

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

Yusuf Dewantoro^{*)}, Mochammad Facta, and Iwan Setiawan

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

^{*)E-mail: yusufdewa11@gmail.com}

Abstrak

Di Indonesia, energi listrik umumnya dibangkitkan sebagai sumber listrik tiga fase. Akan tetapi karena tidak semua pelanggan berada dalam jalur distribusi tiga fase, permintaan kebutuhan sumber tiga fase tidak semua bisa dipenuhi, karena itu dibutuhkan inverter tiga fase. Inverter tiga fase yang baik memiliki teknik switching yang halus dengan karakteristik harmonisa rendah. Pada umumnya, sinyal UPWM tiga fase secara digital sulit dibangkitkan, karena keterbatasan fitur mikrokontroler yang ada. DsPIC30f4011 adalah mikrokontroler yang terspesifikasi untuk keperluan pengontrolan motor dengan fitur khusus yang mendukung pembangkitan sinyal UPWM tiga fase, diantaranya pengaturan *dead time*, *complementary mode* dan *center aligned mode*. Dalam penelitian ini, dirancang VSI tiga fase dengan teknik pemicuan UPWM berbasis mikrokontroler 16-bit dsPIC30f4011. Sinyal carrier dirancang 10 kHz dengan indeks modulasi (m_a) dapat diatur pada rentang nilai $0 \leq m_a \leq 1$ dan frekuensi sinyal referensi pada nilai 0 – 50 Hz. Diperoleh performa handal, dimana sinyal UPWM yang dibangkitkan sudah sesuai dengan karakteristik sinusoidal. Bentuk gelombang tegangan *output* V_{LL} dapat divariasikan secara linier terhadap indeks modulasi pada rentang frekuensi 0 – 50 Hz. Nilai PVUR dan IUR (rasio ketidakseimbangan tegangan dan arus) yang dihasilkan sudah memenuhi standar NEMA, yaitu dibawah 2%.

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

Abstract

In Indonesia, electricity provided by generator as a three-phase source. However, because not all the customers are in a three-phase distribution lines, the demand for three-phase source can't be met for everyone, hence the importance of the three-phase inverter. A good three-phase inverter have smooth switching characteristic with low profile harmonics. In general, digital three-phase UPWM signal is difficult to generate, because of the limitation of existing microcontrollers feature. DsPIC30f4011 is a microcontroller that specified for the purpose of controlling motor with special features to support the three-phase UPWM signal generation, including dead time setting, complementary modes and center aligned mode. In this study, three-phase voltage-source inverter (VSI) with UPWM switching technique using 16-bit microcontroller dsPIC30f4011 was designed and implemented. The carrier signal is designed 10 kHz with varied modulation index (m_a) and the fundamental frequency is designed 50 Hz. An experimental result presented in this paper shows the effectiveness of pulse generation technique. Based on the experiment, output voltage V_{LL} and V_{LN} can be varied linearly towards the modulation index on the range of $0 \leq m_a \leq 1$ with frequency range of 0-50 Hz. Finally, PVUR and IUR (ratio of voltage and current unbalance) generated by system meets the NEMA standard below 2%.

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

1. Pendahuluan

Di antara bentuk tipe jaringan sumber listrik yang digunakan di Indonesia adalah sumber 3 fase. Sumber 3 fase biasa digunakan dalam pengaplikasian motor dan lain-lain. Sumber 3 fase mempunyai karakteristik pembeda dibanding sumber 1 fase antara lain memiliki

tegangan yang lebih besar untuk daya yang sama. Dikarenakan tegangan yang digunakan lebih besar, maka arus untuk penggunaan sumber 3 fase cenderung lebih kecil[1]. Hal ini mengakibatkan rugi-rugi panas yang ditimbulkan pun menjadi semakin kecil, dan ukuran penampang kabel untuk sistem 3 fase juga semakin kecil [2]. Namun, untuk pembangkitan sumber 3 fase sendiri

sangat susah, karena harus berlangganan dari PLN terlebih dahulu. Untuk itu diperlukan alat yang mampu membangkitkan dan mengatur sumber 3 fasa yang berasal dari sumber 1 fasa[3].

