

DESAIN INVERTER FULL BRIDGE TIGA FASE UNIFORM PULSE-WIDTH MODULATION (UPWM) DENGAN DSPIC30F4011

Muhammad Arief N^{*}), Mochammad Facta, and Iwan Setiawan

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

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

Abstrak

Sistem tenaga listrik merupakan sebuah aset yang vital dalam kehidupan sehari-hari, sehingga penggunaan elektronika daya atau konverter sudah menjadi hal yang biasa. Pada umumnya konverter dibagi menjadi dua yaitu konverter sumber tegangan dan konverter sumber arus. Konverter membutuhkan sinyal pemicuan yang dibangkitkan secara analog maupun digital agar dapat bekerja. Teknik pemicuan terus berkembang hingga saat ini, pemakaian mikrokontroler digunakan guna mengganti pemicuan analog agar lebih stabil gelombang keluarannya. DsPIC30f4011 adalah mikrokontroler yang terspesifikasi khusus yang mendukung pembangkitan sinyal UPWM tiga fasa, diantaranya pengaturan dead time, complementary mode dan center aligned mode. Dalam penelitian ini dirancang inverter full bridge tiga fasa dengan teknik pemicuan UPWM berbasis mikrokontroler dsPIC30f4011 dan pembangkitan sinyalnya dilakukan melalui senarai program. 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. Bentuk gelombang tegangan output V_{LL} yang dihasilkan divariasikan secara linier terhadap indeks modulasi pada rentang frekuensi 0 – 50 Hz. Nilai LVUR dan IUR (rasio ketidakseimbangan tegangan dan arus).

Kata kunci : Inverter full bridge, UPWM, dsPIC30f4011, LVUR, IUR

Abstract

Electrical energy system now is an important asset in daily life so the use of electrical power or converter are common. Converter are usually divide into converter current source and converter voltage source. Converter needs an analog or a digital trigger signal to make it work. This kind of triggering keeps on developing of using microcontroller to change the analog trigger signal to stabilize the wave output. DsPIC30f4011 is a microcontroller having 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 full bridge inverter with UPWM switching technique microcontroller dsPIC30f4011 was designed and implemented. The carrier signal was set 10 kHz with 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 matched with UPWM characteristic. The measured, line to line output voltage waveforms of the inverter were almost sinusoidal and the waveform 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 the proposed circuit.

Keywords: Inverter full bridge, UPWM, dsPIC30f4011, LVUR, IUR.

1. Pendahuluan

Sistem tenaga listrik merupakan sebuah aset yang vital dalam kehidupan sehari-hari. Terutama pada bagian produksi dunia industri kebutuhan tenaga listrik yang meningkat memaksa sistem tenaga listrik untuk bekerja secara terus menerus[1]. Hilangnya pasokan listrik tentunya akan mengganggu proses produksi, sehingga dibutuhkan sumber listrik cadangan agar proses produksi tidak berhenti. Pada awalnya sumber listrik cadangan

menggunakan diesel generator akan tetapi, dewasa ini sumber listrik cadangan dapat digantikan dengan menggunakan elektronika daya. UPS (*Uninterruptable Power Supply*) merupakan salah satu sumber listrik cadangan yang menggunakan elektronika daya yang berupa DC/AC konverter atau *inverter*[2].

Pada umumnya konverter dibagi menjadi dua yaitu konverter sumber tegangan dan konverter sumber arus[3]. Teknik pemicuan terus berkembang hingga saat ini,

pemakaian mikrokontroller digunakan guna mengganti pemecuan analog agar lebih stabil gelombang keluarannya. Hal tersebut diikuti dengan semakin banyaknya produk mikrokontroller yang dikeluarkan di pasaran oleh Texas Instrument, Motorola, Microchip dan lain – lain. Sebagai contoh, Microchip memproduksi chip *motor control* dan *power converter* (PIC18fxx3x, dsPIC30fx01x dan dsPIC33FJxxMCxx) yang telah terintegrasi dengan modul PWM untuk memenuhi kriteria desain *inverter*[6].

DsPIC 30f4011 merupakan mikrokontroller 16 bit yang dikembangkan dari arsitektur Harvard manufaktur Microchip Technology[13]. DsPIC 30f4011 memiliki DSP *Engine* yang mempercepatnya dalam melakukan komputasi sinyal digital. Selain itu, dsPIC 30F4011 dilengkapi dengan modul PWM dengan output 6 pin untuk keperluan aplikasi elektronika daya yang tidak banyak dimiliki oleh mikrokontroller lain.

