

DESAIN DAN IMPLEMENTASI *VOLTAGE-SOURCE INVERTER (VSI) TIGA FASE SINUSOIDAL PULSE-WIDTH MODULATION (SPWM) DENGAN DSPIC30F4011*

Syaoqi Muttaqin^{*)}, Iwan Setiawan, and Mochammad Facta

Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, Semarang
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)}*E-mail: syaoqimuttaqin@gmail.com*

Abstrak

Dewasa ini perhatian khusus diberikan pada inverter dengan kinerja tinggi pada aplikasi elektronika daya. Sinusoidal Pulse-Width Modulation (SPWM) adalah salah satu teknik pensaklaran yang menghasilkan bentuk gelombang keluaran inverter dengan karakteristik mendekati sinusoidal. Pada umumnya, sinyal SPWM tiga fase sulit dibangkitkan secara digital, karena keterbatasan fitur mikrokontroler yang ada. DsPIC30f4011 adalah mikrokontroler yang dirancang untuk keperluan pengontrolan motor dengan fitur khusus yang mendukung pembangkitan sinyal SPWM tiga fase, di antaranya pengaturan dead time, complementary mode dan center aligned mode. Penelitian ini merancang dan mengimplementasikan voltage-source inverter (VSI) tiga fase dengan teknik pemucuan SPWM berbasis mikrokontroler 16-bit dsPIC30f4011. Sinyal pembawa dipilih 10 kHz, indeks modulasi (m_a) pada rentang $0 \leq m_a \leq 1$, dan frekuensi sinyal referensi pada rentang 0 – 50 Hz. Hasil pengujian menunjukkan sinyal PWM yang dibangkitkan mikrokontroler sudah sesuai dengan karakteristik SPWM. Bentuk gelombang tegangan keluaran line to line inverter mendekati sinusoidal dengan magnitude yang dapat divariasikan secara linier terhadap indeks modulasi pada rentang frekuensi 0–50Hz. Nilai rasio ketidakseimbangan tegangan (LVUR) dan rasio ketidakseimbangan arus (IUR) yang dihasilkan sudah memenuhi standar NEMA, yaitu dibawah 2%.

Kata kunci : Voltage-Source Inverter (VSI) tiga fasa, SPWM, dsPIC30f4011, LVUR, PVUR, IUR.

Abstract

Nowadays special attention is given to inverters with high performance in power electronics applications. Sinusoidal Pulse-Width Modulation (SPWM) is one of switching technique that produce inverter output waveform with sinusoidal characteristics. In general, digital three-phase SPWM signal is difficult to generate, because of the limitation of common microcontrollers feature. DsPIC30f4011 is a microcontroller that specified for the purpose of controlling motor with special features to support the three-phase SPWM signal generation, including dead time setting, complementary modes and center aligned mode. In this research, three-phase voltage-source inverter (VSI) with SPWM switching technique using 16-bit microcontroller dsPIC30f4011 was designed and implemented. The carrier signal was set 10 kHz, modulation index (m_a) $0 \leq m_a \leq 1$, and the reference signal frequency was 0 - 50Hz. The experimental results showed that PWM signal generated by microcontroller match with SPWM characteristic. Measured, line to line output voltage waveform of the inverter were almost sinusoidal that can be varied linearly according to the modulation index in the range of $0 \leq m_a \leq 1$ with frequency range in 0-50 Hz. Finally, line voltage unbalance ratio (LVUR) and current unbalance ratio (IUR) generated by circuit meets the NEMA standard, i.e below 2%.

Keywords: Three phase Voltage-Source Inverter (VSI), SPWM, dsPIC30f4011, LVUR, IUR.

1. Pendahuluan

Dewasa ini perhatian khusus diberikan pada inverter dengan performa tinggi untuk melakukan operasi yang “halus” pada aplikasi elektronika daya, dimana pengaturan magnitude dan frekuensi tegangan pada *voltage-source inverter (VSI)* tiga fasa sudah sangat

familiar untuk keperluan industri [1]. *Pulse-width modulation (PWM)* menawarkan metode simpel untuk kontrol digital dalam menghasilkan output analog yang ekuivalen. PWM telah banyak digunakan pada aplikasi *variable speed drive (VSD)*, *power converter* dan *uninterruptable power supply (UPS)* [2]. Sebagian besar UPS yang tersedia secara komersial merupakan *square wave inverter* atau *quasi sine wave inverter* yang

mempunyai konten harmonik tinggi [3]. Teknik pensaklaran terus berkembang hingga saat ini, diantaranya adalah *sinusoidal PWM*, *space vector PWM*, *current tracking PWM*, *harmonic elimination PWM* dan lain – lain. Setiap metode memiliki kelebihan dan kekurangan, namun metode yang paling umum digunakan adalah *sinusoidal PWM* dan *space vector PWM* [4][5].

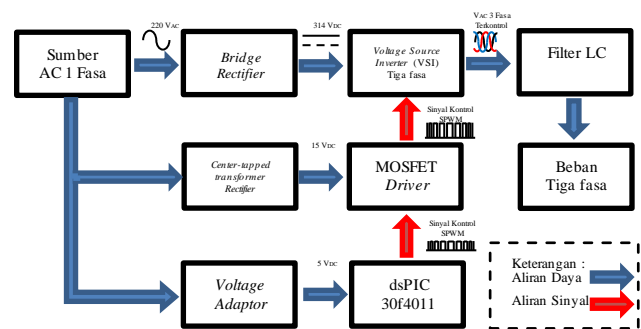
Sinusoidal pulse-width modulation (SPWM) memiliki karakteristik dimana *duty cycle* dari pulsa meningkat secara gradual dan kemudian menurun secara gradual dalam deretan pulsa proporsional terhadap nilai sudut sinus dalam setengah gelombang gelombang sinus [2]. Implementasi sinyal SPWM digital telah banyak digunakan dalam dua dekade terakhir, karena mempunyai ketahanan noise yang tinggi dan tanpa fluktuasi tegangan, jika dibandingkan dengan skema pembangkitan sinyal SPWM analog [2]. Namun, sinyal SPWM tiga fasa secara digital sulit dibangkitkan dengan keterbatasan fitur mikrokontroler yang ada. DsPIC30f4011 adalah mikrokontroler yang terspesifikasi untuk keperluan pengontrolan motor dengan fitur khusus untuk mendukung pembangkitan sinyal SPWM tiga fasa, diantaranya pengaturan *dead time*, *complementary mode* dan *center aligned mode*.

