

Sinusoidal Pulse Width Modulation Berbasis Lookup Table untuk Inverter Satu Fase Menggunakan 16-Bit Digital Signal Controller

Yohan Fajar Sidik¹, F. Danang Wijaya², Eka Firmansyah³

Abstract—Inverter as one equipment relates closely to the renewable energy sector gain more and more important role in utilizing renewable energy widely. The inverter converts dc to ac form by a specific switching strategy. In this research, the switching strategy employed unipolar sinusoidal pulse width modulation (SPWM). The switching schemes were obtained by synthesis from sine lookup table that the width of pulses were obtained from simulation of PSIM. The aim of this research is to create a switching scheme in a software and then implemented in 16-bit digital signal controller (DSC). Experiment in lab scale has been done to verify the proposed unipolar SPWM. The results showed that SPWM signals were easier generated in 16-bit digital signal controller (DSC). Other that, feature of PWM in this DSC has been supporting in inserting dead-time to avoid shoot through current at IGBT.

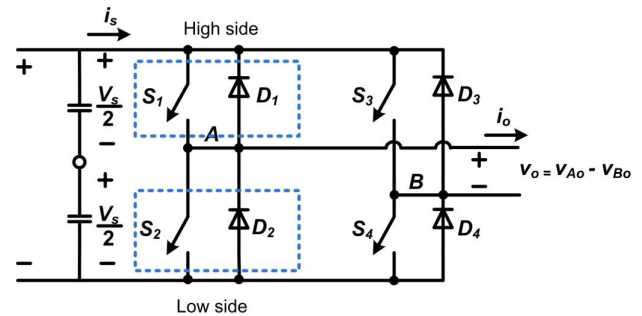
Keywords—renewable energy, inverter, SPWM, PSIM, 16-bit digital signal controller

Intisari—Inverter memiliki peranan penting dalam pemanfaatan energi terbarukan secara luas. Inverter ini mengkonversi tegangan dc menjadi ac dengan metode penyaklaran tertentu. Pada penelitian ini metode penyaklaran yang dipilih adalah unipolar sinusoidal pulse width modulation (SPWM). Pola-pola penyaklarannya merupakan sintesis dari sebuah tabel sinus yang lebar pulsanya diperoleh melalui simulasi PSIM. Tujuan penelitian ini adalah untuk membuat pola penyaklaran dalam perangkat lunak kemudian diimplementasikan dalam 16-bit digital signal controller (DSC). Ekperimen dalam skala lab telah dilakukan untuk memverifikasi teknik penyaklaran unipolar SPWM yang diusulkan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sinyal SPWM dengan mudah dapat dibangkitkan oleh 16-bit digital signal controller (DSC). Selain itu, fitur PWM pada DSC ini telah mendukung penyisipan *dead time* untuk menghindari arus *shoot through* pada IGBT.

Kata Kunci—energi terbarukan, inverter, SPWM, PSIM, 16-bit digital signal controller

I. PENDAHULUAN

Pemanfaatan energi terbarukan perlu ditingkatkan agar penggunaan energi fosil dapat dikurangi. Inverter sebagai salah satu peralatan yang terkait langsung dalam pemanfaatan energi terbarukan ini semakin penting untuk dikembangkan. Pengembangan inverter dapat terkait pada topologi dan teknik penyaklaran yang digunakan. Secara umum teknik penyaklaran



Gbr. 1. Rangkaian inverter dengan topologi *full-bridge*

yang digunakan adalah *sinusoidal pulse width modulation* (SPWM).

Studi mengenai SPWM untuk inverter satu fase dapat ditemukan pada referensi [1], [2]. Teknik SPWM yang digunakan oleh [1] dan [2] menggunakan teknik penyaklaran bipolar SPWM yang harmoniknya lebih tinggi dibandingkan dengan unipolar SPWM [3]. Kelebihan teknik yang diusulkan oleh keduanya adalah telah digunakannya *digital signal processor* (DSP) untuk menghasilkan pola penyaklarannya. Dengan menggunakan chip DSP, kendali algoritma kendali yang rumit dapat dengan mudah diimplementasikan. Kendali digital lainnya adalah menggunakan *field page grid array* (FPGA) [4].

