

IMPLEMENTASI SINUSOIDAL PULSE WIDTH MODULATION PADA INVERTER SATU FASE BERBASIS LOOKUP TABLE MENGUNAKAN MIKROKONTROLER 16-BIT

Turahyo^{1*}, Noviarianto²

¹Teknik Elektro, Sekolah Tinggi Teknologi, Bontang,
Jl Ir Juanda no 73 rawa indah Bontang, 75311

²Teknika, Politeknik Maritim Negeri Indonesia, Semarang,
Jl Pawiyatan Luhur I/1 Bendan Duwur, Semarang 50233

*Email : turahyoahyo@gmail.com

ABSTRAK

Inverter merupakan salah satu elemen terpenting dalam pemanfaatan energi terbarukan. Dengan menggunakan teknik pensaklaran tertentu, inverter dapat mengkonversi tegangan dc menjadi tegangan ac. Unipolar sinusoidal pulse width modulation (SPWM) merupakan metode pembangkit gelombang sinusoida yang digunakan dalam paper ini. Data pola-pola amplitudo gelombang sinusoida dalam satu siklus dihasilkan menggunakan software DsPicWorks sedangkan 5kHz merupakan frekuensi pensaklaran pada saklar daya. Hasil penelitian menunjukkan metode unipolar SPWM mudah diimplementasikan dalam mikrokontroler 16-bit, selain itu bentuk tegangan keluaran inverter berupa gelombang sinusoida dengan tegangan 0-274 volt pada beban 0-340W dengan total harmonic distortion (THD) tegangan sebesar 4,41%.

Kata kunci: *Inverter Satu Fase, Lookup table, SPWM*

ABSTRACT

Inverter is one of the most important elements in the utilization of renewable energy. By using a certain switching technique, the inverter can convert dc voltage to ac voltage. Unipolar sinusoidal pulse width modulation (SPWM) is a method of generating sinusoidal waves used in this paper. The amplitude patterns data of the sinusoidal wave in one cycle is generated using DsPicWorks software while 5kHz is the switching frequency on the power switch. The results showed unipolar SPWM method is easy to be implemented in 16-bit microcontroller besides the inverter output voltage waveform is sinusoidal wave with 0-274 volt voltage at 0-340W load with total harmonic distortion (THD) voltage is 4,41%.

Keywords : *Single Phase Inverter, Lookup table, SPWM*

PENDAHULUAN

Penggunaan energi fosil dapat dikurangi dengan meningkatkan penggunaan energi terbarukan. Dengan adanya perkembangan teknologi semikonduktor yang semakin pesat sangat mempengaruhi perkembangan penggunaan piranti elektronika ke dalam sistem tenaga listrik. Hal tersebut mempengaruhi pengendalian tegangan listrik menggunakan piranti semikonduktor menjadi semakin mudah dilakukan, tidak terkecuali pada inverter satu fase. Inverter merupakan salah satu elemen penting dalam pemanfaatan energi terbarukan yang semakin penting untuk dikembangkan. Beberapa model pengembangan

inverter meliputi teknik pembangkitan gelombang PWM dan topologi pensaklaran.

Untuk menghasilkan tegangan yang stabil dilakukan dalam bentuk simulasi. Simulasi menggunakan program komputer untuk kendali daya aktif inverter satu fase yang terintegrasi dengan *grid* mampu memberikan daya reaktif ke *grid* (F. Danang Wijaya, 2012). Studi yang dilakukan Bijoprasekhar tentang *single phase inverter* SPWM pada mikrokontroler dengan pembangkit sinyal SPWM menggunakan teknik *look-up table* yang memiliki THD yang lebih rendah dengan menambahkan *dead time control* pada kedua sinyal pulse width modulation (PWM) (Bijoprasekhar Majhi, 2014). Selain itu teknik

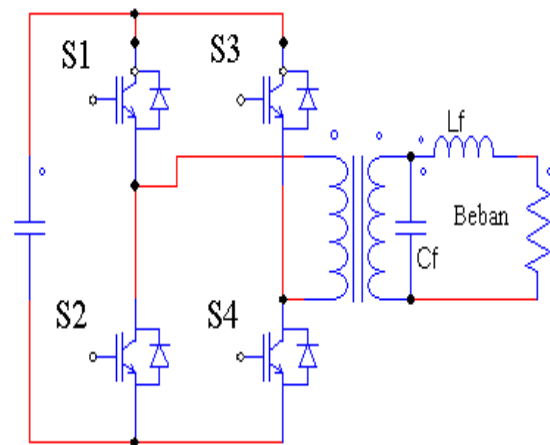
pensaklaran yang dilakukan oleh Öztürk mengimplementasikan inverter satu fase menggunakan teknik pensaklaran bipolar yang mempunyai THD tegangan yang tinggi. Penelitian ini menggunakan topologi *full bridge inverter* sebagai saklar dayanya. Teknik pensaklaran *full bridge inverter* ini mempunyai efisiensi hampir 98% dengan THD yang rendah dan penyerapan konsumsi daya yang lebih kecil (Öztürk, 2013).

SPWM unipolar dan topologi pensaklaran *full bridge inverter* satu fase digunakan dalam paper ini. SPWM unipolar dipilih karena SPWM bipolar mempunyai THD tegangan yang lebih besar dibandingkan dengan THD tegangan SPWM unipolar (Liu H, 2012). Pola pensaklaran SPWM unipolar dibangkitkan menggunakan perangkat lunak DsPICworks dengan frekuensi pensaklaran 5kHz .