Dalam penelitian ini, dirancang *voltage-source inverter* (VSI) tiga fasa dengan teknik pemicuan SPWM berbasis microcontroller 16-bit dsPIC30f4011. Sinyal *carrier* dirancang pada 10 kHz dengan indeks modulasi (m_a) pada rentang nilai $0 \leq m_a \leq 1$ dan frekuensi sinyal referensi yang dapat diatur pada nilai 0 – 50 Hz. Diharapkan inverter memiliki performa handal dengan efisiensi tinggi dan bentuk output tegangan yang mendekati sinusoidal.

2. Metode

2.1. Perancangan Perangkat Keras (Hardware)

Perancangan VSI tiga fasa SPWM yang dilakukan pada penelitian ini terdiri dari beberapa block utama, yaitu blok rangkaian daya yang terdiri dari *full-wave bridge rectifier* dan inverter tiga fasa, blok rangkaian kontrol yang terdiri dari mikrokontroler 16-bit dsPIC30f4011 dan MOSFET Driver serta blok filter LC dan beban. Diagram blok perangkat keras yang dirancang pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1.



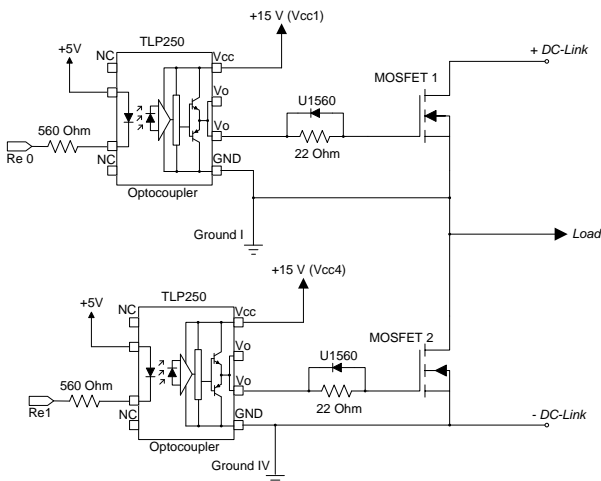
Gambar 1. Blok Diagram Alat

Spesifikasi VSI tiga fasa SPWM berdasarkan Gambar 1 yang dirancang pada penelitian ini dijelaskan sebagai berikut :

1. Sumber tegangan arus bolak – balik 1 fasa digunakan untuk mensuplai rangkaian daya dan rangkaian kontrol.
2. Mikrokontroler 16-Bit dsPIC30f4011 digunakan untuk membangkitkan sinyal kontrol pemicuan SPWM, karena memiliki fitur yang sesuai untuk kebutuhan pembangkitan sinyal SPWM tiga fasa.
3. Potensiometer digunakan untuk mengatur frekuensi sinyal referensi dan indeks modulasi melalui pembacaan ADC10bit.
4. TLP250 digunakan sebagai MOSFET Driver, karena memiliki delay on dan delay off yang singkat.
5. Topologi inverter tiga fasa yang dirancang adalah *voltage-source inverter* (VSI) tiga fasa, yang terdiri dari 6 buah MOSFET tipe IRF460.
6. Blok beban yang digunakan dalam perancangan penelitian ini adalah berupa beban R (200Ohm) dan R(200 Ohm) + L(200μH). Filter LC yang digunakan mempunyai nilai induktor (L = 10mH) dan kapasitor (C = 20μF).

2.2. MOSFET Driver

Rangkaian TLP 250 digunakan untuk mengisolasi dan menguatkan sinyal SPWM level tegangan 5 volt yang dibangkitkan dsPIC30f4011 menjadi level tegangan yang lebih tinggi dengan sistem ground terpisah (15 V), sehingga cukup untuk memicu MOSFET sebagai *driver* [6,7,8].

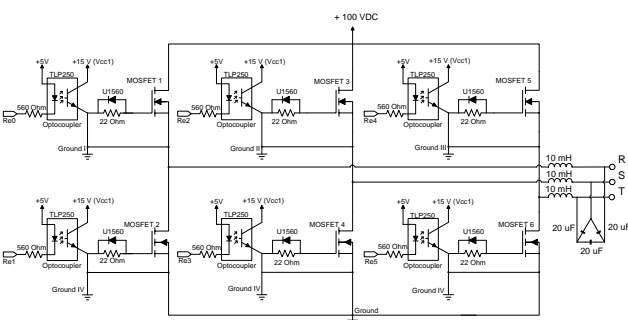


Gambar 3. Rangkaian MOSFET Driver TLP250

MOSFET sisi atas (*high-side*) terhubung dengan optocoupler yang memiliki suplai DC terpisah dengan fasa lain dan MOSFET Driver sisi *low*, sedangkan MOSFET pada sisi bawah (*low-side*) terhubung dengan rangkaian optocoupler yang memiliki titik referensi *ground* yang sama dengan MOSFET Driver sisi *low* pada fasa yang lain.

