter*, hasil dapat hasil pengukuran. Pengukuran dilakukan pada kondisi *setting point* frekuensi keluaran VFD adalah 50Hz, dihubungkan dengan beban berupa motor kapasitor dengan daya 125 W, dan diukur dengan menggunakan alat ukur Power Harmonics Analyzer.

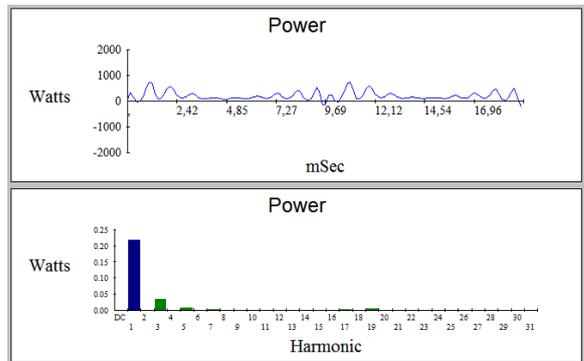
Berikut adalah data hasil pengukuran pada keluaran inverter sebelum dipasang filter.



Gambar 20. Gelombang dan harmonisa tegangan keluaran *inverter* sebelum di-*filter*



Gambar 21. Gelombang dan harmonisa Arus keluaran *inverter* sebelum di-*filter*.



Gambar 22. Gelombang dan harmonisa daya keluaran *inverter* sebelum di-*filter*.

Tabel 6. *Magnitude* tegangan, arus dan daya pada harmonisa yang kurang dari 32 sebelum di pasang filter.

Harmoni cs	Freq.	V Ma g	% V RMS	I Ma g	%I RM S	Power (K W)
DC	0	0,58	0,68	0,004	1,02	0

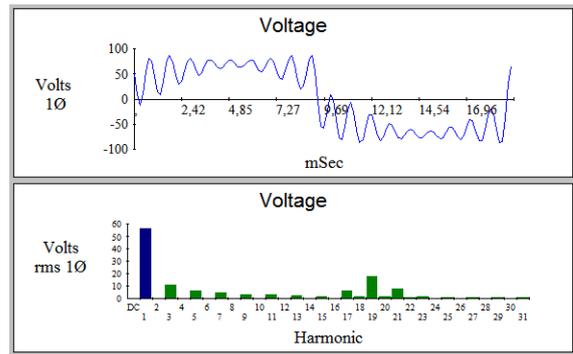
1	51,58	74,98	88,46	0,301	68,43	0,22
2	103,17	0,79	0,93	0,01	2,2	0
3	154,75	14,79	17,45	0,253	57,54	0,04
4	206,33	0,68	0,8	0,012	2,66	0
5	257,92	8,68	10,24	0,124	28,26	0,01
6	309,5	0,76	0,89	0,009	2,05	0
7	361,08	6,14	7,24	0,064	14,67	0
8	412,67	0,7	0,83	0,006	1,48	0
9	464,25	4,82	5,69	0,04	9,08	0
10	515,84	0,81	0,96	0,006	1,36	0
11	567,42	3,84	4,53	0,026	6	0
12	619	0,77	0,9	0,005	1,07	0
13	670,59	3,27	3,86	0,019	4,36	0
14	722,17	0,79	0,93	0,004	0,95	0
15	773,75	3,13	3,7	0,016	3,65	0
16	825,34	1,27	1,5	0,006	1,41	0
17	876,92	10,84	12,78	0,048	11	0
18	928,5	2,89	3,41	0,012	2,76	0
19	980,09	25,84	30,48	0,102	23,14	0
20	1031,67	2,87	3,38	0,011	2,47	0
21	1083,25	11,25	13,27	0,041	9,34	0
22	1134,84	1,4	1,65	0,005	1,12	0
23	1186,42	2,36	2,78	0,008	1,85	0
24	1238	0,75	0,88	0,002	0,54	0
25	1289,59	1,59	1,88	0,005	1,14	0
26	1341,17	0,76	0,89	0,002	0,53	0
27	1392,75	1,42	1,68	0,004	0,99	0
28	1444,34	0,7	0,82	0,002	0,48	0
29	1495,92	1,39	1,64	0,004	0,91	0
30	1547,51	0,7	0,83	0,002	0,47	0
31	1599,09	1,15	1,35	0,003	0,74	0

Tabel 7. THD, frekuensi, tegangan dan arus keluaran *inverter* sebelum dipasang *filter*