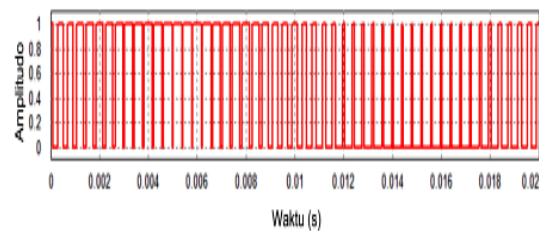
METODE

Topologi pensaklaran

Teknik pensaklaran *inverter* yang sering digunakan adalah teknik pensaklaran *full bridge inverter* atau yang lebih dikenal dengan *H bridge bipolar*. Dalam pensaklaran *H bridge bipolar* pasangan saklar S1, S4 dan S2, S3 bekerja secara bersama-sama. Dalam penelitian ini teknik pensaklaran menggunakan teknik *H bridge bipolar*. Teknik pensaklaran *H bridge bipolar* ini dipilih karena mempunyai efisiensi yang tinggi dengan THD yang baik serta penyerapan konsumsi daya yang lebih kecil . Pensaklaran *H bridge inverter* ditunjukkan pada gambar 1. Frekuensi yang digunakan dalam desain inverter satu fase ini adalah 50 Hz sehingga dalam 20 ms terdapat 50 pulsa pensaklaran seperti yang ditunjukkan dalam gambar 2. Transformator penaik tegangan digunakan untuk menaikkan tegangan dari 60 volt ke 220 volt ac sedangkan untuk memfilter tegangan keluaran dari inverter digunakan kapasitor dan induktor .



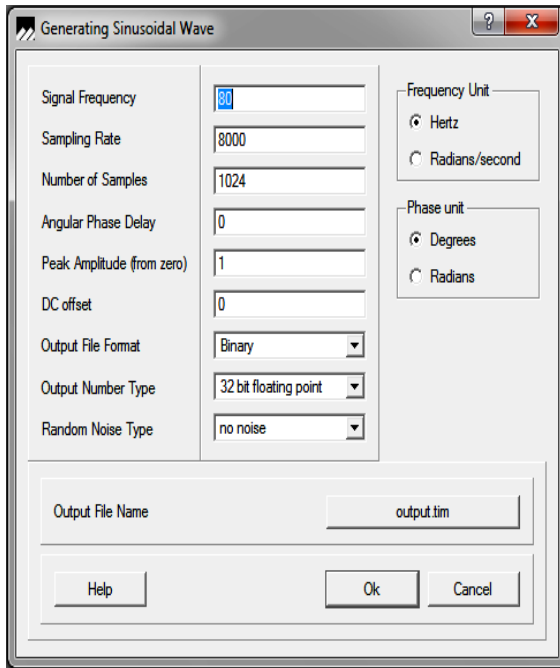
Gambar 1. H bridge inverter.



Gambar 2. Pulsa pensaklaran dalam satu periode.

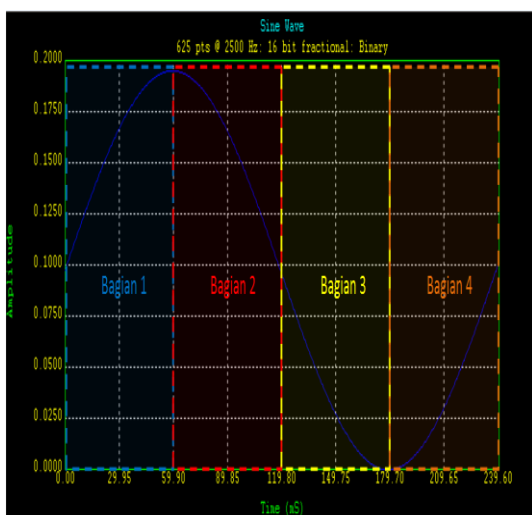
Sine Lookup Table

Dalam membangkitkan sinyal SPWM dibutuhkan sinyal pembawa dan sinyal pemodulasi. Sinyal pembawa berupa sinyal gelombang segitiga sedangkan sinyal pemodulasi berupa gelombang sinusoida. Dalam teknik *lookup table* gelombang sinusoida dihasilkan dari *sine lookup table* yang berisi data-data nilai amplitudo gelombang sinusoida dalam satu siklus. Nilai-nilai amplitudo ini digunakan sebagai *duty cycle* PWM. Perubahan pola sinusoida akan mempengaruhi perubahan *duty cycle* PWM. Dalam penelitian ini dsPICWorks digunakan sebagai pembangkit *sine lookup table*. Perangkat lunak ini dapat menganalisa data dan memproses sinyal digital yang kemudian dapat digunakan sebagai *file header* pada pemrograman dengan menggunakan *software MPLABX*. *File* yang dihasilkan pada dsPICWorks ini dapat berupa bilangan desimal dan bilangan hexsa desimal. Gambar 3 menunjukkan menu awal dari *software dsPICWorks*.



Gambar 3. Menu awal dsPICWorks.

Signal frequency, sampling rate, number of samples, angular phase delay, peak amplitude, dc offset, output file format, output number type merupakan menu *input* yang harus diisi untuk menghasilkan *sine lookup table*. Dalam penelitian ini frekuensi *switching* yang digunakan sebesar 5000 Hz sedangkan 1 Hz merupakan resolusi frekuensinya. Pola sinusoida merupakan pola yang periodik, sehingga pola sinusoida dapat dibentuk dari 4 buah bagian dalam satu siklus seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.