2.3. Voltage-Source Inverter (VSI) 3 Fasa

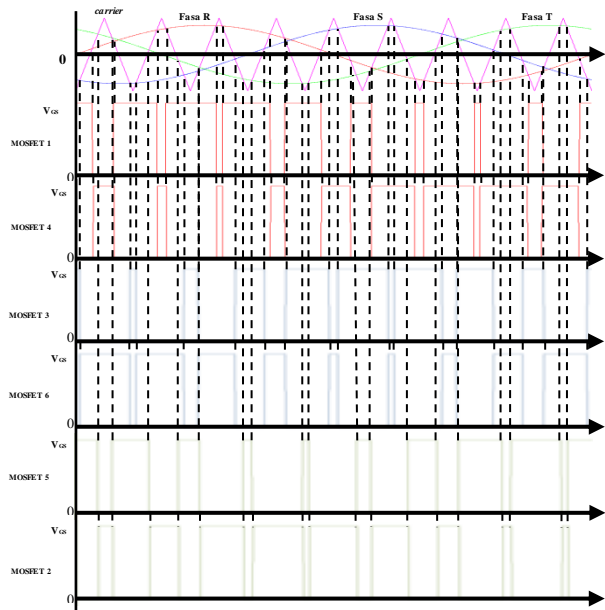
Inverter tiga fasa yang dirancang dalam penelitian ini menggunakan topologi *voltage-source inverter* (VSI), dimana nilai frekuensi dan fasa tegangan outputnya dapat diatur secara independen, sedangkan arus yang ditarik dari sumber dipengaruhi oleh besar beban [9]. Digunakan 6 buah MOSFET tipe IRF460 dengan 2 MOSFET pada tiap *leg* atau fasanya. Pada sisi output dipasang filter LC ($L=10\text{mH}$, $C=20\mu\text{F}$) [10,11]. Rangkaian VSI tiga fasa ditunjukkan pada Gambar 4 [12].



Gambar 4. Rangkaian VSI tiga fasa

2.4. Skema SPWM Unipolar Tiga Fasa

Gelombang pemucuan SPWM *unipolar* untuk pemucuan *voltage-source inverter* (VSI) tiga fasa diperoleh dengan membandingkan sinyal segitiga (sinyal *carrier*) dengan tiga buah sinyal sinusoidal yang masing – masing berbeda fasa 120° sebagai sinyal referensi sebagaimana diilustrasikan dalam Gambar 5.

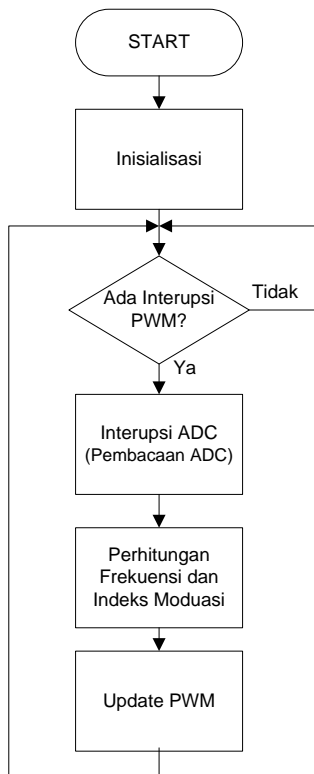


Gambar 5. Sinusoidal Pulse-Width Modulation (SPWM)

Frekuensi sinyal *carrier* dikehendaki 10 kHz dengan frekuensi sinyal referensi dapat diatur pada nilai 0 – 50 Hz. Nilai m_a (*amplitude modulation ratio*) sebagai perbandingan amplitudo sinyal referensi dengan amplitudo sinyal *carrier* dijaga agar tidak lebih besar dari 1, sehingga tidak terjadi *overmodulation* dan dapat diatur pada rentang nilai $0 \leq m_a \leq 1$.

2.5. Program SPWM Unipolar Tiga Fase

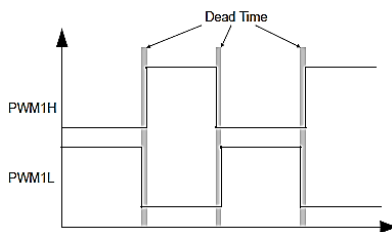
Proses pembangkitan sinyal SPWM *unipolar* tiga fasa diawali dengan inisialisasi dan deklarasi variabel yang akan terlibat dalam proses. Sinyal SPWM yang dikehendaki dibentuk dari proses normalisasi dan proses perhitungan matematis dengan sinyal *carrier* 10kHz. *Flowchart* program pembangkitan SPWM *unipolar* ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Flowchart program SPWM

2.5.1. Inisialisasi Modul PWM

Modul PWM dikonfigurasi agar bekerja dalam *complementary mode*, sehingga *dead time* sebesar 1µs dapat dimasukkan diantara PWMxH dan PWMxL sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 7.



Gambar 7. Dead time PWMxH dan PWMxL

Konfigurasi modul PWM dan *dead time* dilakukan sebagai berikut:

```

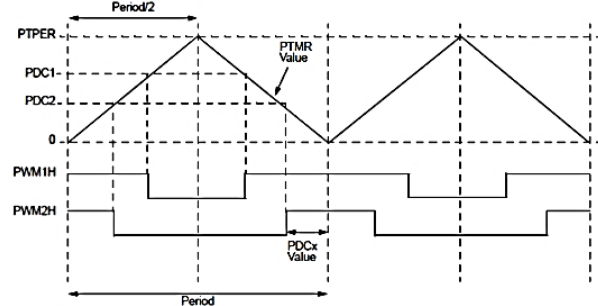
...
DTCON1 = 0x0014; // Dead time 1µs
PWMCON1 = 0x0077; // Complementary mode
...
  
```

Nilai *dead time* yang dimasukkan dalam register DTCON1 diperoleh berdasarkan Persamaan 1 berikut [14]:

$$DT = \frac{\text{Dead Time}}{\text{Prescale Value} \cdot T_{CY}} \quad (1)$$

Output PWM disetting agar bekerja pada *center-aligned mode* dengan *up/down counting mode* yang diilustrasikan

pada Gambar 8. Dalam *center-aligned mode*, ketika nilai PDCx berbeda maka lebar pulsa “on” PWM akan berbeda pula. Pada *Up/Down counting mode* interupsi terjadi setiap nilai register PTMR bernilai nol dan PWM Time Base akan mulai menghitung keatas menuju nilai maksimum, kemudian saat PTMR telah mencapai nilai maksimum PTPER, PWM Time Base akan mulai menghitung ke arah bawah menuju nilai minimum [14].



Gambar 8. Diagram PWM center-aligned mode

Konfigurasi output PWM dilakukan sebagai berikut :

```

...
PTCON = 0x8002; // Center-aligned mode
// Up/Down counting mode
...
  
```

Sinyal *carrier* dikehendaki dengan frekuensi 10 kHz dikonfigurasi dengan memasukkan nilai tertentu pada register PTPER yang akan menghitung dengan *up/down counting mode*. Konfigurasi sinyal *carrier* dilakukan sebagai berikut :

```

...
PTPER = 999; // Sinyal carrier 10 kHz
...
  