Pada paper ini pola penyaklaran yang digunakan untuk inverter satu fase dengan topologi *full-bridge* adalah SPWM unipolar yang pola penyaklarannya dibuat dalam perangkat lunak PSIM. SPWM unipolar dipilih karena kandungan harmoniknya lebih rendah dibandingkan dengan bipolar SPWM [3]. Algoritma ini diterapkan dalam *16-bit low cost digital signal controller* dsPIC304012. Pembuatan tabel sinus dan pengaturan sistem pewaktuan PWM dalam dsPIC30F4012 juga dipaparkan pada paper ini. Pada paper ini juga disajikan perbandingan hasil simulasi dan hasil eksperimen terkait pola penyaklaran yang digunakan dan bentuk gelombang keluaran inverter.

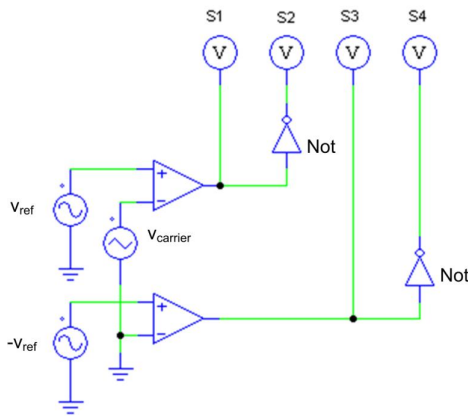
Paper terdiri dari pendahuluan, teori dasar teknik penyaklaran inverter, perancangan tabel sinus, pembentukan SPWM dalam *digital signal controller* (DSC), hasil simulasi dan eksperimen, dan kesimpulan.

II. RANGKAIAN SISTEM INVERTER SATU FASE

Topologi inverter yang digunakan adalah *full-bridge*. Topologi ini merupakan topologi yang sederhana tetapi menghasilkan daya keluaran dua kali lipat daripada tegangan *half-bridge* [3]. Rangkaian inverter dengan topologi *full-bridge* ditunjukkan pada Gbr. 1. Pada gambar tersebut terlihat bahwa inverter satu fase dengan topologi *full-bridge* terdiri dari empat

¹Mahasiswa Pascasarjana, Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Jln. Grafika 2 Yogyakarta 55281 INDONESIA (yohanfajarsidik@live.com)

^{2,3}Pengajar, Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Jln. Grafika 2 Yogyakarta 55281 INDONESIA (e-mail: danang@te.uem.ac.id, eka.firmansyah@gmail.com)



Gbr. 2. Perbandingan antara sinyal referensi dengan sinyal pembawa menghasilkan sinyal SPWM

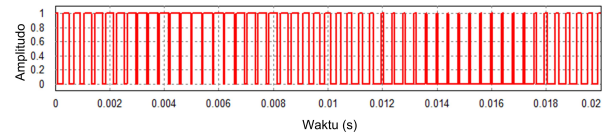
buah saklar semikonduktor. Pada penelitian ini, saklar-saklar tersebut diberi penamaan S_1 dan S_2 yang masing-masing untuk saklar sisi atas dan sisi bawah pada *leg* A. Sedangkan S_3 dan S_4 adalah untuk saklar sisi atas dan sisi bawah pada *leg* B. Saklar dalam satu *leg* merupakan sinyal yang saling berkomplemen yang tidak boleh hidup secara bersamaan karena dapat membuat hubung singkat pada sumber tegangan dc-nya.