Gambar 4. 4 bagian pola sinusoida dalam satu siklus.

Referensi data sinusoida dalam satu siklus pada teknik *lookup table* dalam penelitian ini menggunakan seperempat dari data diskrit sinusoida sehingga menghemat data pada memory mikrokontroler.

Setting PWM pada mikrokontroler

Dalam pembangkit keluaran PWM pada mikrokontroler ini mempunyai 16 mode *output* PWM seperti yang ditunjukkan dalam gambar 5. Dalam penelitian ini *mode output* PWM yang digunakan adalah *mode PWM time base* yang didalam mode ini terdapat *mode up/down counting per periode* yang dapat digunakan sebagai sistem pewaktuan PWM sebagai pembangkit gelombang segitiga (pembawa). Register-register yang berperan dalam pembangkitan sinyal PWM pada Mikrokontroler ini adalah PWMCONx, DTCON1, PTCN, PTPER, PTMR, OVDCON, sedangkan proses *update duty cycle output* PWM ditunjukkan pada gambar 6.

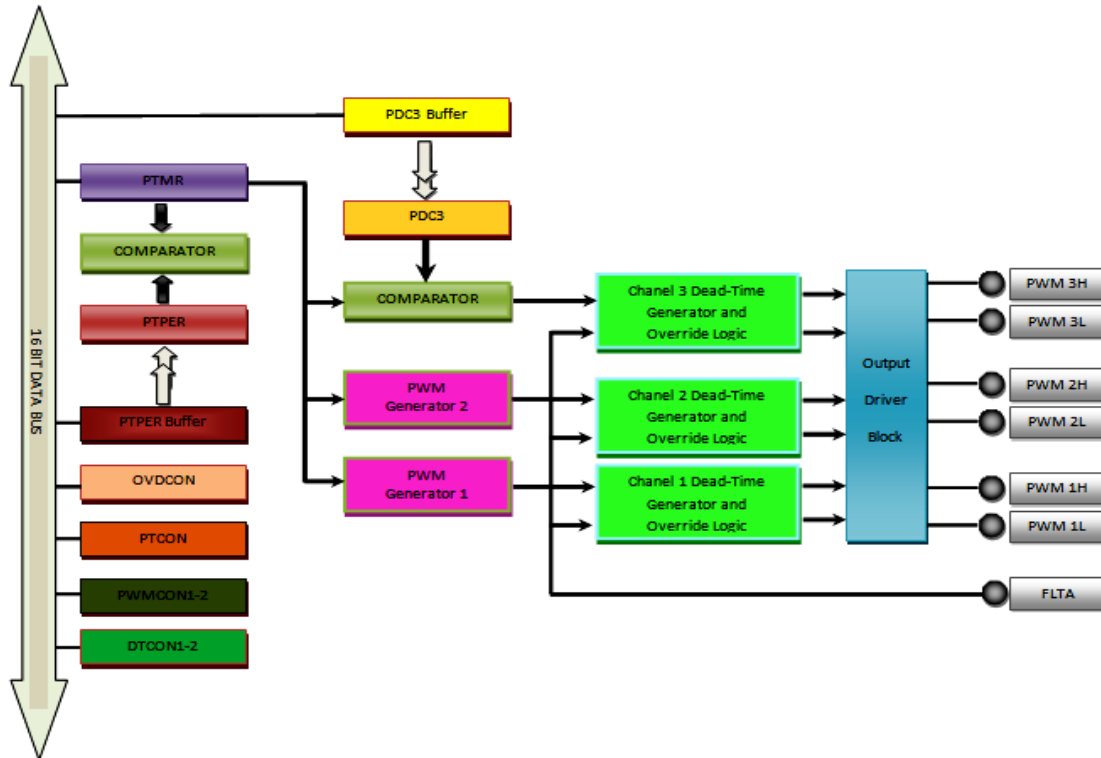
PTMR merupakan register yang berisi *timer* yang digunakan dalam pembangkit PWM. Didalam PTMR terdapat bit PTDIR yang digunakan untuk menentukan arah *counting up* atau *counting down timer*. PTPER adalah register 15-bit yang digunakan untuk menset *counting periode* pada PWM *time base*. PTPER ini berfungsi untuk menentukan batas atas dari *counting* yang dilakukan oleh register PTMR, sehingga nilai periode gelombang keluaran PWM dapat ditentukan dengan mengeset besaran nilai dari PTPER. Dalam teknik pembangkit SPWM nilai *duty cycle* selalu mengalami *update* seiring perubahan pada pola sinusoida yang sudah tersimpan dalam *sine lookup table*. Dengan mengaktifkan *interrupt*, *update* nilai *duty cycle* dapat dilakukan pada mikrokontroler. Dalam penelitian ini saat nilai *counting* PTMR = 0 mikrokontroler akan melakukan *interrupt* dan nilai *duty cycle* akan dieksekusi, sedangkan besaran nilai PTPER dapat dihitung menggunakan persamaan 1.0.