```

Nilai 999 diperoleh dari Persamaan 2 yang ada pada datasheet dsPIC30f4011 [14].

$$PTPER = \frac{F_{CY}}{F_{PWM} \cdot (PTMR \text{ Prescaler}) \cdot 2} - 1 \quad (2)$$

Pada kondisi awal sinyal referensi diinisialisasi berada pada nilai tengah sinyal *carrier*, sehingga dilakukan konfigurasi sebagai berikut :

```

...
PDC1 = PTPER/2; // Sinyal referensi 1
PDC2 = PTPER/2; // Sinyal referensi 2
PDC3 = PTPER/2; // Sinyal referensi 3
...
  
```

Interupsi ADC dipicu oleh modul PWM dengan frekuensi 5 kHz (setiap 0.0002 sekon) untuk proses update nilai frekuensi dan indeks modulasi.

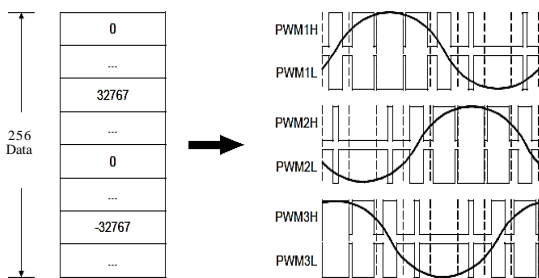
```

...
SEVTCMP = 1; // Enable trigger ADC
PWMCON2 = 0x0102; // 2 postscaller, untuk interupsi DC setiap 0.0002 sekon
...
  
```

Konfigurasi yang telah dilakukan disimpan dalam sebuah fungsi tertentu yang akan dipanggil dalam main program.

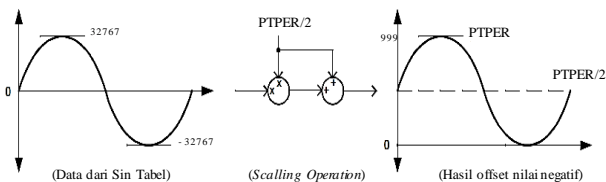
2.5.2. Pembentukan Sinyal SPWM

Sinyal SPWM dibentuk dengan metode *look-up table*. Tabel memuat sinyal referensi sinusoidal tiga fase dengan 256 data *signed-integer*. Beda fase 120° dihasilkan dengan mengatur pencuplikan data tabel. Pointer dengan sudut fase 0° mencuplik *array* dari data ke nol. Pencuplikan yang dimulai dari data ke 85 menghasilkan *offset* 120° dan data ke 170 menghasilkan *offset* 240° sebagaimana diilustrasikan Gambar 9.



Gambar 9. Sinyal sinusoidal tiga fase dengan *look-up table*

Sinyal referensi yang memiliki nilai maksimum 32767 dan nilai minimum -32767 dinormalisasi terhadap sinyal *carrier* dengan nilai maksimum 999 dan nilai minimum 0. Proses normalisasi menghasilkan *offset* dari nilai negatif sinyal referensi, sehingga dapat dibandingkan dengan sinyal *carrier* sebagaimana diilustrasikan Gambar 10.



Gambar 10. Proses normalisasi sinyal referensi

Pengaturan frekuensi dilakukan melalui perkalian fraksional nilai pembacaan ADC terhadap variabel K_DELTA_THETA sebagai basis nilai frekuensi 50 Hz untuk mengatur kecepatan pointer dalam mengakses data dalam tabel sin. Nilai K_DELTA_THETA diperoleh melalui pendekatan dengan metode *backward euler*. Nilai perubahan theta persatuan waktu dalam basis ($\Delta\theta_{base}$) dapat dihitung dengan Persamaan 3 sebagai berikut :

$$\Delta\theta_{base} = T_s \cdot \frac{OMEGA_{BASE}}{THETA_{BASE}}$$

(3)

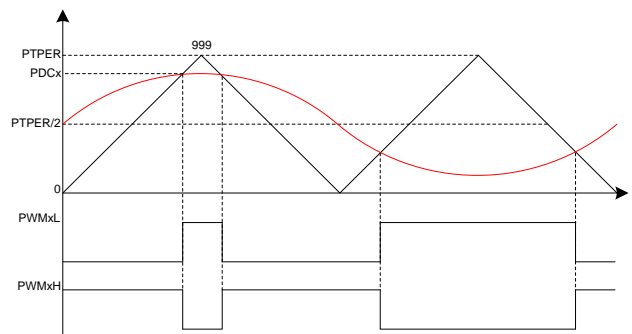
$$\Delta\theta_{base} = 0,0002 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ rad/s} / 2 \cdot \pi$$

$$\Delta\theta_{base} = 0,01$$

Nilai $\Delta\theta_{base}$ dideklarasikan dalam variabel K_DELTA_THETA sebagai basis pengaturan frekuensi.

...
 $K_DELTA_THETA = 655; \quad // 0,01 \cdot 65536 \approx 655$
 ...

Pengaturan indeks modulasi dilakukan dengan perkalian fraksional nilai data dalam sin tabel dengan hasil pembacaan ADC, sehingga diperoleh rentang pengaturan $0 \leq m_a \leq 1$. Nilai hasil perkalian dan normalisasi sinyal referensi disimpan dalam register $PDCx$ untuk dikomparasikan dengan nilai $PTPER$ sebagai sinyal *carrier*, sebagaimana diilustrasikan dalam Gambar 11 berikut :



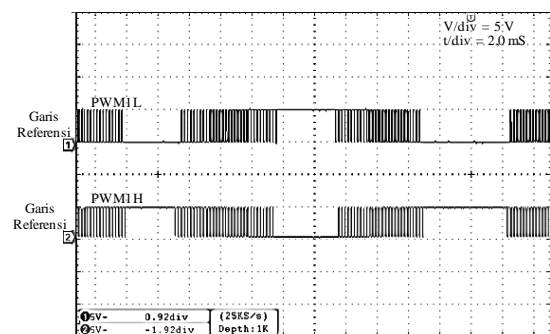
Gambar 11. Komparasi sinyal referensi dengan *carrier*

Sinyal SPWM yang terbentuk terus diperbaharui berdasarkan nilai ADC potensiometer pengatur frekuensi dan indeks modulasi yang terus diambil setiap 0,2 ms pada interupsi ADC yang dipicu oleh modul PWM.