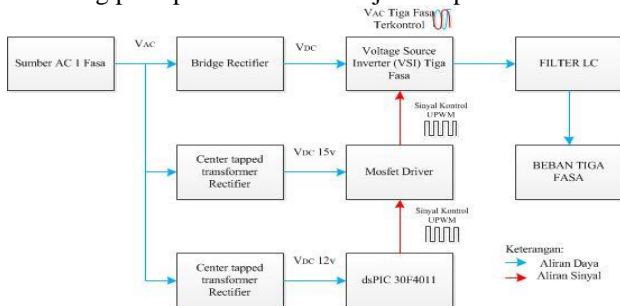
Untuk itulah penulis merancang inverter yang mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC tiga fasa. Teknik *switching* dari *inverter* tersebut juga bermacam-macam dan terus berkembang hingga kini, diantaranya adalah *uniform PWM*, *sinusoidal PWM*, *space vector PWM*, dan lain – lain. Setiap metode memiliki kelebihan dan kekurangan, namun penulis memilih metode UPWM karena lebih mudah dibangkitkan daripada metode lainnya[4].

Dalam penelitian ini telah dirancang inverter tiga fasa dengan sistem kendali menggunakan dsPIC 30F4011. Pembangkitan sinyal UPWM menggunakan dsPIC 30F4011 lebih mudah dan ringkas dibanding menggunakan IC PWM konvensional, yang mana mikrokontroler ini memiliki keluaran 6 output PWM, yang terdiri dari tiga output PWM high dan tiga output PWM low, yang cocok sebagai sumber pemicu inverter tiga fasa yang telah dibuat. Selain itu mikrokontroler ini juga memiliki berbagai mode keluaran carrier yang disesuaikan untuk mempermudah pembangkitan sinyal PWM yang kita inginkan[5].

2. Metode

2.1. Perancangan Perangkat Keras

Perancangan VSI tiga fasa UPWM 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 beban. Diagram blok perangkat keras yang dirancang pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Blok Diagram Alat

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

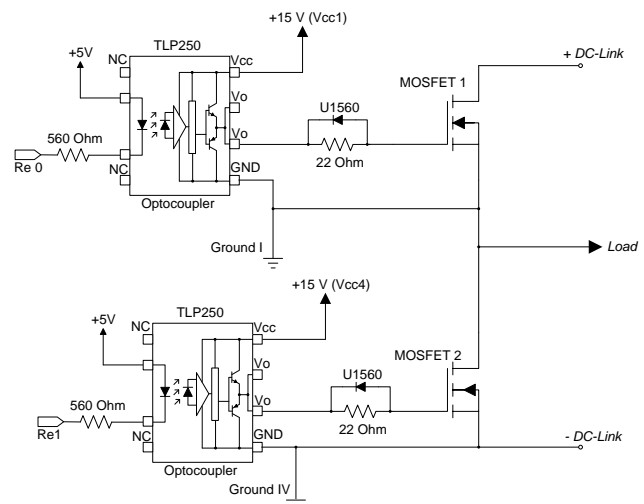
1. Sumber tegangan arus bolak – balik 1 fasa digunakan untuk mensuplai rangkaian daya dan rangkaian kontrol.
2. Mikrokontroler 16-Bit dsPIC30f4011 digunakan

untuk membangkitkan sinyal kontrol pemucuan UPWM, karena memiliki fitur yang sesuai untuk kebutuhan pembangkitan sinyal UPWM 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 inveter* (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) [6].

2.2 MOSFET Driver

Rangkaian TLP 250 digunakan untuk mengisolasi dan menguatkan sinyal UPWM 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* [7].



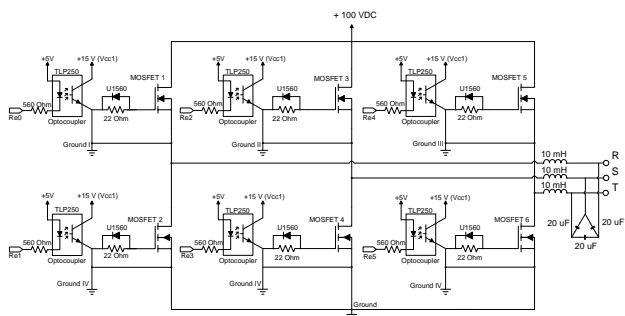
Gambar 3. Rangkaian MOSFET Driver TLP250

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 [8].