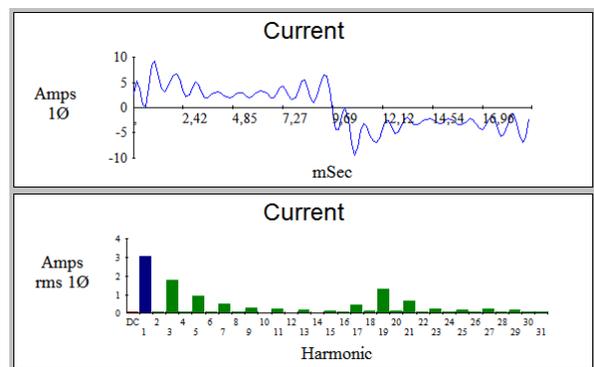
Frequency	51,58
KW	0,27
KVA	0,37
KVAR	0,06
Phase	15° lead
Total PF	0,73

	Voltage	Current
RMS	84,76	0,44
Peak	119,31	0,982
THD Rms	43,9	7,276
THD Fund	48,86	10,606

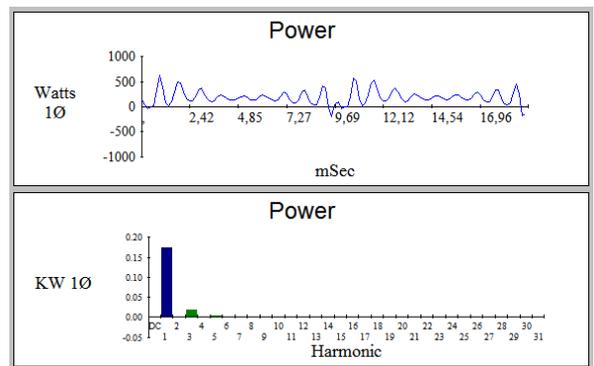
Berikut adalah data hasil pengukuran pada keluaran *inverter* setelah dipasang *filter*.



Gambar 23. Gelombang dan harmonisa tegangan keluaran *inverter* setelah di-*filter*.



Gambar 24. Gelombang dan harmonisa Arus keluaran *inverter* setelah di-*filter*.



Gambar 25. Gelombang dan harmonisa daya keluaran *inverter* setelah di-*filter*.

Tabel 8. magnitude tegangan, arus dan daya pada harmonisa yang kurang dari 32 setelah di pasang filter.

Harm onics	Freq.	V Ma g	%V RM S	I Mag	%I RM S	Po wer (K W)
DC	0	0,29	0,46	0,004	1,1	0
1	51,58	56,55	89,21	0,308	75,56	0,17

2	103,17	0,45	0,71	0,006	1,38	0
3	154,75	10,85	17,12	0,177	43,45	0,02
4	206,33	0,43	0,68	0,007	1,67	0
5	257,92	6,4	10,09	0,09	22,12	0
6	309,5	0,42	0,67	0,005	1,2	0
7	361,08	4,49	7,09	0,047	11,63	0
8	412,67	0,45	0,7	0,004	0,98	0
9	464,25	3,51	5,53	0,031	7,51	0
10	515,84	0,4	0,63	0,003	0,8	0
11	567,42	2,96	4,67	0,023	5,64	0
12	619	0,38	0,6	0,003	0,71	0
13	670,59	2,52	3,98	0,018	4,37	0
14	722,17	0,45	0,7	0,003	0,75	0
15	773,75	2,05	3,24	0,014	3,42	0
16	825,34	0,56	0,89	0,004	0,98	0
17	876,92	6,6	10,42	0,045	11,04	0
18	928,5	1,67	2,64	0,012	2,88	0
19	980,09	18,34	28,93	0,132	32,31	0
20	1031,67	1,89	2,98	0,014	3,53	0
21	1083,25	8,17	12,89	0,068	16,66	0
22	1134,84	0,98	1,54	0,009	2,21	0
23	1186,42	1,91	3,02	0,02	4,98	0
24	1238	0,48	0,76	0,006	1,53	0
25	1289,59	1,16	1,84	0,019	4,74	0
26	1341,17	0,34	0,54	0,008	1,96	0
27	1392,75	0,81	1,28	0,025	6,21	0
28	1444,34	0,32	0,51	0,007	1,82	0
29	1495,92	0,94	1,48	0,015	3,6	0
30	1547,51	0,41	0,64	0,004	1,03	0
31	1599,09	0,91	1,44	0,007	1,76	0

Tabel 9. THD, frekuensi, tegangan dan arus keluaran inverter setelah dipasang *filter*

Frequency	51,58	
KW	0,2	
KVA	0,26	
KVAR	0,02	
Phase	8° lead	
Total PF	0,76	

	Voltage	Current
RMS	63,38	0,408
Peak	88,09	0,962
THD		
Rms	41,72	6,52
THD		
Fund	45,9	8,6

Dari data-data hasil pengukuran keluaran inverter tersebut harmonisa tegangan sebelum di-filter THD-nya adalah

43,9 dan setelah dipasang filter THD turun menjadi 41,72. Dan untuk harmonisa pada arus, THD sebelum di-filter adalah 7,276 dan setelah dipasang filter THD-nya turun menjadi 6,52.