3. Hasil dan Analisa

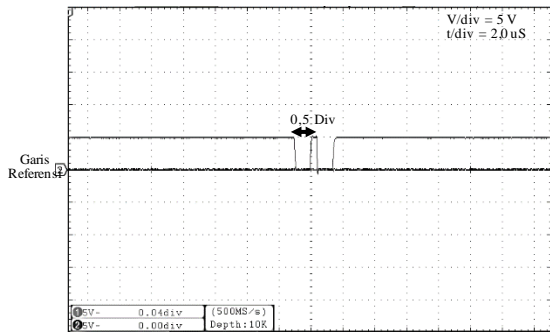
3.1. Sinyal Kontrol SPWM dsPIC30f4011

Gambar 12 menunjukkan output pin PWM PWM1L dan PWM1H yang bekerja secara komplementer. Pengamatan dilakukan pada $v/div = 5V$ dan $t/div = 2,0 \text{ ms}$, diperoleh sinyal SPWM dengan level tegangan 5V.



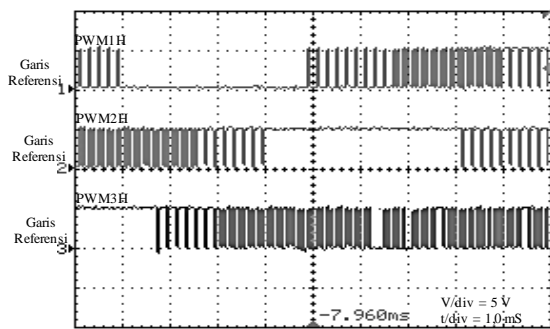
Gambar 12. Output PWM1L dan PWM1H

Gambar 13 menunjukkan hasil pengujian *dead time* antara PWM1L dengan PWM1H. PWM1L adalah sinyal pemicuan *leg* 1 sisi *low* dan PWM1H adalah sinyal pemicuan *leg* 1 sisi *high*. Pengamatan dilakukan pada $v/div = 5V$ dan $t/div = 2,0 \text{ uS}$, diperoleh *dead time* yang teramati sebesar 1uS.



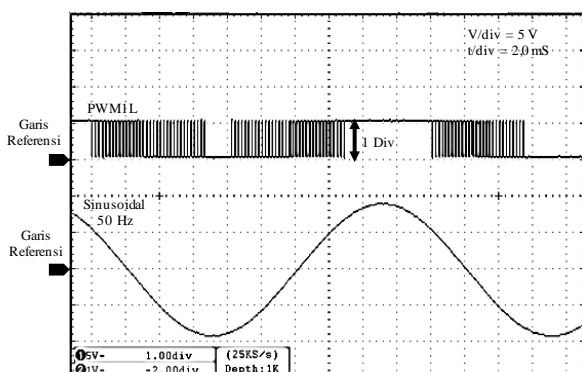
Gambar 13. Dead time PWM1L dan PWM1H

Gambar 14 menunjukkan hasil pengujian beda fase yang terbentuk antara PWM1H, PWM2H dan PWM3H. Pengamatan dilakukan pada $v/div = 5V$ dan $t/div = 1,0$ mS, diperoleh pola sinyal yang saling berbeda fase 120° .



Gambar 14. Beda fase 120° PWM1H, PWM2H dan PWM3H

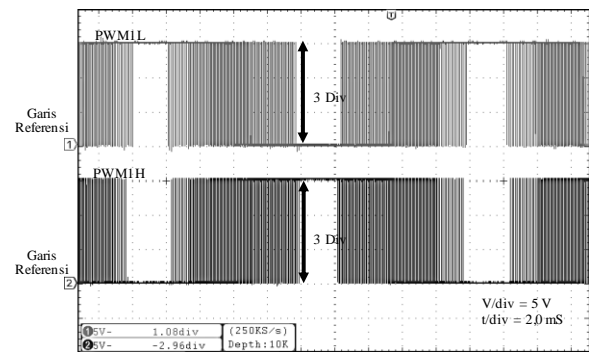
Gambar 15 menunjukkan sinyal SPWM dengan frekuensi referensi 50 Hz. Pengamatan dilakukan pada $v/div = 5V$ dan $t/div = 2,0$ ms dengan membandingkan sinyal SPWM output dsPIC30f4011 dengan gelombang keluaran AFG. Diperoleh, sinyal SPWM dengan pola yang sudah sesuai dengan gelombang sinusoidal 50 Hz.



Gambar 15. PWM1L 50 Hz

3.2. MOSFET Driver

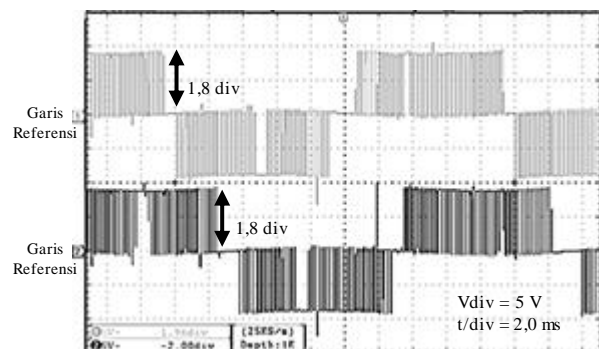
Gambar 16 menunjukkan sinyal output *optocoupler* TLP250 PWM1L dan PWM1H. Pengamatan dilakukan dengan nilai $v/div = 5V$ dan $t/div = 2,0$ ms, diperoleh sinyal SPWM dengan level tegangan 15 V. Level tegangan 15 V yang dihasilkan sudah cukup untuk memicu MOSFET IRFP460.