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

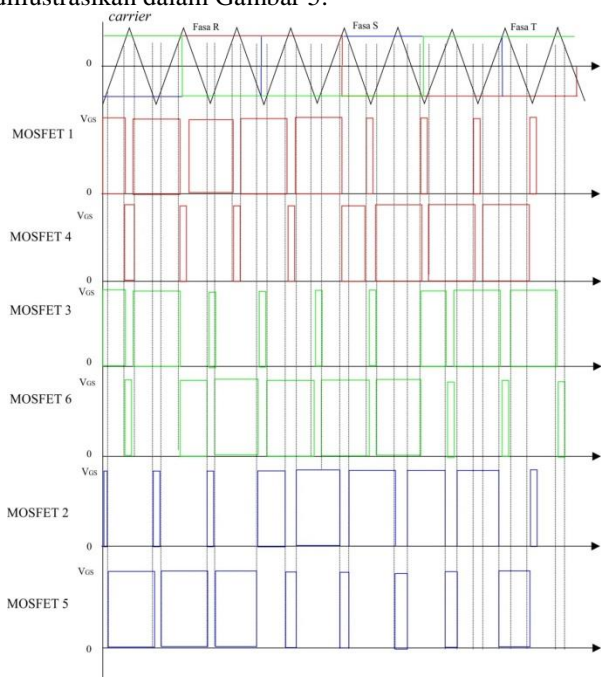
diatur secara independen, sedangkan arus yang ditarik dari sumber dipengaruhi oleh besar beban [9]. Digunakan 6 buah MOSFET tipe IRF460 dengan 2 MOSFET pada tiap *leg* atau fasanya. Rangkaian VSI tiga fasa ditunjukkan pada Gambar 4 [8].



Gambar 4. Rangkaian VSI tiga fasa

2.4. Skema UPWM Unipolar Tiga Fasa

Gelombang pemicuan UPWM *unipolar* untuk pemicuan *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.



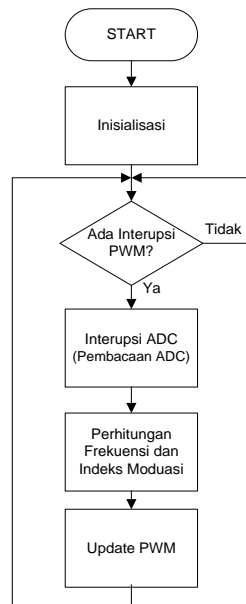
Gambar 5. Uniform Pulse-Width Modulation (UPWM)

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 $0 \leq m_a \leq 1$.

2.6. Program UPWM Unipolar Tiga Fasa

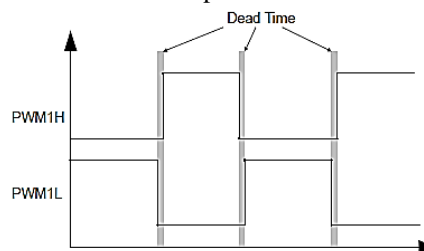
Proses pembangkitan sinyal UPWM *unipolar* tiga fasa diawali dengan inialisasi dan deklarasi variabel yang akan terlibat dalam proses. Sinyal UPWM yang dikehendaki dibentuk dari proses normalisasi dan proses perhitungan matematis dengan sinyal *carrier* 10kHz. *Flowchart* program pembangkitan UPWM *unipolar*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



Gambar 6. Flowchart program UPWM

2.6.1. Inialisasi Modul PWM

Modul PWM dikonfigurasi agar bekerja dalam *complementary mode*, sehingga *dead time* sebesar 1uS 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 1uS
PWMCON1 = 0x0077; // Complementary mode
...