Dalam penelitian ini dirancang *Inverter Full Bridge* tiga fasa dengan teknik pemecuan UPWM berbasis mikrokontroller dsPIC30f4011 dan pembangkitan sinyalnya dilakukan melalui senarai program. Selain itu dsPIC 30F4011 memiliki kemampuan Digital Signal Processing[8] yang mampu memproses data secara cepat dan mempunyai lebar data 16 bit sehingga data yang dapat ditampung lebih banyak[10].

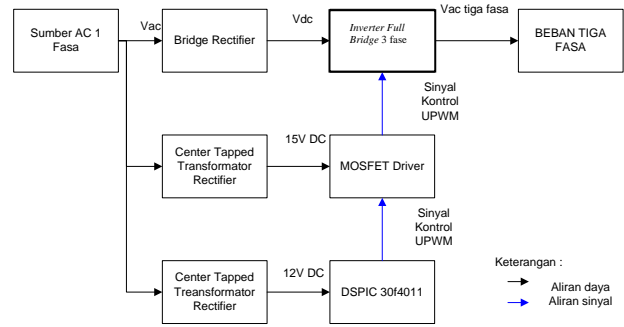
Adapun tujuan utama dari pembuatan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang dan membuat modul Inverter 3 fasa UPWM dengan nilai frekuensi dan indeks modulasi yang dapat diatur
2. Mempelajari dan mengimplementasikan teknik pembangkitan gelombang modulasi UPWM untuk inverter tiga fasa menggunakan dsPIC30f4011.
3. Mengamati pengaruh frekuensi dan indeks modulasi (m_a) terhadap tegangan keluaran *Inverter Full Bridge* tiga fasa UPWM.

2. Metode

2.1. Perancangan Perangkat Keras

Perancangan perangkat keras *Current-source Inverter* tiga fasa UPWM (*Unipolar Pulse Width Modulation*) yang dilakukan pada penelitian ini terdiri dari beberapa blok utama, yaitu blok sumber tegangan 1 fasa, blok rangkaian daya yang terdiri dari *full-wave bridge rectifier* dan inverter tiga fasa, rangkaian kontrol yang terdiri dari mikrokontroller dsPIC 30f4011 dan MOSFET Driver serta blok beban. Diagram blok perangkat keras yang dirancang pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1.



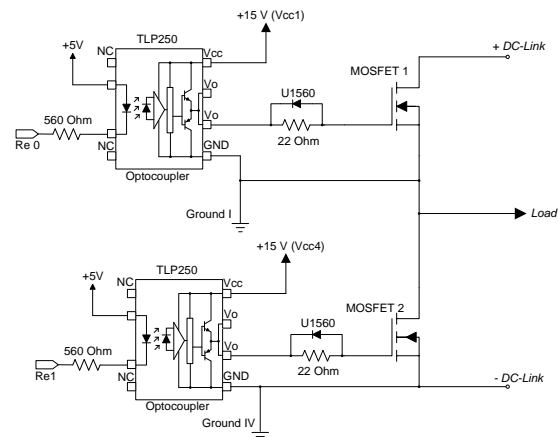
Gambar 1. Blok Diagram Alat

Spesifikasi *Inverter* 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. Mikrokontroller 16-Bit dsPIC30f4011 digunakan untuk membangkitkan sinyal kontrol pemecuan UPWM, karena memiliki fitur yang sesuai untuk kebutuhan pembangkitan sinyal UPWM tiga fasa.
3. TLP250 digunakan sebagai MOSFET Driver, karena memiliki delay on dan delay off yang singkat.
4. Topologi inverter tiga fasa yang dirancang adalah *Inverter Full Bridge* tiga fasa, yang terdiri dari 6 buah MOSFET tipe IRFP460.
5. Blok beban yang digunakan dalam perancangan penelitian ini adalah berupa beban R (200Ohm) dan R(200 Ohm) + L(200μH).

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*[6,7,8].