$$PTPER = \frac{F_{CY}}{F_{PWM} (PTMR_{prescaler}) - 2} - 1 \quad (1.0)$$

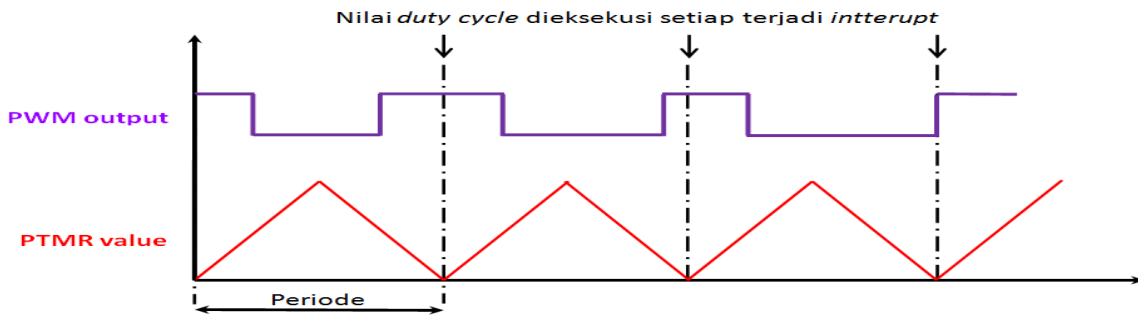
Pada proses pensaklaran daya menggunakan topologi *full bridge inverter* sinyal sisi atas berkebalikan dengan sinyal sisi bawah. Apabila sinyal sisi atas mati maka

sinyal sisi bawah harus hidup dan sebaliknya. Fitur komplement merupakan fitur dsPIC30f4011 yang mempermudah pengguna

untuk menghasilkan sinyal yang saling berkebalikan. Fitur ini dapat diaktifkan dengan menseset $PWMCON1bits.PMODx$ dengan nilai



Gambar 5. Diagram blok generator PWM



Gambar 6. Proses *update duty cycle* untuk menghasilkan SPWM

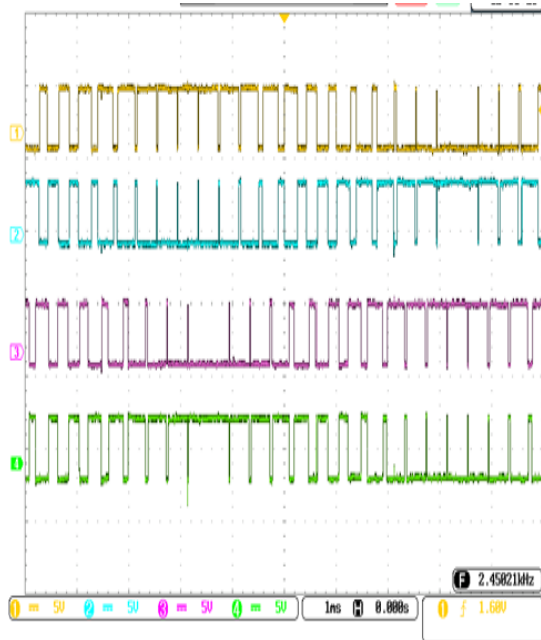
no1. Untuk setiap PDCx terdapat 2 buah *pin* PWM. Pada penelitian ini PDC1 digunakan untuk saklar S1 (PWM1H) dan S2 (PWM1L) sedangkan untuk PDC2 digunakan untuk saklar S3 (PWM2H) dan S4 (PWM2L).

HASIL DAN PEMBAHASAN
Output PWM Mikrokontroler

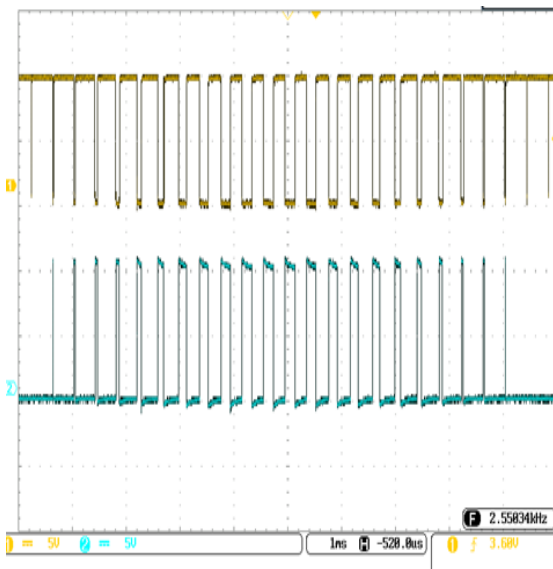
Sinyal gelombang SPWM yang dihasilkan dari mikrokontroler dapat diatur lebar *duty cycle*-nya dengan mengatur indeks modulasi. Indeks modulasi ini merupakan skala pengali

yang digunakan untuk mengatur amplitudo sinyal gelombang keluaran *inverter*. Dalam penelitian ini nilai indeks modulasi yang digunakan berada pada range 0 sampai 1. Semakin tinggi amplitudo gelombang keluaran, semakin tinggi pula nilai indeks modulasinya. Dalam sinyal keluaran SPWM ini, metode *lookup table* mensintesis pola sinusoida. Sinyal S1, S2, S3 dan S4 merupakan sinyal keluaran yang disintesis. Dalam sinyal keluaran SPWM ini sinyal S1 berkomplemen dengan sinyal S2 sedangkan sinyal S3 berkomplemen dengan sinyal S4 yang

mempunyai perbedaan sudut sebesar 180 derajat. Bentuk sinyal gelombang keluaran SPWM dengan frekuensi 50 Hz dan indeks modulasi 1 dapat ditunjukkan pada gambar 7, sedangkan Gambar 8 memperlihatkan pasangan gelombang SPWM sisi atas dan sisi bawah.