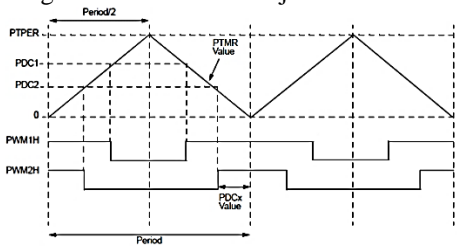
```

Nilai *dead time* yang dimasukkan dalam *register* DTCON1

diperoleh berdasarkan Persamaan 1 berikut [14]:

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

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 [10].



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[10].

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

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.

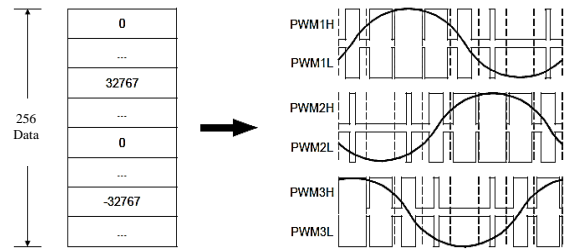
```
...
SEVTCMP = 1; // Enable trigger ADC
PWMCON2 = 0x0102; // 2 postscaller, untuk interupsi DC setiap 0.0002 sekon
...
```

Konfigurasi yang telah dilakukan disimpan dalam sebuah

fungsi tertentu yang akan dipanggil dalam main program.

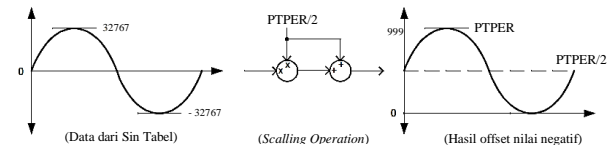
2.6.2. Pembentukan Sinyal UPWM

Sinyal UPWM dibentuk dengan metode *look-up table*, yang dimodelkan dengan tabel sinusoidal. Tabel memuat sinyal referensi kotak 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 :

$$\Delta\theta_{base} = T_s \cdot \frac{OMEGA_{BASE}}{THETA_{BASE}} \quad (3)$$

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

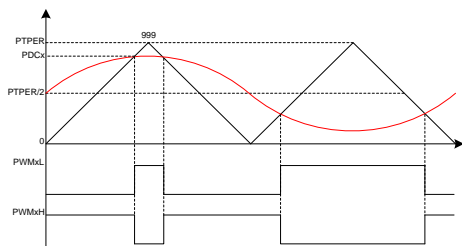
$$\Delta\theta_{base} = 0,01$$

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