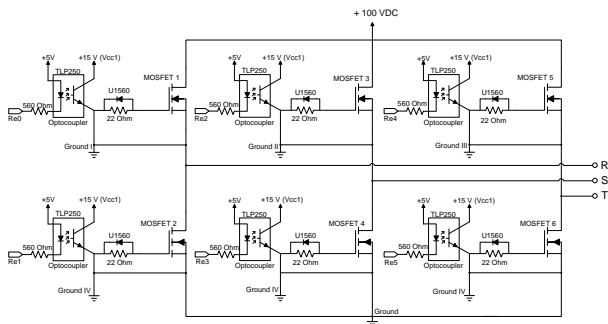


Gambar 2. Rangkaian MOSFET Driver TLP250

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

2.3. Inverter Full Bridge Tiga Fase

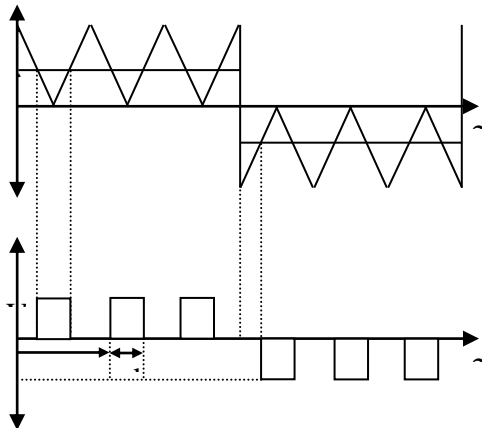
Inverter tiga fase yang dirancang dalam penelitian ini menggunakan topologi *Inverter Full Bridge* Tiga Fase, dimana nilai frekuensi dan fase tegangan outputnya dapat diatur secara independen, sedangkan arus yang ditarik dari sumber dipengaruhi oleh besar beban [9]. Digunakan 6 buah MOSFET tipe IRF460 dengan 2 MOSFET pada tiap *leg* atau fasenya. Rangkaian *Inverter* tiga fase ditunjukkan pada Gambar 3 [12].



Gambar 3. Rangkaian *Inverter* tiga fase

2.4. Skema UPWM Unipolar Tiga Fase

Gelombang pemicuan UPWM *unipolar* untuk pemicuan *Inverter Full Brige* tiga fase diperoleh dengan membandingkan sinyal segitiga (sinyal *carrier*) dengan tiga buah sinyal kotak yang masing – masing berbeda fase 120° sebagai sinyal referensi sebagaimana di ilustrasikan dalam Gambar 4.

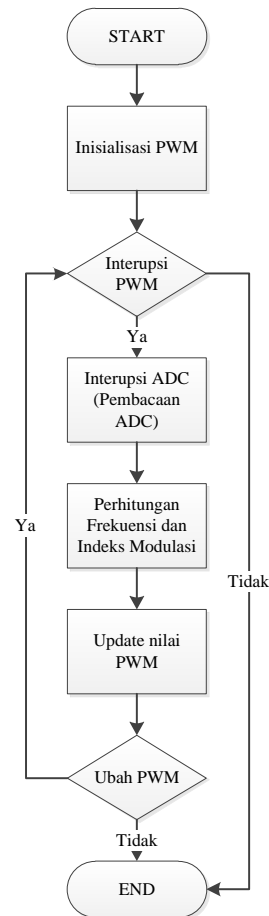


Gambar 4. *Uniform Pulse-Width Modulation* (UPWM)

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 amplitude sinyal *carrier* dijaga agar tidak lebih besar dari 1, sehingga tidak terjadi *over modulation* dan dapat diatur pada rentang nilai $0 \leq m_a \leq 1$.

2.5. Program UPWM Unipolar Tiga Fase

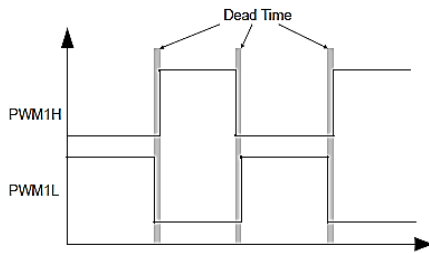
Proses pembangkitan sinyal UPWM *unipolar* tiga fase diawali dengan inialisasi dan deklarasi variabel yang akan terlibat dalam proses. Sinyal UPWM yang dikehendaki dibentuk dari proses normalisasi dan proses perhitungan matematis dengan sinyal *carrier* 10kHz. *Flowchart* program pembangkitan UPWM *unipolar* ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. *Flowchart* program UPWM

2.5.1. 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 6.