Tegangan keluaran inverter merupakan beda potensial antara titik A dan B (lihat Gbr. 1). Saat saklar S_1 dan S_4 nyala berbarengan, titik A akan mendapat tegangan sebesar tegangan relnya V_s dan titik B akan terhubung ke *ground* sehingga besar tegangan keluaran inverter adalah V_s . Sedangkan saat S_3 dan S_2 nyala berbarengan, titik B akan mendapat tegangan sebesar tegangan rel V_s dan titik A akan terhubung ke *ground* sehingga besar tegangan keluaran inverter adalah $-V_s$. Dengan cara seperti itu, tegangan dc dapat dikonversi menjadi tegangan ac.

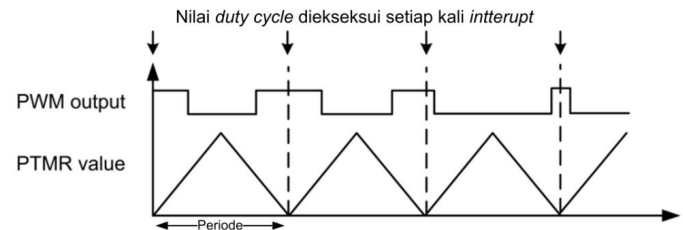
III. TEKNIK PENYAKLARAN

Sinyal unipolar SPWM dibentuk dari perbandingan antara dua buah sinyal referensi yang berbeda fase sebesar 180 derajat dengan sebuah sinyal pembawa [3]. Sinyal referensinya berupa sinyal sinus dengan amplitudo dan frekuensi tertentu. Besar amplitudo sinyal referensi akan menentukan besar tegangan keluaran inverter, sedangkan frekuensi sinyal referensi menentukan besar frekuensi keluaran inverter. Kedua parameter ini dapat disebut parameter kendali untuk menentukan besar tegangan dan frekuensi inverter yang diharapkan. Sinyal pembawanya merupakan sinyal segitiga yang frekuensinya dipertahankan tetap. Perbandingan antara amplitudo sinyal referensi dengan sinyal pembawa disebut indeks modulasi tegangan. Sedangkan perbandingan antara frekuensi sinyal referensi dengan frekuensi sinyal pembawa disebut indeks modulasi frekuensi.

Dalam perangkat lunak PSIM, sinyal SPWM dapat dibentuk dengan menggunakan komparator sebagai pembandingan antara sinyal referensi dan sinyal pembawa seperti ditunjukkan pada Gbr. 2. Pada gambar tersebut terdapat sinyal V_{ref} dalam bentuk sinus dengan fase 0, sinyal $-V_{ref}$ dalam bentuk sinus dengan fase 180 derajat, dan sinyal $V_{carrier}$ sebagai sinyal pembawa. Hanya terdapat satu sinyal untuk setiap keluaran komparator sehingga akan dihasilkan dua buah sinyal SPWM saja. Sinyal SPWM pasangannya merupakan komplemen yang



Gbr. 3. Pola SPWM dalam satu periode untuk satu buah saklar



Gbr. 4. Proses *update duty cycle* PWM untuk membentuk SPWM [5]

dibentuk dengan memberi logika *NOT* pada setiap keluaran komparator.

IV. PERANCANGAN SINE LOOKUP TABLE

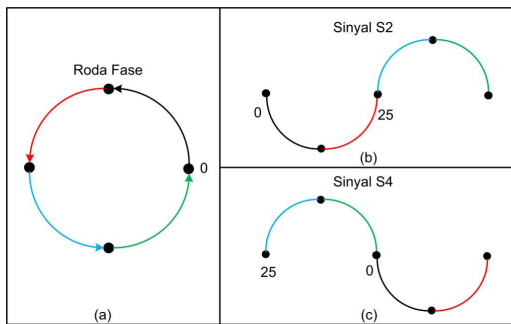
Implementasi algoritma SPWM dalam sebuah mikrokontroler pada dasarnya adalah sama dengan prinsip dalam simulasi. Tetap diperlukan sebuah perbandingan antara sinyal referensi dengan sinyal pembawa. Sinyal pembawa dalam mikrokontroler adalah sistem pewaktuan PWM. Sistem pewaktuan dalam dsPIC30F4012 dapat dipilih dalam mode cacah naik dan cacah turun dalam satu periode. Dengan demikian sistem pewaktuan PWM dalam dsPIC dapat digunakan sebagai sinyal pembawa. Sedangkan sinyal referensi dapat dibentuk dengan bantuan perangkat lunak PSIM untuk membentuk lebar-lebar pulsa dalam satu periode sinus. Data-data lebar pulsa ini kemudian disimpan dalam variabel *array* sehingga memiliki alamat yang spesifik dengan nilai 0 sampai dengan $n - 1$ data. Serentetan pola-pola sinus yang disimpan dalam variabel *array* ini umumnya disebut *sine lookup table*.