```
...
K_DELTA_THETA = 655; // 0,01 * 65536 ≈ 655
...
```

Pengaturan indeks modulasi dilakukan dengan perkalian

freksional 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 :



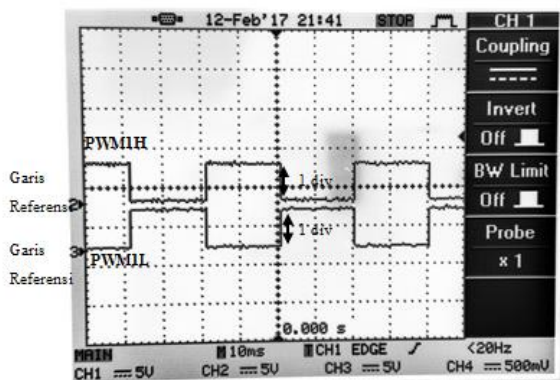
Gambar 11. Komparasi sinyal referensi dengan *carrier*

Sinyal UPWM 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

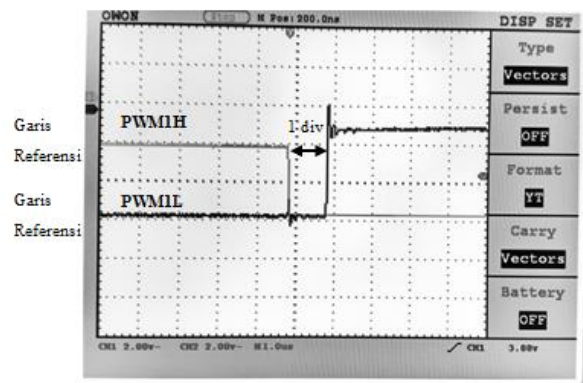
3.1. Sinyal Kontrol UPWM dsPIC30f4011

Gambar 12 menunjukkan *output* pin PWM PWMIL dan PWMIH yang bekerja secara komplementer. Pengamatan dilakukan pada $v/div = 5V$ dan $t/div = 2,0$ ms, diperoleh sinyal UPWM dengan level tegangan 5V.



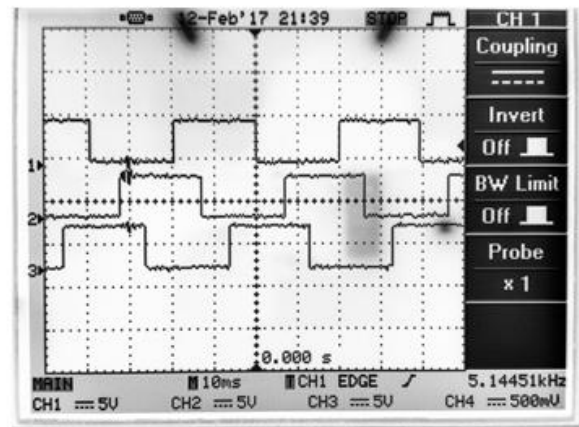
Gambar 12. *Output* PWMIL dan PWMIH

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



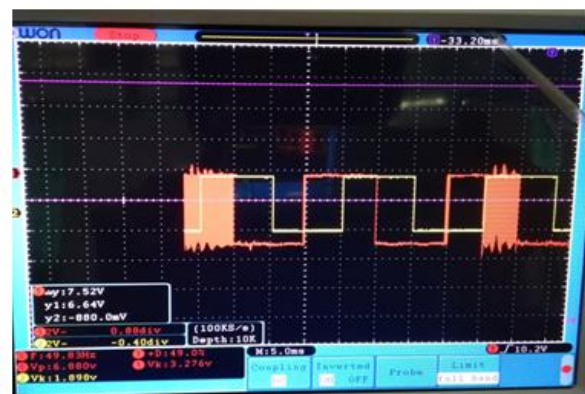
Gambar 13. *Dead time* PWMIL dan PWMIH

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



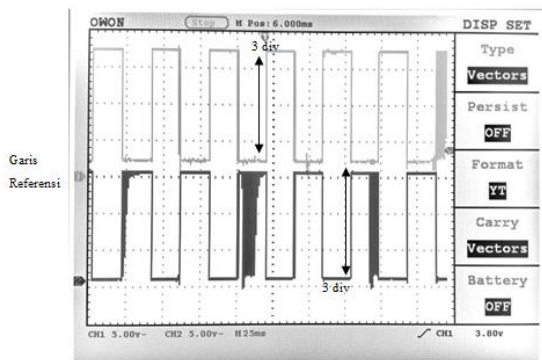
Gambar 15. PWMIL 50 Hz



Gambar 16. Keluaran Frekuensi Sinyal Kotak Pada AFG

3.2. MOSFET Driver

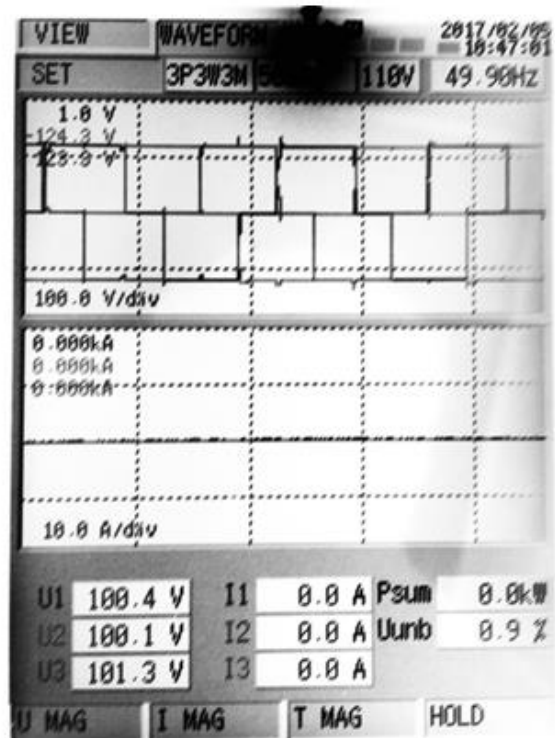
Gambar 17 menunjukkan sinyal *output optocoupler* TLP250 PWM1L dan PWM1H. Pengamatan dilakukan dengan nilai $v/div = 5V$ dan $t/div = 2,0 ms$, diperoleh sinyal UPWM dengan level tegangan 15 V. Level tegangan 15 V yang dihasilkan sudah cukup untuk memicu MOSFET IRFP460 [11].



Gambar 17. Output optocoupler TLP250 PWM1L & PWM1H

3.3. VSI Tiga Fase

Pengujian *output* VSI tiga fase UPWM bertujuan untuk mengetahui bentuk gelombang tegangan keluaran yang dihasilkan pada terminal *output* inverter tiga fase. Output V_{LL} VSI tiga fase ditunjukkan pada Gambar 18.



Gambar 18. Output V_{LL} VSI tiga fase

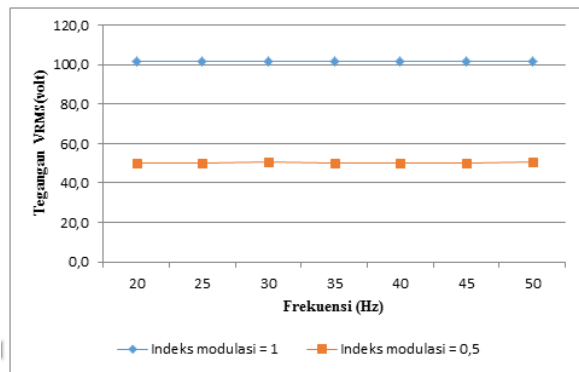
Berdasarkan Gambar 17, diperoleh bahwa bentuk gelombang yang teramati sudah menunjukkan karakteristik UPWM [6] dan beda fase 120° .

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 UPWM 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.

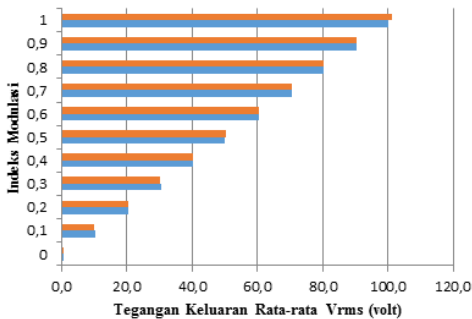


Gambar 19. Grafik $f - V_{LL}$ kondisi tanpa beban

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 [6] dimana nilai m_a (indeks modulasi) berbanding lurus dengan tegangan output inverter.

$$V_{LL-max} = m_a \cdot \frac{4\sqrt{3}}{2\pi} \cdot V_{DC} \quad (3)$$



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 UPWM digunakan untuk mensuplai beban Resistif dan Resistif+Induktif. LVUR didefinisikan sebagai rasio ketidakseimbangan tegangan line atau tegangan line to line yang didefinisikan oleh NEMA [12] 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 UPWM 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	50	50,1	50,1	0,00	50	50	50,1	0,133245