Gambar 6. Dead time PWMxH dan PWMxL

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

```

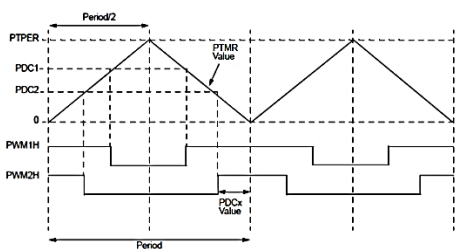
...
DTCON1 = 0x0014; // Dead time 1uS
PWMCON1 = 0x0077; // Complementary mode
...

```

Nilai *dead time* yang dimasukkan dalam register DTCON1 diperoleh berdasarkan Persamaan 1 berikut [4]:

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

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 7. 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].

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

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.

```

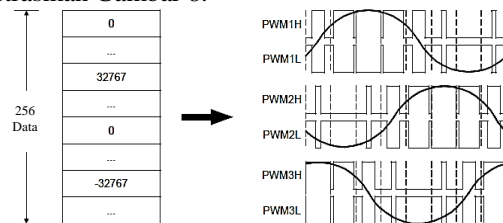
...
SEVTCMP = 1; // Enable trigger ADC
PWMCON2 = 0x0102; // 2 postscaller, untuk interupsi DC setiap 0.0002 sekon
...

```

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

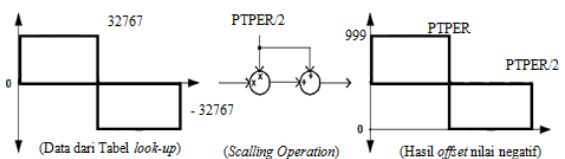
2.5.2. Pembentukan Sinyal UPWM

Sinyal UPWM dibentuk dengan metode *look-up table*, yang dimodelkan dengan tabel sinusoidal. 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 8.



Gambar 8. 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 9.



Gambar 9. Proses normalisasi sinyal referensi

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

$$\Delta\theta_{base} = T_s \cdot \frac{\omega_{base}}{\theta_{base}} \quad (3)$$

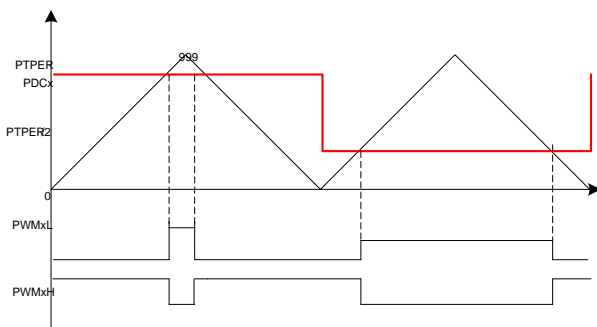
$$\Delta\theta_{base} = 0,0002 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ rad/s} / 2 \cdot \pi$$