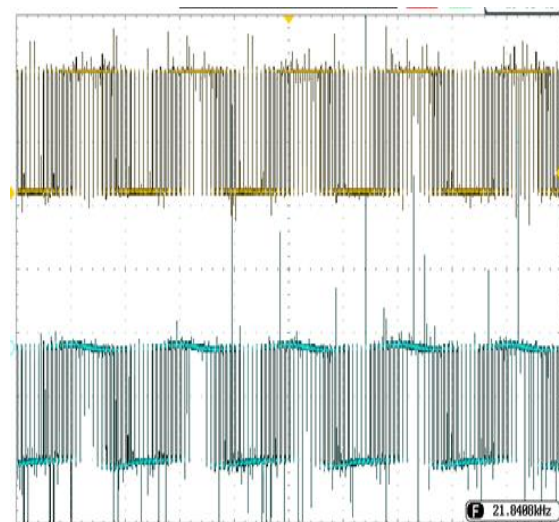
Gambar 7. SPWM keluaran mikrokontroler dengan frekuensi 50 Hz dengan indeks modulasi 1.



Gambar 8. Pasangan SPWM sisi atas (biru) dan sisi bawah (kuning) dengan indeks modulasi 1.

Tegangan Spike

Tegangan catu daya yang besar berdampak pada perubahan tegangan *spike* yang semakin besar. Kapasitor *bootstrap* diisi melalui dioda *ultra fast* yang tersambung dengan tegangan V_{cc} , sehingga besar tegangan pada kapasitor *bootstrap* adalah sebesar tegangan V_{cc} . Pengisian kapasitor *bootstrap* dilakukan pada kondisi *floating ground*, sehingga tegangan kapasitor *bootstrap* apabila diukur terhadap *ground* adalah sebesar $V_{dc} + V_{cc} = 60V + 11V = 71V$. Bentuk keluaran gelombang dari rangkaian *driver* menunjukkan adanya tegangan *spike* yang cukup tinggi pada MOSFET seperti yang diperlihatkan pada gambar 9.

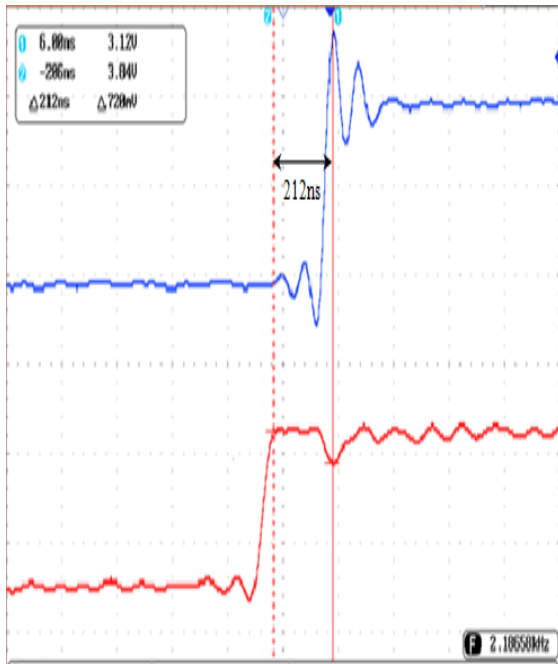


Gambar 9. Tegangan *spike* MOSFET sisi bawah (kuning) dan sisi atas (biru) pada catu daya 60 volt.

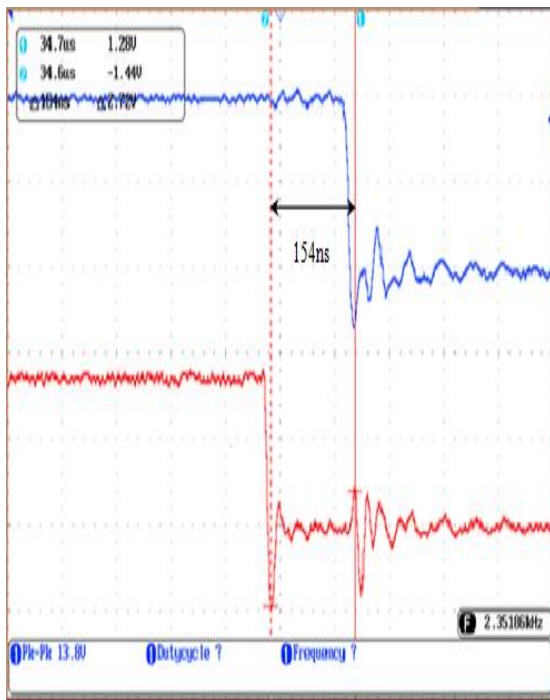
Sinyal SPWM Sisi Bawah

Dalam *inverter* satu fase ini terdapat dua sinyal SPWM sisi bawah, yaitu S2 dan S4. Dalam pengujian ini hanya akan melakukan pengujian pada sinyal S4. Berdasarkan pengujian yang dapat diamati pada gambar 10, terjadi perbedaan level tegangan, sedangkan bentuk kedua gelombang adalah sama. Dalam mikrokontroler level tegangan sebesar 5 volt, sedangkan level tegangan keluaran sinyal *gate drive* sebesar 11 volt. Dalam Gambar 10 dapat ditunjukkan *delay time* saat kondisi *turn-on* sebesar 212ns sedangkan *delay time* saat kondisi *turn-off* sebesar 154ns yang dapat dilihat pada gambar 11. Dalam penelitian ini *delay time* kondisi *turn-off* lebih kecil

dibandingkan dengan *delay time* kondisi *turn-on*.