0.9	45,3	45,3	43,1	1,57	45,3	45,2	43,1	1,721557
0.8	40,4	40,2	40	0,50	40,4	40,2	40	0,497512
0.7	35,5	35,0	35,4	0,57	35,5	35,2	35,4	0,377003
0.6	30,4	30,4	31,3	1,95	30,4	30,4	31,3	1,954397
0.5	25,1	25,2	26,9	4,67	25,1	25,4	26,9	4,263566
0.4	20,4	20,6	22,9	7,51	20,4	20,6	23,9	10,47766
0.3	15,0	14,9	18,7	15,43	15	15	20,7	22,48521

Berdasarkan Tabel 1 nilai LVUR ketika inverter mensuplai beban resistif sudah memenuhi standar NEMA, yaitu dibawah 2% sampai indeks modulasi = 0,6. Nilai LVUR terbesar adalah 15,43% ($f = 50$ Hz, $m_a = 0,3$) dan 22,48% ($f = 25$ Hz, $m_a = 0,3$). 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 UPWM ketika dibebani beban resistif+induktif tiga fase. Beban tiga fase yang digunakan adalah resistor 200Ω dan induktor 200μH yang dihubungkan 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.

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	50	50,1	50,1	0,1	50	50	50,1	0,133245
0.9	45,4	45,3	43,4	1,6	45,3	45,2	43,1	1,721557
0.8	40,1	39,8	40	0,3	40,4	40,2	40	0,497512
0.7	34,9	35,0	35,4	0,9	35,5	35,2	35,4	0,377003
0.6	30,4	30,4	31,3	2,0	30,4	30,4	31,3	1,954397
0.5	25,2	25,2	26,9	4,4	25,1	25,4	26,9	4,263566
0.4	20,2	20,6	22,9	7,8	20,4	20,6	23,9	10,47766
0.3	15,0	14,9	18,8	15,8	15	15	20,7	22,48521

Berdasarkan Tabel 3 nilai LVUR ketika inverter mensuplai beban resistif sudah memenuhi standar NEMA, yaitu dibawah 2% sampai indeks modulasi 0,6. Nilai LVUR semakin meningkat seiring dengan turunnya indeks modulasi. Nilai LVUR tertinggi terdapat pada nilai indeks modulasi terendah dalam pengujian, yaitu 0,3 sebesar 15,8% pada frekuensi 50 Hz, dan 22,4% pada frekuensi 25Hz. Pengujian dengan nilai indeks modulasi dibawah 0,3 tidak dilakukan dengan alasan keamanan.. Hasil pengukuran arus saluran ditunjukkan pada Tabel 4.

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% ($f = 50\text{Hz}$, $m_a=1$) dan 1,79% pada ($f = 25\text{ Hz}$, $m_a = 1$). Pada hubung bintang tidak diketanahkan, ketidak seimbangan arus akan memicu ketidakseimbangan tegangan [13], 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 UPWM 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 UPWM *unipolar* pada pensaklaran MOSFET VSI tiga fase UPWM. 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 memang belum memenuhi standar NEMA, yaitu dibawah 2% pada indeks modulasi dibawah 0,6. Pada kondisi beban resistif LVUR terbesar adalah 22,48% ($f = 25\text{ Hz}$, $m_a = 0,3$).. Pada kondisi beban resistif+induktif LVUR terbesar adalah 22,81% ($f=25\text{Hz}$, $m_a=0,3$). 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[14]. Selain itu, dapat digunakan kontrol *close-loop* dengan *feedback* ke mikrokontroler untuk pengaturan indeks modulasi secara otomatis sehingga diperoleh nilai *output* tegangan yang dikehendaki [15]. DsPIC30f4011 juga dapat digunakan untuk menghasilkan gelombang pemicuan dengan metode yang lain, seperti *Single-PWM*, *Sinusoidal-PWM*, *MSPWM* dan *SVPWM*[16].