Hanya dibutuhkan sebuah pola SPWM untuk membuat empat buah sinyal S_1 , S_2 , S_3 , dan S_4 dalam dsPIC30F4012. Pola SPWM dapat diperoleh dengan cara membuat rangkaian pada perangkat lunak PSIM seperti ditunjukkan pada Gbr. 2. Dengan menjalankan simulasinya dapat diperoleh pola sinyal S_2 seperti ditunjukkan pada Gbr. 3. Gbr. 3 merupakan pola SPWM untuk satu frekuensi 50 Hz sehingga periodenya adalah 20 ms. Indeks modulasi tegangannya adalah 0,8 dan indeks modulasi frekuensi adalah 50. Dengan demikian frekuensi sinyal pembawa atau disebut juga frekuensi penyaklarannya adalah 2500 Hz.

Banyak pulsa pada Gbr. 3 adalah 50 buah. Lebar pulsa *high* pada sinyal tersebut kemudian dihitung lebar pulsanya dengan cara memilih menu *edit* kemudian pilih *view data points*. Hasilnya ditunjukkan pada Tabel I. Pada Tabel I ini hanya sebagian data yang ditampilkan. Pada tabel tersebut memuat juga hasil konversi nilai pulsa dalam satuan waktu menjadi nilai register untuk *duty cycle* PWM dalam dsPIC30F4012. Pada dasarnya nilai tersebut merupakan rasio pewaktuan dalam dsPIC30F4012 agar diperoleh lebar pulsa dalam waktu tertentu. Perhitungan nilai register tersebut akan dijelaskan pada bagian selanjutnya.

Table I
TABEL POLA SPWM DALAM SATU PERIODE

No.	Lebar Pulsa (μs)	Nilai Register PDC
1.	190	3040
2.	170	2720
3.	150,6	2410
4.	131,8	2109
5.	114,2	182,7
6.	97,9	1566
7.	83,3	1333
8.	70,5	1128
9.	59,7	955
10.	51,1	818
...
46.	285,7	4571
47.	268,1	4290
48.	249,4	3990
49.	230	3680
50.	210,1	3362



Gbr. 5. Ilustrasi pembentukan dua buah sinyal yang berbeda fase 180 derajat

V. PEMBENTUKAN SPWM DALAM DSPIC30F4012

Seperti telah dijelaskan pada bagian III bahwa SPWM dibentuk dari hasil perbandingan antara sinyal referensi dengan sinyal pembawa yang berupa segitiga. Dalam implementasinya, sinyal referensi ini berupa *sine lookup table* yang berisi sekumpulan pola sinus yang akan menjadi *duty cycle* dalam sebuah PWM. Umumnya, PWM adalah pulsa-pulsa dengan *duty cycle* tertentu yang tetap. Dengan cara memodifikasi *duty cycle* menyerupai pola sinus maka akan diperoleh SPWM. Perubahan besar *duty cycle* dilakukan dengan mode *interrupt* seperti ditunjukkan pada Gbr. 4. Perubahan data dilakukan dengan cara pengambilan data dari *sine lookup table*.

dsPIC30F4012 ini memiliki 3 buah pasang modul PWM. Pada penelitian ini hanya digunakan 2 modul karena sinyal yang dibangkitkan berjumlah empat, yaitu sinyal $S_1, S_2, S_3,$ dan S_4 . Empat buah sinyal tersebut dapat dihasilkan dari sebuah pola SPWM.