Untuk tegangan keluaran inverter pada frekuensi yang berubah-ubah, berikut adalah tabel hasil pengukuran tegangan keluaran *inverter*, yang diukur pada frekuensi keluaran mulai dari frekuensi terendah sampai frekuensi tertinggi.

Tabel 10. Tegangan keluaran Inverter

No	Frekuensi (Hz)	Tegangan Keluaran (Volt)
1	8	51.6
2	10	55.4
3	20	76.6
4	30	84.5
5	40	84.9
6	50	85.6

Jika dilihat dari tegangan keluaran (Vout rms), semakin kecil nilai frekuensi maka setting point tegangan keluaran akan rendah dan karena nilainya linear terhadap kenaikan nilai frekuensi maka tegangan keluaran juga akan naik, atau dengan kata lain perubahan nilai tegan keluaran berbanding lurus seiring dengan perubahan nilai frekuensi (V/Hz).

4. KESIMPULAN

Kesimpulan dari isi paper adalah sebagai berikut:

1. Sinyal SPWM dibuat dengan membandingkan sinyal referensi sinus dengan sinyal carier yang sudah ditetapkan yaitu 1Khz, untuk membuat sinyal segitiga dengan frekuensi \pm 1Khz adalah dengan menetapkan frekuensi osilator 4 MHz, dengan *prescale* 8 dan dengan mode PWM menggunakan *phase Correct* dan untuk mendapatkan sinyal sinus (referensi) adalah dengan mengakses 256 data *SineTable* mulai dari 0

sampai 255 dengan waktu t_s , t_s pada frekuensi 50Hz adalah 78 us.

2. Frekuensi keluaran yang dapat diatur antara rentang frekuensi antara 8 Hz sampai 80 Hz, dengan error mendekati 0% karena menggunakan sistem *database*, hasil sesuai dengan tabel 3.4. Perubahan Frekuensi keluaran rangkaian VFD terhadap perubahan nilai register OCR0 (referensi)
3. harmonisa tegangan sebelum di-filter THD-nya adalah 43,9 dan setelah dipasang filter THD turun menjadi 41,72. Dan untuk harmonisa pada arus, THD sebelum di-filter adalah 7,276 dan setelah dipasang filter THD-nya turun menjadi 6,52.
4. Perubahan nilai frekuensi keluaran inverter diikuti dengan perubahan nilai tegangan, semakin rendah frekuensi, tegangan keluaran akan menurun, semakin tinggi nilai frekuensi, tegangan keluaran juga akan naik, V/Hz.

- [7] Jos Arrillaga, Bruce C Smith, (1997) *Power Sistem Harmonic Analysis*, Wes Sussex PO19 LUD England.
- [8] International Rectifier ® (2007) *HV Floating MOS-Gate Driver ICs Application Note AN-978 rev. D*. International Rectifier Corporation.
- [9] Doucet Jim, Engleston Dan, Shaw Jeremy (2007) *DC / AC Pure Sine Wave Inverter*. NECAMSID.
- [10] Mc. Graw Hill (2003) *Prinsip-prinsip Elektronika*, Edisi satu, Selemba Teknika.
- [11] Nihal Kularatna, (1998) *Power Electronics Design Handbook Low-Power Components and Applications*, Ebook edition, Butterworth-Heinemann.

5. Daftar pustaka

- [1] Lysbuen.Hjem, (2001) *Lysbuen Project Variable Frequency Drive*.
- [2] Muhamad H.Rashid, (2001) *Power Electronis Handbook*. University Of Florida. Florida
- [3] Barnes.Malcolm, (2003). *Variable Speed Drive and Power Electronics*. MSEE. Australia
- [4] Bejo.Agus, (2008), *Rahasia kemudahan bahasa C dalam mikrokontroler ATmega 8535*. Graha ilmu
- [5] Katupitiya.Dr.Jayantha, (2006) *Interfacing with C++ Programming Real-World Applications*. School of Mechanical and Manufacturing Engineering The University of New South Wales Sydney NSW 2052. Australia
- [6] Lingga Wardana (2006) “Belajar Sendiri Mikrokontroler AVR seri ATmega 8535 Simulasi, Hardware, dan Aplikasi”, ANDI.