Referensi

- [1]. S. J. Chapman, *ELECTRIC MACHINERY FUNDAMENTALS*, 4th ed. London: Elizabeth A. Jones, 2005.
- [2]. T. L. Skvarenina, *The power electronics handbook*. New York: CRC Press LLC, 2002.
- [3]. 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.
- [4]. T. Sutikno, "PENGENDALI KECEPATAN MOTOR INDUKSI 3 FASA DENGAN INVERTER MODULASI LEBAR PULSA SERAGAM BERBASIS FPGA ACEX1K," *Cent. Electr. Eng. Res. Solut.*, pp. 17-26, 2007.
- [5]. M. T. Inc., *DSPIC30F4011/12 Data Sheet 16-Bit Digital Signal Controllers*. 2010. ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/70135C.pdf
- [6]. M. H. Rashid, *POWER ELECTRONICS Academic Press Series in Engineering*. 2001.

- [7]. TOSHIBA, "Photocoupler GaAs Ired & Photo-IC TLP250," vol. 5, pp. 1-8, 2004.
www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/32418/TOSHIBA/TLP250.html
- [8]. Sardiyanto, "Pembuatan Modul Inverter 3 Fasa Sinusoidal Pulse Width Modulation Sebagai Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Terhubung Segitiga 220 Volt," *Transient*, 2003.
- [9]. Daniel W Hart, *Power Electronics*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2011.
- [10]. M. Tecnology Inc., "Motor Control PWM dsPIC30F Family Reference Manual," pp. 15-44, 2007.
ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70062E.pdf
- [11]. V. Siliconix, "Power MOSFET IRFP460, SiHFP460," no. V, pp. 1-9.
www.irf.com/product-info/datasheets/data/irf460.pdf
- [12]. P. Pillay and M. Manyage, "Definitions of Voltage Unbalance Call for Short Papers," no. May, pp. 50-51, 2001.
- [13]. W. C. Yang, "Application of SIMULINK to Analyze the Unbalanced Operation Characteristics of a Three-Phase Transformer with Non-Identical Winding Impedances," no. Aiiie, pp. 625-627, 2015.
- [14]. A. Kurniawan and A. Harumwidiah, "Strategi Kendali Kecepatan Motor Induksi Menggunakan PWM Inverter Berbasis Jaringan Saraf Tiruan," *Transmisi*, vol. 17, no. 2, pp. 83-88, 2015.
- [15]. E. A. T. Yuwono, "Inverter Multi Level Tipe Jembatan Satu Fasa Tiga Tingkat," *Transmisi*, vol. 13, no. 4, pp. 135-140, 2011.
- [16]. Y. Safarudin, A. Warsito, and S. Sudjadi, "Perancangan Modul Praktikum Inverter Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) 2 level, 3 level, dan Sinusoidal," *Transient*, 2013.