Gambar 16. Output *optocoupler* TLP250 PWM1L & PWM1H

3.3. VSI Tiga Fase

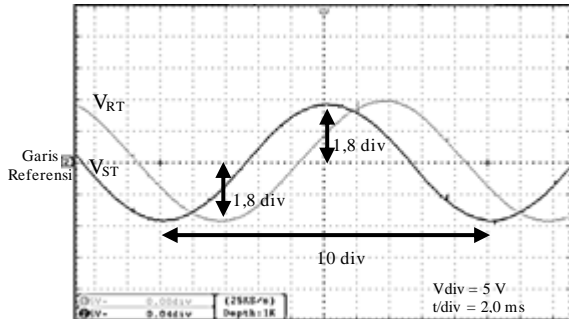
Pengujian output VSI tiga fase SPWM bertujuan untuk mengetahui bentuk gelombang tegangan keluaran yang dihasilkan pada terminal output inverter tiga fase. Tegangan keluaran diamati pada titik sebeum dan setelah filter LC. Output V_{LL} VSI tiga fase sebelum filter LC ditunjukkan pada Gambar 17.



Gambar 17. Output V_{LL} VSI tiga fase sebelum filter LC

Berdasarkan Gambar 17, diperoleh bahwa bentuk gelombang yang teramati sudah menunjukkan karakteristik SPWM *unipolar* [11] dan beda fase 120° . Gelombang output tegangan V_{LL} setelah melalui filter LC ditunjukkan pada Gambar 18.

Berdasarkan Gambar 18, diperoleh bahwa bentuk gelombang yang dihasilkan setelah melalui filter LC sudah berbentuk sinusoidal.



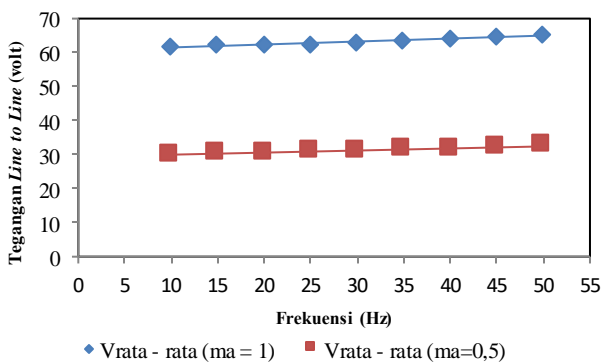
Gambar 18. Output V_{LL} VSI tiga fase setelah filter LC

3.4. Analisis Variasi Indeks Modulasi (m_a) Terhadap Output Tegangan VSI Tiga Fase

Pengujian ini bertujuan untuk melihat karakteristik respon tegangan VSI tiga fase SPWM terhadap pengaturan nilai frekuensi dan indeks modulasi (m_a).

3.4.1. Pengujian Variasi Frekuensi

Pada pengujian variasi frekuensi, pengamatan dilakukan dengan memvariasikan frekuensi pada indeks modulasi tetap. Hasil pengamatan sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 19. Diperoleh bahwa, variasi frekuensi tidak memberikan pengaruh perubahan yang signifikan pada V_{LL} yang cenderung tetap.



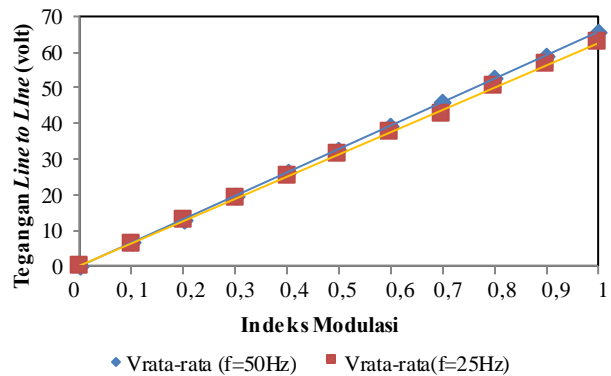
Gambar 19. Grafik $f - V_{LL}$ kondisi tanpa beban

3.4.2. Pengujian Variasi Indeks Modulasi

Pada pengujian variasi indeks modulasi, pengamatan dilakukan dengan memvariasikan indeks modulasi pada frekuensi tetap. Hasil pengukuran sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 20. Diperoleh bahwa nilai V_{LL} naik secara linear terhadap m_a pada rentang nilai $0 \leq m_a \leq 1$. Hubungan tersebut sesuai dengan teori yang direpresentasikan dalam Persamaan 3 [15], dimana nilai

m_a (indeks modulasi) berbanding lurus dengan tegangan output inverter.

$$V_{LL-max} = m_a \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V_{DC} \quad (3)$$



Gambar 20. Grafik $m_a - V_{LL}$ kondisi tanpa beban

3.5. Analisis Pengaruh Variasi Beban

Pada pengujian ini akan diamati rasio ketidak seimbangan tegangan dan arus ketika VSI tiga fase SPWM digunakan untuk mensuplai beban Resistif dan Resistif+Induktif. LVUR didefinisikan sebagai rasio ketidakseimbangan tegangan *line* atau tegangan *line to line* yang didefinisikan oleh NEMA [16] sebagaimana Persamaan 4 berikut :

$$\%LVUR = \frac{(Deviasi V_{LL} maksimum) - (V_{rata-rata})}{(V_{rata-rata})} \cdot 100 \quad (4)$$

IUR didefinisikan sebagai rasio ketidakseimbangan arus *line* sebagaimana Persamaan 5 berikut [17] :

$$\%IUR = \frac{(Deviasi I_L maksimum) - (I_{rata-rata})}{(I_{rata-rata})} \cdot 100 \quad (5)$$

Toleransi rentang batas ketidak seimbangan tegangan yang ditetapkan oleh NEMA adalah 2%, 5%, 10% dan 20% [16].