Fokus utama pembentukan SPWM dalam dsPIC30F4012 hanyalah dua buah sinyal yang berbeda fase 180 derajat. Ilustrasi pembentukan sinyal ini ditunjukkan pada Gbr. 5. Pada Gbr. 5a terdapat gambar lingkaran yang merepresentasikan roda fase amplitudo sinus dalam satu siklus. Setiap titik pada roda fase tersebut memiliki sebuah alamat dari nol sampai dengan 49. Alamat maksimal 49 adalah karena pada penelitian ini indeks modulasi frekuensinya adalah 50 yang berarti terdapat 50 pulsa untuk membentuk sebuah sinyal sinus. Sinyal sinus yang dibangkitkan dengan alamat awal nol akan menghasilkan sinyal seperti ditunjukkan pada Gbr. 5b,

sedangkan sinyal sinus yang alamat awalnya adalah 25 akan menghasilkan sinyal seperti ditunjukkan pada Gbr. 5c. Dengan demikian, secara digital proses pergeseran fase sebesar 180 derajat dapat diperoleh dengan mengatur nilai awal pencacah (baca: *counter*) sebesar nol dan sebesar setengah dari jumlah data yang tersedia dalam tabel sinus. Proses pembentukan kedua buah sinyal lainnya adalah dengan mengaktifkan mode *complementary* dalam dsPIC30F012. Dengan mode tersebut secara otomatis akan dihasilkan keluaran PWM yang saling berkomplemen. Fitur menarik dalam dsPIC30F4012 adalah dapat disisipkannya nilai *dead time* pada sinyal dengan mode *complementary*. *Dead time* adalah jeda waktu antara kedua buah sinyal yang berkomplemen untuk mencegah kedua buah saklar nyala secara bersamaan. Kondisi nyala berbarengan ini dimungkinkan terjadi karena saklar semikonduktor seperti IGBT dan MOSFET bukanlah saklar yang ideal.

Hal-hal teknis dalam penerapan SPWM dalam dsPIC30F4012 ini adalah pengaturan sistem pewaktuan siklus instruksi F_{cy} dan sistem pewaktuan PWM. Pada penelitian ini sistem pewaktuan instruksi F_{cy} diatur agar dapat bekerja pada frekuensi 16 MHz. Sedangkan pengaturan PWM dengan mode pencacah waktu naik dan turun terdapat pada Persamaan 1.

$$PTPER = \frac{F_{cy}}{F_{PWM} \cdot (PTMR \text{ prescaler}) - 2} - 1 \quad [5] \quad (1)$$

dengan $PTPER$ adalah register periode PWM, F_{PWM} adalah frekuensi penyaklaran yang diinginkan, dan $PTMR \text{ prescaler}$ adalah *precaler* pewaktuan PWM. Perhitungan untuk penelitian ini adalah:

$$\begin{aligned} PTPER &= \frac{F_{cy}}{F_{PWM} \cdot (PTMR \text{ prescaler}) \cdot 2} - 1 \\ &= \frac{16 \text{ MHz}}{2500 \text{ Hz} \cdot 2} - 1 = 3199 \end{aligned}$$

Duty cycle PWM dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.

$$PDC_x = \text{duty} \cdot (PTPER + 1) \cdot 2 \quad [5] \quad (2)$$

Nilai *duty cycle* maksimumnya adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} PDC_x &= \text{duty} \cdot (PTPER + 1) \cdot 2 \\ &= 1 \cdot (3199 + 1) \cdot 2 = 6400 \end{aligned}$$