Gambar 10. *Delay time* saat *turn-on* sisi keluaran mikrokontroler (merah) dan sisi keluaran *gate drive* (biru) pada sinyal S4.

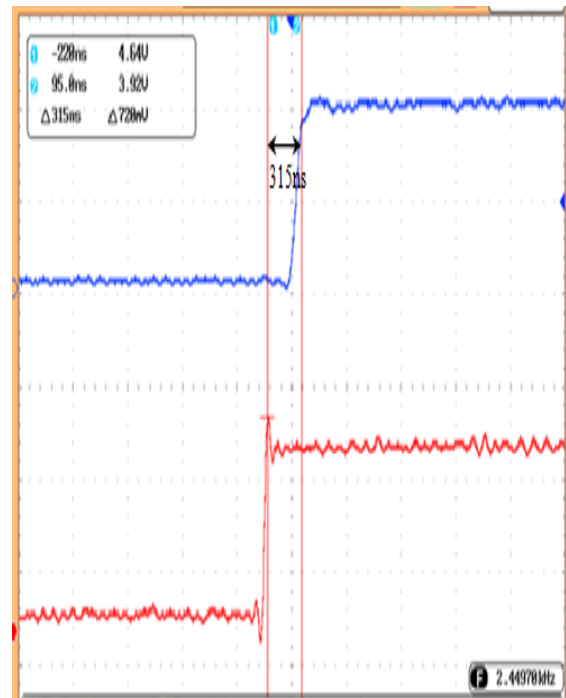


Gambar 11. *Delay time* saat *turn-off* sisi keluaran mikrokontroler (merah) dan sisi keluaran *gate drive* (biru) pada sinyal S4.

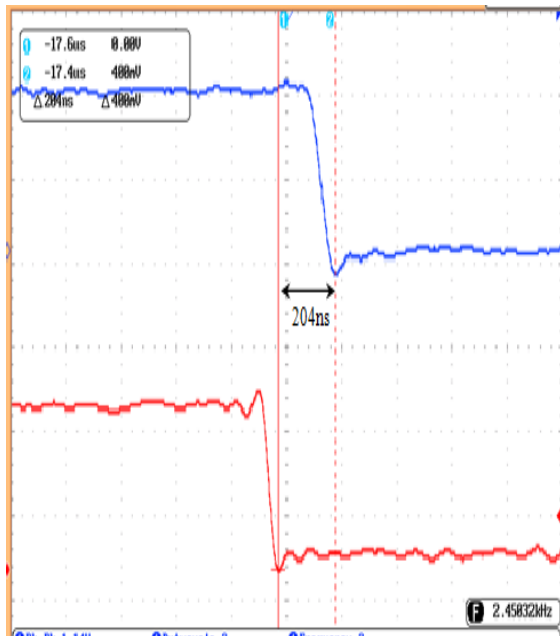
Sinyal SPWM Sisi Atas

Sinyal sisi atas dalam topologi *full bridge inverter* hanya dapat diamati apabila rangkaian penggerak tersambung dengan rangkaian saklar daya. Hal ini terjadi karena tegangan PWM sisi atas dihasilkan melalui penyediaan tegangan pada kapasitor *bootstrap*. Kapasitor *bootstrap* akan mendapatkan tegangan apabila saklar daya sisi bawah dalam kondisi *on* yang akan menghubungkan kaki negatif kapasitor *bootstrap* dengan *ground*.

Dalam penelitian ini terdapat 2 buah sinyal SPWM sisi atas, yaitu S1 dan S3. Pada pengujian ini hanya akan melakukan pengamatan pada sinyal S1 saja. Dalam gambar 12 dapat diamati, besar *delay time* antara sinyal dari IC IR2110 dan sinyal dari mikrokontroler saat kondisi *turn-on* sebesar 315ns sedangkan gambar 13 menunjukkan *delay time* saat kondisi *turn-off* sebesar 204ns. Berdasarkan pada pengujian ini *delay time* kondisi *turn-off* lebih kecil dibandingkan dengan *delay time* kondisi *turn-on*.



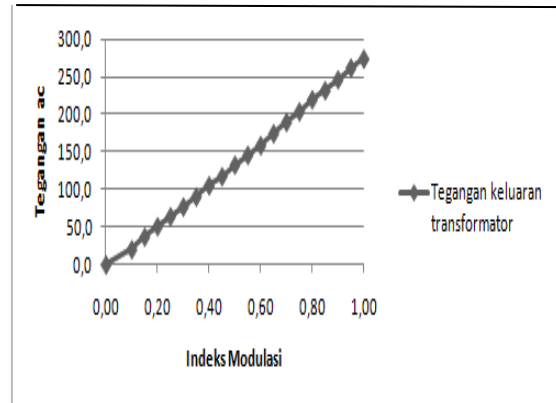
Gambar 12. *Delay time* saat *turn-on* sisi keluaran mikrokontroler (merah) dan sisi keluaran *gate drive* (biru) pada sinyal S1.



Gambar 13. Delay time saat turn-off sisi keluaran mikrokontroler (merah) dan sisi keluaran gate drive (biru) pada sinyal S1.