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

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

```
...
K_DELTA_THETA = 655; // 0,01 * 65536 ≈ 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 10 berikut :



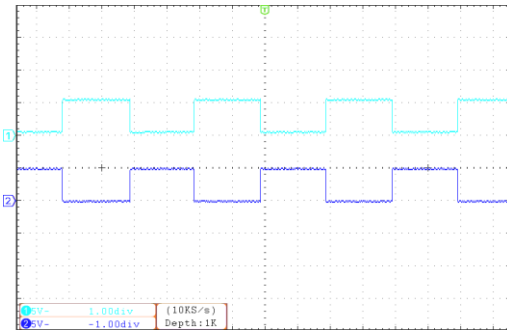
Gambar 10. Komparasi sinyal referensi dengan *carrier*

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

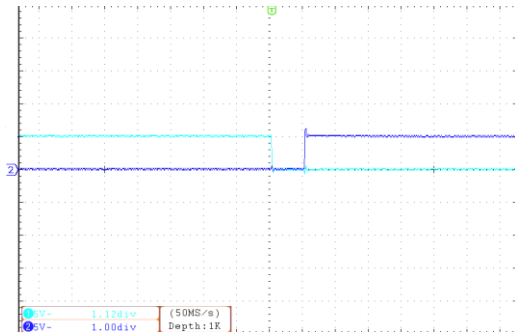
3.1. Sinyal Kontrol UPWM dsPIC30f4011

Gambar 11 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 UPWM dengan level tegangan 5V.



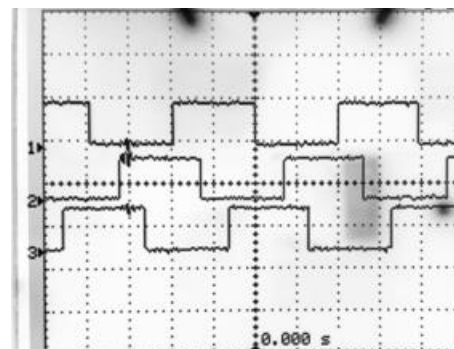
Gambar 11. Output PWM1L dan PWM1H

Gambar 12 menunjukkan hasil pengujian *dead time* antara PWM1L dengan PWM1H. PWM1L adalah sinyal pemuncian *leg 1* sisi *low* dan PWM1H adalah sinyal pemuncian *leg 1* sisi *high*. Pengamatan dilakukan pada $v/div = 5V$ dan $t/div = 2,0 \mu\text{s}$, diperoleh *dead time* yang teramati sebesar 1 μs .



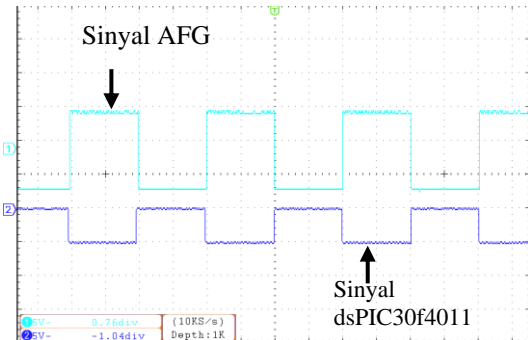
Gambar 12. *Dead time* PWM1L dan PWM1H

Gambar 13 menunjukkan hasil pengujian beda fase yang terbentuk antara PWM1H, PWM2H dan PWM3H. Pengamatan dilakukan pada $v/div = 5V$ dan $t/div = 1,0 \text{ ms}$, diperoleh pola sinyal yang saling berbeda fase 120°.



Gambar 13. Beda fase 120° PWM1H, PWM2H dan PWM3H

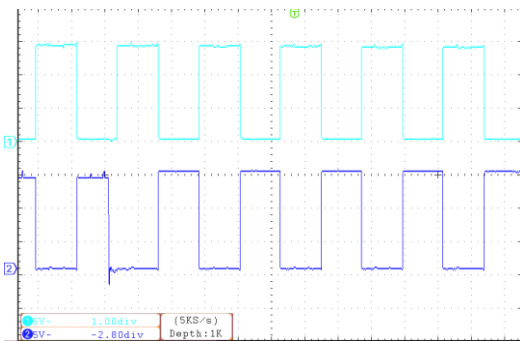
Gambar 14 menunjukkan sinyal UPWM dengan frekuensi referensi 50 Hz. Pengamatan dilakukan pada $v/div = 5V$ dan $t/div = 2,0 ms$ dengan membandingkan sinyal UPWM output dsPIC30f4011 dengan gelombang keluaran AFG. Diperoleh, sinyal UPWM dengan pola yang sudah sesuai dengan gelombang sinusoidal 50 Hz.



Gambar 14. PWM 50 Hz

3.2. MOSFET Driver

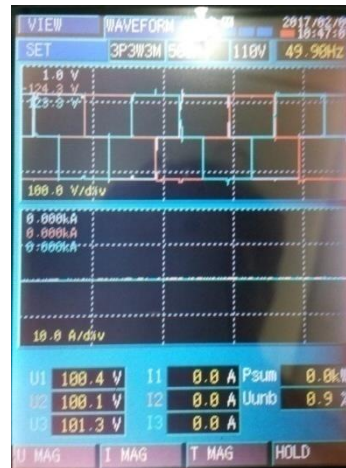
Gambar 15 menunjukkan sinyal output *optocoupler* TLP250 PWM1L dan PWM1H. Pengamatan dilakukan dengan nilai $v/div = 5V$ dan $t/div = 2,0 ms$, diperoleh sinyal UPWM dengan level tegangan 15 V. Level tegangan 15 V yang dihasilkan sudah cukup untuk memicu MOSFET IRFP460.



Gambar 15. Output *optocoupler* TLP250 PWM1L & PWM1H

3.3. Inverter Tiga Fase

Pengujian output *Inverter* tiga fase UPWM bertujuan untuk mengetahui bentuk gelombang tegangan keluaran yang dihasilkan pada terminal output inverter tiga fase. Output V_{LL} *Inverter* tiga fase ditunjukkan pada Gambar 16.



Gambar 16. Output V_{LL} *Inverter* tiga fase

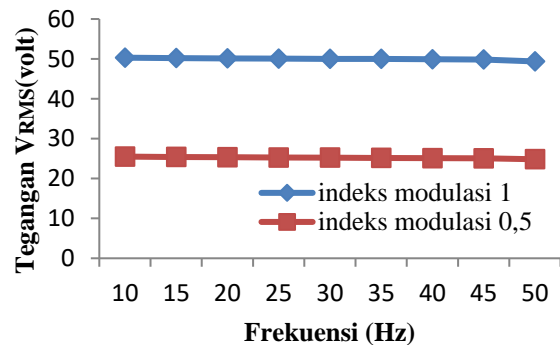
Berdasarkan Gambar 16, diperoleh bahwa bentuk gelombang yang teramati sudah menunjukkan karakteristik UPWM *unipolar* [11] dan beda fase 120° .

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

Pengujian ini bertujuan untuk melihat karakteristik respon tegangan *Inverter* 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 17. Diperoleh bahwa, variasi frekuensi tidak memberikan pengaruh perubahan yang signifikan pada V_{LL} yang cenderung tetap.

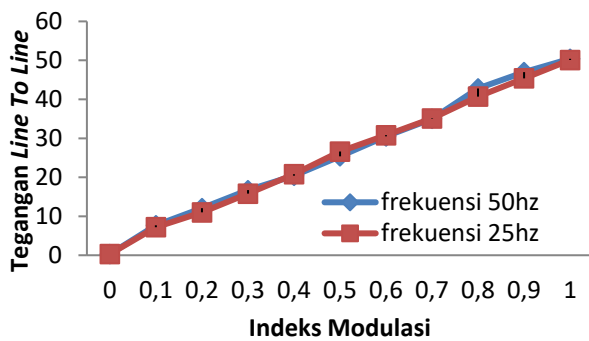


Gambar 17. Grafik $f - V_{LL}$ kondisi tanpa beban

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 18. 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 18. 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 *Inverter* 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 [16] sebagaimana Persamaan 4 berikut :