Agar tabel sinus yang telah dibuat sebelumnya dapat digunakan untuk *duty cycle* PWM, data dalam tabel tersebut harus dikonversi menjadi nilai yang sesuai untuk register PDC_x . Persamaannya yang digunakan adalah Persamaan 3.

$$PDC = \text{lebar pulsa}(\mu s) \cdot \frac{\text{MaxPDC}}{\text{Periode PWM}} \quad (3)$$

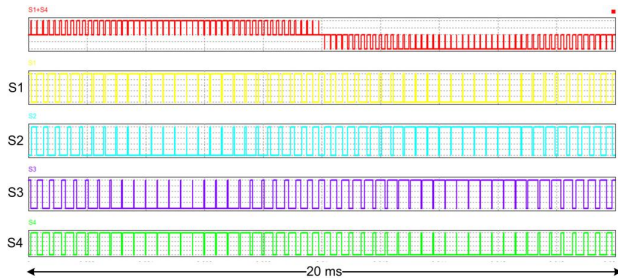
Sebagai contoh, konversi pulsa dengan lebar 190 μs adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} PDC &= \text{lebar pulsa}(\mu s) \cdot \frac{\text{Max PDC}}{\text{Periode PWM}} \\ &= 190 \mu s \cdot \frac{6400}{1/2500} = 3040 \end{aligned}$$

Hasil konversi yang lain dapat dilihat pada Tabel I.

Table II
TABEL PARAMETER SIMULASI DAN EKSPERIMEN

No.	Parameter	Nilai
1.	$f_{\text{penyaklaran}}$	2500
2.	indeks modulasi tegangan	0,8
3.	indeks modulasi frekuensi	50
4.	<i>dead time</i>	$4 \mu\text{s}$
5.	tegangan dc V_s	24 V
6.	Saklar	IRF540
7.	<i>Gate driver</i>	IR2110



Gbr. 6. Simulasi Pola SPWM untuk empat buah saklar

VI. HASIL SIMULASI DAN EKSPERIMEN

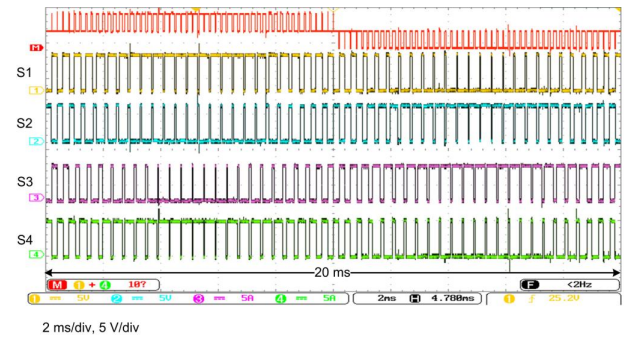
Pada penelitian ini telah dilakukan simulasi inverter satu fase dengan topologi *full-bridge* menggunakan perangkat lunak PSIM. Selain itu, eksperimen dalam skala lab telah dilakukan untuk memverifikasi hasil simulasi. Parameter simulasi dan eksperimen ditunjukkan pada Tabel II.

Gbr. 6 merupakan empat buah sinyal SPWM yang dihasilkan dari simulasi. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa sinyal S_1 berkomplemen dengan S_2 . Sedangkan sinyal S_3 berkomplemen dengan S_4 . Apabila sinyal S_1 dan sinyal S_4 ditambahkan maka akan diperoleh sinyal yang berwarna merah yang dapat merepresentasikan bentuk tegangan keluaran inverter. Dapat dilihat bahwa tegangan keluaran tersebut menyerupai pola sinus dengan frekuensi 50 Hz atau periodenya 20 ms. Hasil eksperimen menunjukkan hasil yang sama dengan simulasinya. Hal ini dapat diamati pada Gbr. 7. Dengan demikian pembangkitan empat buah sinyal ini telah sukses dibuat hanya dari satu buah pola sinus yang disimpan dalam bentuk tabel.