Kontrol Tegangan

Pengaturan tegangan pada mode manual dilakukan dengan mengubah nilai indeks modulasi secara manual. Dalam penelitian ini indeks modulasi berada pada kisaran 0-1 dengan resolusi indeks modulasi sebesar 0,01. Pada pengujian pengaturan tegangan mode manual, indeks modulasi dirubah dari nilai 0,00 sampai 1. Kemudian tegangan pada output transformator setelah lowpass filter diukur menggunakan alat ukur multimeter. Pada kondisi ini transformator tidak dikenakan beban. Gambar 14 memperlihatkan nilai indeks modulasi 0,1 meghasilkan tegangan keluaran transformator setelah lowpass filter sebesar 20,3 volt ac, sedangkan indeks modulasi dengan nilai 1 akan menghasilkan tegangan keluaran transformator setelah lowpass filter sebesar 274.4 volt ac. Tegangan nominal keluaran transformator yang digunakan adalah sebesar 220 volt ac sehingga indeks modulasi diset pada nilai 0.80 Berdasarkan pengujian inverter satu fase ini menghasilkan tegangan keluaran dalam rentang 0 – 274.4 volt ac dengan tegangan dc link sebesar 60 volt. Sedangkan tabel 1 memperlihatkan tegangan keluaran dan tegangan sensor output dari inverter satu fase.



Gambar 14. Grafik nilai indeks modulasi terhadap tegangan keluaran transformator setelah lowpass filter.

Tabel 1. Tegangan output Inverter

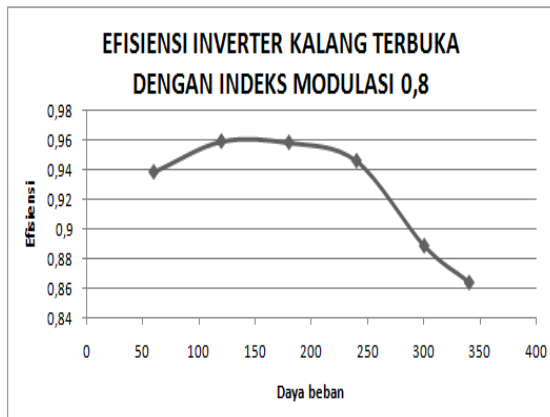
No	Tegangan ac input sensor (V)	Tegangan dc sensor output (V)
1	0	0
2	10	0.03
3	20	0.06
4	30	0.12
5	40	0.24
6	50	0.42
7	60	0.61
8	70	0.77
9	80	0.96
10	90	1.15
11	100	1.34
12	110	1.53
13	120	1.67
14	130	1.84
15	140	2.03
16	150	2.21
17	160	2.35
18	170	2.55
19	180	2.71
20	190	2.89
21	200	3.08
22	210	3.24
23	220	3.42
24	230	3.58
25	240	3.69
26	250	3.96
27	260	4.14
28	270	4.32
29	274	4.40

Effisiensi Inverter

Pengukuran efisiensi inverter dilakukan pada pembebanan yang bervariasi antara 60 – 340W. Inverter satu fase dibebani dengan hambatan tetap menggunakan lampu pijar dengan nilai daya lampu pijar yang bervariasi. Dalam penelitian ini beban daya yang digunakan dinaikan secara bertahap dengan

kenaikan beban daya sebesar 60 watt tiap step.

Dalam gambar 15 dapat diamati bahwa efisiensi *inverter* mengalami kenaikan pada saat beban dinaikan dari 60W menjadi 120W sedangkan efisiensi *inverter* cenderung menurun pada kisaran 96% sampai 86% saat *inverter* dibebani pada beban antara 120 - 340W. Dapat disimpulkan beban daya yang semakin besar mengakibatkan efisiensi *inverter* satu fase menjadi semakin menurun, begitu pula sebaliknya, sedangkan efisiensi rata-rata *inverter* berkisar 92%.



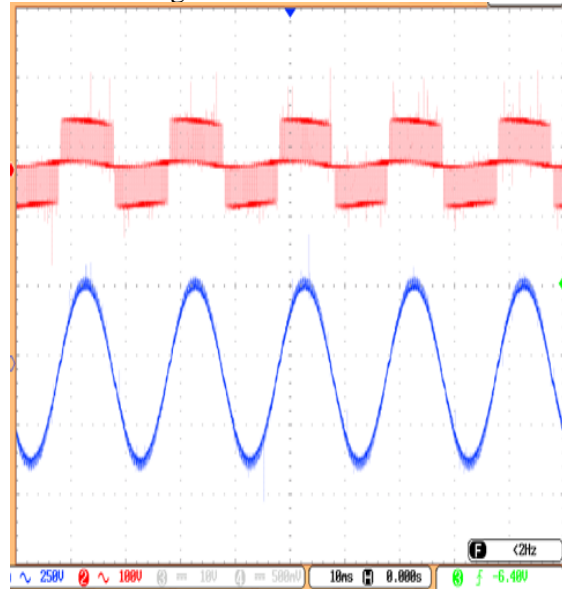
Gambar 15. Grafik efisiensi *inverter* dengan beban maksimum 340W kalang terbuka dengan indeks modulasi 0,8.