3.5.1. Beban Resistif (200 Ohm)

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik VSI tiga fase SPWM ketika dibebani beban resistif tiga fase. Beban tiga fase yang digunakan adalah resistor 200Ω yang dihubung bintang tidak diketanahkan. Pengujian dilakukan dengan memvariasikan nilai indeks modulasi pada frekuensi 50 Hz dan 25 Hz. Hasil pengukuran V_{LL} pada beban resistif ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil pengujian V_{LL} beban resistif

m_a	50 Hz				25 Hz			
	V_{RS} (volt)	V_{RT} (volt)	V_{ST} (volt)	LVUR (%)	V_{RS} (volt)	V_{RT} (volt)	V_{ST} (volt)	LVUR (%)
1	64,44	64,25	63,67	0,50	61,59	61,89	61,43	0,41
0.9	57,96	58,1	57,3	0,54	55,73	55,89	55,48	0,34
0.8	51,55	51,65	50,7	0,68	49,27	49,47	49,15	0,35
0.7	45,11	45,17	44,57	0,49	43,11	43,3	42,9	0,46
0.6	38,66	38,6	38	0,62	36,95	37,01	36,63	0,40
0.5	32,22	31,99	31,45	1,05	30,79	30,8	30,5	0,34
0.4	25,77	25,55	25,1	1,16	24,63	24,72	24,47	0,46
0.3	19,33	19,24	18,87	0,96	18,47	18,5	18,33	0,36

Berdasarkan Tabel 1 nilai LVUR ketika inverter mensuplai beban resistif sudah memenuhi standar NEMA, yaitu dibawah 2%. Nilai LVUR terbesar adalah 1,16% ($f = 50$ Hz, $m_a = 0,4$) dan 0,46% ($f = 25$ Hz, $m_a = 0,4$ dan 0,7). Hasil pengukuran arus saluran ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil pengujian arus terhadap variasi indeks modulasi pada beban resistif

m_a	50 Hz				25 Hz			
	I_r (A)	I_s (A)	I_t (A)	IUR %	I_r (A)	I_s (A)	I_t (A)	IUR %
1	0,19	0,20	0,19	3,45	0,19	0,19	0,19	0
0.9	0,17	0,18	0,17	3,85	0,17	0,17	0,17	0
0.8	0,15	0,16	0,15	4,35	0,15	0,15	0,15	0
0.7	0,14	0,14	0,14	0,00	0,14	0,14	0,13	2,44
0.6	0,11	0,12	0,12	2,86	0,12	0,12	0,11	2,86
0.5	0,10	0,10	0,10	0,00	0,10	0,10	0,09	3,45
0.4	0,08	0,08	0,08	0,00	0,08	0,08	0,08	0
0.3	0,06	0,06	0,06	0,00	0,06	0,06	0,06	0

Berdasarkan Tabel 2 didapat ketidakseimbangan arus. Nilai IUR paling besar adalah 4,35% ($f = 50$ Hz, $m_a=0,8$) dan 3,45% pada ($f = 25$ Hz, $m_a = 0,5$). Pada hubung bintang tidak diketanahkan, ketidak seimbangan arus akan memicu ketidakseimbangan tegangan [18], sedangkan nilai LVUR dan PVUR sudah memenuhi standar NEMA, sehingga ketidakseimbangan arus dapat diterima.

3.5.2. Beban Resistif(200 Ohm) + Induktif (200 uH)

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik VSI tiga fase SPWM ketika dibebani beban resistif+induktif tiga fase. Beban tiga fase yang digunakan adalah resistor 200Ω dan induktor 200μH yang dihubung bintang tidak diketanahkan. Pengujian dilakukan dengan memvariasikan nilai indeks modulasi pada frekuensi 50 Hz dan 25 Hz. Hasil pengukuran V_{LL} pada beban resistif ditunjukkan pada Tabel 3.

Berdasarkan Tabel 3 nilai LVUR ketika inverter mensuplai beban resistif sudah memenuhi standar NEMA, yaitu dibawah 2%. Nilai LVUR terbesar adalah 0,81% ($f = 50$ Hz, $m_a = 0,4$) dan 0,52% ($f = 25$ Hz, $m_a = 0,6$). Hasil pengukuran arus saluran ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 3. Hasil pengujian V_{LL} terhadap variasi indeks modulasi pada beban resistif + induktif

m_a	50 Hz				25 Hz			
	V_{RS} (volt)	V_{RT} (volt)	V_{ST} (volt)	LVUR (%)	V_{RS} (volt)	V_{RT} (volt)	V_{ST} (volt)	LVUR (%)
1	64,11	64,39	63,69	0,45	61,45	61,68	61,14	0,42
0.9	57,69	57,7	57,34	0,21	55,3	55,4	54,89	0,37
0.8	51,28	51,33	50,81	0,37	49,16	49,34	48,92	0,41
0.7	44,87	44,9	44,25	0,51	43,02	43,1	42,73	0,35
0.6	38,46	38,36	37,65	0,79	36,87	37,08	36,72	0,52
0.5	32,05	31,8	31,55	0,79	30,73	30,56	30,3	0,10
0.4	25,64	25,56	25,1	0,81	24,58	24,5	24,3	0,16
0.3	19,23	19,2	18,9	0,63	18,43	18,38	18,22	0,20

Tabel 4. Hasil pengukuran arus pada beban resistif + induktif

m_a	50 Hz				25 Hz			
	I_r (A)	I_s (A)	I_t (A)	IUR %	I_r (A)	I_s (A)	I_t (A)	IUR %
1	0,18	0,20	0,19	5,26	0,18	0,19	0,19	1,79
0.9	0,17	0,18	0,17	3,85	0,17	0,17	0,17	0,00
0.8	0,16	0,16	0,16	0,00	0,15	0,15	0,15	0,00
0.7	0,13	0,14	0,13	5,00	0,13	0,13	0,13	0,00
0.6	0,11	0,12	0,11	5,88	0,11	0,11	0,11	0,00
0.5	0,09	0,10	0,10	3,45	0,10	0,10	0,10	0,00
0.4	0,08	0,08	0,08	0,00	0,08	0,08	0,08	0,00
0.3	0,06	0,06	0,06	0,00	0,06	0,06	0,06	0,00

Berdasarkan Tabel 4 didapat ketidakseimbangan arus. Nilai IUR paling besar adalah 5,26% ($f = 50$ Hz, $m_a=1$) dan 1,79% pada ($f = 25$ Hz, $m_a = 1$). Pada hubung bintang tidak diketanahkan, ketidak seimbangan arus akan memicu ketidakseimbangan tegangan [18], sedangkan nilai LVUR dan PVUR sudah memenuhi standar NEMA, sehingga ketidakseimbangan arus dapat diterima.