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

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

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

3.5.1. Beban Resistif (200 Ohm)

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik *Inverter* 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 | 51,4 | 53,9 | 54,4 | 1,89 | 51,6 | 53,6 | 53,8 | 1,51 |
| 0.9 | 45,3 | 45,6 | 45,7 | 0,37 | 44,9 | 45,1 | 45 | 0,22 |
| 0.8 | 40,2 | 40,4 | 40,4 | 0,17 | 40,5 | 40,7 | 40,5 | 0,33 |
| 0.7 | 35,4 | 35,5 | 35,6 | 0,28 | 35,3 | 35,5 | 35,3 | 0,38 |
| 0.6 | 30,5 | 30,7 | 30,5 | 0,44 | 30,3 | 30,5 | 30,4 | 0,33 |
| 0.5 | 25,5 | 25,7 | 25,5 | 0,52 | 25,2 | 25,3 | 25,2 | 0,26 |
| 0.4 | 20,7 | 20,9 | 20,7 | 0,64 | 20,4 | 20,5 | 20,4 | 0,33 |
| 0.3 | 15,3 | 15,4 | 15,3 | 0,43 | 15,4 | 15,3 | 15,3 | 0,43 |

Berdasarkan Tabel 1 nilai LVUR ketika inverter mensuplai beban resistif sudah memenuhi standar NEMA, yaitu dibawah 2%. Nilai LVUR terbesar adalah 1,89% ($f = 50$ Hz, $m_a = 1$) dan 1,51% ($f = 25$ Hz, $m_a = 1$). 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 | 0,19 | 0,19 | 0,00 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,00 |
| 0.9 | 0,13 | 0,12 | 0,12 | 5,41 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,00 |
| 0.8 | 0,1 | 0,1 | 0,10 | 0,00 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,00 |
| 0.7 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,00 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,00 |
| 0.6 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,00 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,00 |
| 0.5 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,00 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,00 |
| 0.4 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,00 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,00 |
| 0.3 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,00 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,00 |

Berdasarkan Tabel 2 didapat ketidakseimbangan arus. Nilai IUR paling besar adalah 5,41% ($f = 50$ Hz, $m_a=0,9$) dan frekuensi 25Hz dengan rentan indeks modulasi dari yang terbesar sampai yang terendah nilai IUR tidak mengalami perubahan yaitu sebesar 0%. Pada hubung bintang tidak diketanahkan, ketidak seimbangan arus akan memicu ketidakseimbangan tegangan, 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 *Inverter* tiga fase UPWM 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 0,91% ($f = 50$ Hz, $m_a = 0,5$) dan 1,15% ($f = 25$ Hz, $m_a = 1$). Hasil pengukuran arus saluran ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 3. Hasil pengujian VLL 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 | 51 | 51,5 | 51,8 | 0,71 | 51 | 52,8 | 52,8 | 1,15 |
| 0.9 | 45,6 | 45,8 | 45,6 | 0,29 | 45,1 | 45,6 | 45,4 | 0,51 |
| 0.8 | 40,6 | 40,8 | 40,6 | 0,33 | 40,3 | 40,1 | 40 | 0,42 |
| 0.7 | 35,6 | 35,8 | 35,5 | 0,47 | 35,7 | 35,9 | 35,7 | 0,37 |
| 0.6 | 30,6 | 30,7 | 30,8 | 0,33 | 30,3 | 30,5 | 30,3 | 0,44 |
| 0.5 | 25,5 | 25,6 | 25,9 | 0,91 | 25,7 | 25,7 | 25,5 | 0,26 |
| 0.4 | 20,5 | 20,5 | 20,4 | 0,16 | 20,8 | 21 | 20,9 | 0,48 |