Bentuk Gelombang Tegangan

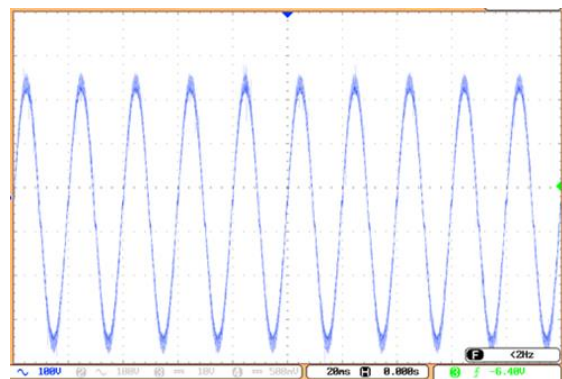
Bentuk sinyal gelombang masukan dan keluaran pada transformator penaik tegangan merupakan bagian yang diamati pada pengujian ini. Sinyal keluaran dari *full brigde inverter* merupakan sinyal masukan pada transformator penaik tegangan.

Gambar 16 menunjukkan bentuk gelombang tegangan tanpa beban. Berdasarkan gambar tersebut terdapat dua buah sinyal yaitu sisi atas adalah bentuk gelombang tegangan masukan transformator penaik tegangan sedangkan pada sisi bawah merupakan bentuk gelombang tegangan keluaran transformator setelah *lowpass filter*. Berdasarkan pengamatan pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa bentuk gelombang tegangan masukan masih berbentuk gelombang kotak sedangkan bentuk gelombang tegangan keluaran transformator penaik tegangan setelah *lowpass filter* berbentuk gelombang sinusoida. bentuk gelombang keluaran transformator setelah

lowpass filter akan semakin menyerupai pola sinusoida apabila beban *resitif* yang diberikan pada transformator semakin besar. Gambar 17 memperlihatkan bentuk gelombang keluaran *inverter* dengan beban 240 watt.

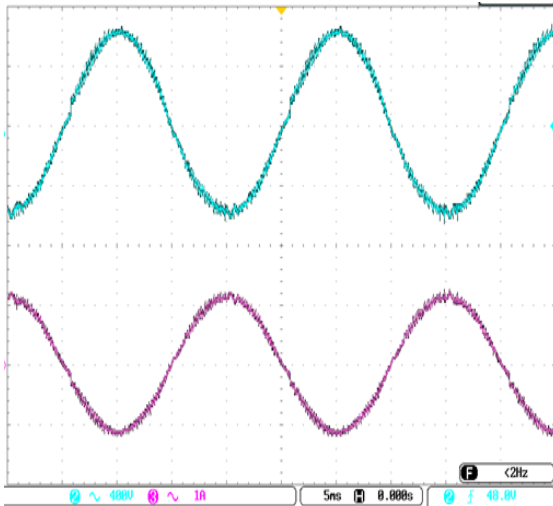


Gambar 16. Bentuk gelombang tegangan tanpa beban, sisi masukan transformator (merah) dan sisi keluaran transformator setelah *lowpass filter* (biru).

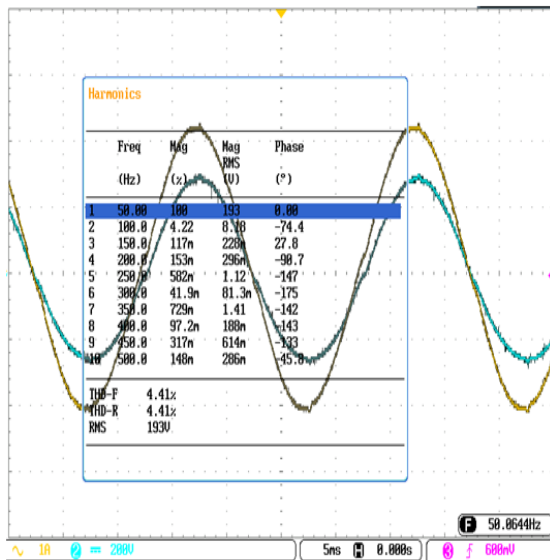


Gambar 17. Bentuk gelombang tegangan dengan beban 240W.

Dalam gambar 18 diperlihatkan bentuk gelombang arus dan tegangan keluaran transformator penaik tegangan setelah *lowpass filter* yang dibandingkan secara bersamaan dengan beban 340 watt, sedangkan gambar 19 menunjukkan THD tegangan pada beban 340 watt sebesar 4.41%.



Gambar 1 Bentuk gelombang sisi tegangan (biru) dan sisi arus (ungu) dengan beban 340W.



Gambar 19. THD tegangan keluaran inverter pada beban 340 watt

SIMPULAN DAN SARAN

Teknik *lookup table* cukup mudah diimplementasikan dalam mikrokontroler sebagai pembangkit sinyal SPWM pada inverter satu fase. Bentuk tegangan keluaran inverter berupa gelombang sinusoida dengan tegangan 0-274 volt ac pada beban 0-340W dengan *total harmonic distortion* tegangan sebesar 4,41%.

DAFTAR PUSTAKA

- H. Liu and J. Wang, 2012. Analysis and control of a single phase AC chopper in series connection with an auto-transformer, presented at the ICAC 12 - Proceedings of the 18th International Conference on Automation and Computing: Integration of Design and Engineering, pp. 49–54.
- Majhi Bijoprasad, 2014. Analysis of Single-phase SPWM Inverter, Department of Electrical Engineering National Institute of Technology, Rourkela.
- S.Öztürk and I.Çadirci. 2013. DSPIC Microcontroller Based Implementation of a Flyback PV Microinverter Using Direct Digital Synthesis. Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE).pp.3426-2433.
- Wijaya F. D and Firmansyah Eka, 2012. Sistem kendali daya aktif untuk inverter satu fase yang terintegrasi dengan jaringan distribusi 220 Vrms.” JTETI UGM.