4. Kesimpulan

Berdasarkan pengukuran dan analisis yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa Voltage-Source Inverter (VSI) tiga fase SPWM telah berhasil direalisasikan dan dapat menghasilkan tegangan keluaran AC tiga fase terkontrol, dengan frekuensi dan magnitude yang dapat diatur. DsPIC30f4011 dapat digunakan dengan baik untuk menghasilkan gelombang pemicuan SPWM *unipolar* pada pensaklaran MOSFET VSI tiga fase SPWM. Diperoleh hasil pengujian, dimana V_{LL} dapat bervariasi secara linear terhadap m_a pada rentang nilai $0 \leq m_a \leq 1$. Variasi frekuensi tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai V_{LL} . Nilai rasio ketidak seimbangan tegangan dan arus LVUR dan IUR yang dihasilkan sudah memenuhi standar NEMA, yaitu dibawah 2%. Pada kondisi beban resistif LVUR terbesar adalah 1,16% ($f=50$ Hz, $m_a=0,4$). Pada kondisi beban resistif+induktif LVUR terbesar adalah 0,81% ($f=50$ Hz, $m_a=0,4$). Untuk pengembangan system dan *hardware* lebih lanjut, maka dapat diberikan saran-saran bahwa penelitian ini dapat dikembangkan lagi dengan menggunakan topologi inverter tiga fase lainnya seperti *current-source inverter* (CSI) serta inverter satu fase seperti *full-bridge*, *half-bridge* dan *push-pull* sesuai dengan kebutuhan. Selain itu, dapat digunakan kontrol

close-loop dengan feedback ke mikrokontroler untuk pengaturan indeks modulasi secara otomatis sehingga diperoleh nilai output tegangan yang dikehendaki. DsPIC30f4011 juga dapat digunakan untuk menghasilkan gelombang pemicuan dengan metode yang lain, seperti Single-PWM, Uniform-PWM, MSPWM dan SVPWM. Analisa harmoisia dan THD juga dapat ditambahkan untuk mengetahui apakah THD yang dihasilkan sudah sesuai standaryang ada.

Referensi

- [1]. M. Islam, N. Raju, and A. Ahmed, "Sinusoidal PWM Signal Generation Technique for Three Phase Voltage Source Inverter with Analog Circuit & Simulation of PWM Inverter for Standalone Load & Micro," *Int. J. Renew. Energy ...*, vol. 3, no. 3, 2013.
- [2]. A. Datta, D. Mukherjee, and H. Saha, "A dsPIC based novel digital sinusoidal pulse-width modulation technique for voltage source inverter applications," *Microprocess. Microsyst.*, vol. 38, no. 7, pp. 649–658, 2014.
- [3]. M. A. Ghalib and Y. S. Abdalla, "Design and Implementation of a Pure Sine Wave Single Phase Inverter for Photovoltaic Applications," *Int. Conf. Informatics, Electron. Vis.*, pp. 1–8, 2013.
- [4]. T. Sutikno and M. Facta, "An Efficient Strategy to Generate High Resolution Three-Phase Pulse Width Modulation Signal Based on Field Programmable Gate Array," *Int. J. Comput. Electr. Eng.*, vol. 2, no. 3, pp. 413–416, 2010.
- [5]. G. Vidyanaagar, "Electrical Engineering Development and Implementation of Spwm Logic Using Dspic33Fj16Gs402 for Three," *JIKREE*, pp. 317–322, 2013.
- [6]. V. Semiconductors, "IGBT/MOSFET Gate Drive Optocoupler," *Retrieved Jul*, vol. 26, pp. 2007–2008, 2011.
- [7]. V. Siliconix, "Product Summary Description Symbol Unit Test Conditions," no. V, pp. 1–9.
- [8]. D. Sheet and F. Number, "Mur1540, mur1560, rurp1540, rurp1560," no. 2778, pp. 1–4, 2000.
- [9]. M. H. Rashid, *POWER ELECTRONICS Academic Press Series in Engineering*. 2001.
- [10]. B. Bhutia, M. Ali, and N. Tiadi, "Design of Three Phase PWM Voltage Source Inverter For Photovoltaic Application," *Int. J. Innov. Res. Electr. Electron. Instrum. Control Eng.*, vol. 2, no. 4, pp. 2321–2004, 2014.
- [11]. M. Büyük, A. Tan, M. Tümay, and K. Ç. Bayindir, "Topologies, generalized designs, passive and active damping methods of switching ripple filters for voltage source inverter: A comprehensive review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 62, pp. 46–69, 2016.
- [12]. Sardiyanto, "Pembuatan Modul Inverter 3 Fasa Sinusoidal Pulse Width Modulation Sebagai Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Terhubung Segitiga 220 Volt." Laporan Penelitian, Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro.
- [13]. M. Tecnology Inc., "Motor Control PWM dsPIC30F Family Reference Manual," pp. 15–44, 2007.
- [14]. Daniel W.Hart, *Power Electronics*. 2011.
- [15]. Ned Mohan, *Power Electronics A First Course*. 2012.
- [16]. P. Pillay and M. Manyage, "Definitions of Voltage Unbalance Call for Short Papers," no. May, pp. 50–51, 2001.
- [17]. W. C. Yang, "Application of SIMULINK to Analyze the Unbalanced Operation Characteristics of a Three-Phase Transformer with Non-Identical Winding Impedances," no. Aiie, pp. 625–627, 2015.
- [18]. Chapman. Stephen J, *Electric Machinery Fundamental – 4ed*. 2005.
- [19]. E. A. T. Yuwono, A. Warsito, and M. Facta, "Inverter Multi Level Tipe Jembatan Satu Fasa Tiga Tingkat," *TRANSMISI*, vol. 13, no. 4, pp. 135–140, 2011.
- [20]. N. W. Satiawan, I. Bagus, and F. Citarsa, "Perbandingan Kinerja Teknik Modulasi Inverter Dua-Level untuk Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga-Fase," *Elektron. J. Arus Elektro Indonesia.*, pp. 35–41.