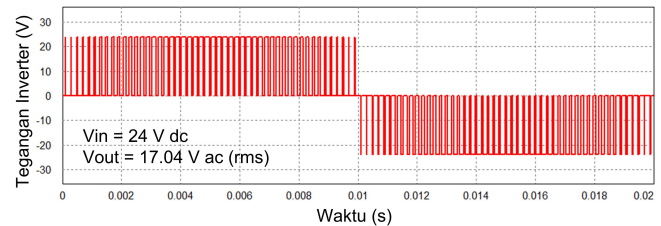
Hasil simulasi dan eksperimen lainnya adalah bentuk gelombang tegangan keluaran inverter. Bentuk tegangan hasil simulasi dapat dilihat pada Gbr. 8. Dengan masukan sebesar 24 Vdc akan diperoleh tegangan keluaran inverter sebesar 17,03 Vac. Hal ini diperkuat dengan hasil eksperimen pada Gbr. 9 yang menghasilkan bentuk gelombang tegangan yang serupa dengan bentuk gelombang hasil simulasi. Tegangan rms keluaran inverter pun hampir sama yaitu sebesar 17,02 Vac. Perbedaan nilai tegangan tersebut dikarenakan semua rangkaian pada PSIM adalah ideal. Padahal dalam kenyataannya terdapat rugi-rugi yang berupa rugi penyaklaran dan konduksi pada setiap IGBT/MOSFET. Berdasarkan hasil ini, PSIM telah menyimulasikan rangkaian inverter topologi *full-bridge* dengan baik. Pola SPWM untuk tabel sinus pun dapat diperoleh dengan mudah melalui PSIM.

VII. KESIMPULAN

Pembuatan pola penyaklaran SPWM telah dilakukan pada penelitian ini. Pola tersebut diperoleh melalui perangkat lunak PSIM yang diimplementasikan ke dalam sebuah



Gbr. 7. SPWM keluaran dari dsPIC30F4012 untuk empat buah saklar

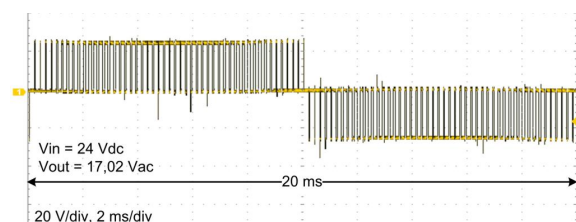


Gbr. 8. Hasil simulasi tegangan keluaran inverter

mikrokontroler berbiaya murah. Berdasarkan hasil pengujian, mikrokontroler dsPIC30F4012 telah berhasil menghasilkan pola-pola penyaklaran berbentuk unipolar SPWM. Kelebihan dsPIC30F4012 ini adalah dapat membangkitkan *dead time* antara sinyal sisi atas dan sisi bawah sehingga dapat menghindari arus *shoot through* pada saklar IGBT.

REFERENCES

- [1] B. Ismail, S. Taib, A. Saad, M. Isa, and C. Hadzer, "Development of a single phase spwm microcontroller-based inverter," in *Power and Energy Conference, 2006. PECon '06. IEEE International*, nov. 2006, pp. 437–440.
- [2] M. Tajuddin, N. Ghazali, I. Daut, and B. Ismail, "Implementation of dsp based spwm for single phase inverter," in *Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM), 2010 International Symposium on*, june 2010, pp. 1129–1134.
- [3] N. Mohan and T. M. Undeland, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, 2nd ed. United States of America: John Wiley and Sons, Inc., 1989.
- [4] A. Afarulrazi, M. Zarafi, W. Utomo, and A. Zar, "Fpga implementation of unipolar spwm for single phase inverter," in *Computer Applications and Industrial Electronics (ICCAIE), 2010 International Conference on*, dec. 2010, pp. 671–676.
- [5] Microchip Technology Inc., "Motor control pwm," Tech. Rep., 2007.



Gbr. 9. Hasil eksperimen tegangan keluaran inverter