| 0.3 | 15,6 | 15,6 | 15,7 | 0,43 | 15,4 | 15,4 | 15,3 | 0,22 |

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 | 0,16 | 0,16 | 0,16 | 0,00 | 0,16 | 0,16 | 0,16 | 0,00 |
| 0.9 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 5,00 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,00 |
| 0.8 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,00 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,00 |
| 0.7 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,00 | 0,1 | 0,1 | 0,10 | 0,00 |
| 0.6 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,00 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,00 |
| 0.5 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,00 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,00 |
| 0.4 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,00 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,00 |
| 0.3 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,00 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,00 |

Berdasarkan Tabel 4 didapat ketidakseimbangan arus. Nilai IUR paling besar adalah 5% ($f = 50\text{Hz}$, $m_a=0,9$) dan frekuensi 25Hz pada rentang indeks modulasi dari yang terbesar sampai yang terendah nilai IUR tidak mengalami perubahan yaitu sebesar 0%. 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 *Inverter Full Bridge* 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 *Inverter* 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. Pada kondisi beban resistif LVUR terbesar adalah 1,89% ($f=50\text{Hz}$, $m_a=1$). Pada kondisi beban resistif+induktif LVUR terbesar adalah 0,91% ($f=50\text{Hz}$, $m_a=0,5$). 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 *Z-source inverter* 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 sel surya atau konverter DC/DC sebagai pengganti sumber arus searah.

Referensi

- [1]. 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.
- [2]. 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.
- [3]. 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.
- [4]. G. Vidyannagar, "Electrical Engineering Development and Implementation of Spwm Logic Using Dspic33Fj16Gs402 for Three," pp. 317-322.
- [5]. V. Semiconductors, "IGBT/MOSFET Gate Drive Optocoupler," *Retrieved Jul*, vol. 26, pp. 2007-2008, 2011.
- [6]. V. Siliconix, "Product Summary Description Symbol Unit Test Conditions," no. V, pp. 1-9.
- [7]. D. Sheet and F. Number, "Mur1540, mur1560, rurp1540, rurp1560," no. 2778, pp. 1-4, 2000.
- [8]. M. H. Rashid, *POWER ELECTRONICS Academic Press Series in Engineering*. 2001.
- [9]. 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.
- [10]. 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.
- [11]. J. Tekniket *al.*, "Pembuatan Modul Inverter 3 Fase Sinusoidal Pulse Width Modulation Sebagai Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Terhubung Segitiga 220 Volt."
- [12]. M. Tecnology Inc., "Motor Control PWM dsPIC30F Family Reference Manual," pp. 15-44, 2007.
- [13]. Daniel W. Hart, *Power Electronics*. 2011.
- [14]. T. Sutikno, "Pengendalian Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa dengan Inverter Modulasi Lebar Pulsa Seragam Berbasis FPGA ACEX1K," pp. 17-26.