

IMPLEMENTASI KONTROL ARUS PADA *INVERTER* SATU FASA MENGGUNAKAN DSPIC30F4011 DENGAN METODE KONTROL *PROPORTIONAL RESONANT*

Syah Jahan Al Achmad^{*)}, Iwan Setiawan, dan Trias Andromeda

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

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

Abstrak

Konsumsi energi global yang semakin besar dengan sumber energi yang terbatas membutuhkan suatu sumber green energy. Oleh karena itu, energi terbarukan yang berkelanjutan menjadi salah satu solusi untuk mengatasi hal ini. Tenaga angin, photovoltaic, ataupun pasang surut air laut merupakan beberapa contoh sumber energi tersebut dan menarik untuk diteliti. Konverter sangat diperlukan untuk merealisasikan sumber energi ini. Inverter satu fasa adalah konverter yang mengubah input DC menjadi output AC. Dalam Penelitian ini, dirancang inverter satu fasa tipe Full Bridge dengan metode kontrol proportional resonant menggunakan mikrokontroler 16-bit dsPIC30F4011 karena metode kontrol tersebut mampu memperbaiki respon sistem dengan cepat. Besarnya arus keluaran inverter diumpun-balikkan menggunakan sensor arus ACS712-05B. Pengujian dilakukan dengan rentang referensi arus sebesar 1 – 2,5 A pada variasi beban 4 Ω dan 9 Ω . Hasil pengujian menunjukkan bahwa kontrol proportional resonant adalah kontroler yang cocok untuk digunakan sebagai pengendalian arus AC pada inverter satu fasa yang dirancang. Ripple arus yang terjadi karena nilai filter induktor yang kurang sesuai. Tegangan output pada beban resistif yang kecil terjadi karena arus yang melewati beban resistif kecil, drop tegangan pada keluaran inverter, dan pembagi tegangan dari induktor karena dirangkai seri.

Kata Kunci: *Inverter, Kontrol Arus, Proportional Resonant, dsPIC30F4011.*

Abstract

The growing global energy consumption with limited energy sources requires a green energy resource. Nowadays, sustainable renewable energy becomes one of the solutions to overcome this problem. Wind power, photovoltaic, or seawater tidal are some examples of energy sources and they are interested to be investigated further. Converter is required to realize this energy source. Single-phase inverters are the converter which transform the Direct Current (DC) input to the Alternating Current (AC) output. In this research, the Full-phase type of one-phase inverter with proportional resonant current control method is designed using 16-bit microcontroller dsPIC30F4011 because the control method is able to improve the system's response quickly. The magnitude of the inverter output current is feedback by using the ACS712-05B current sensor. The test is carried out with a current reference in the range of 1 - 2.5 A on a load variation of 4 Ω and 9 Ω . The test results show that the proportional resonant control is the best controller for controlling AC current. The current ripples be while occur because the value of the inductor filter is less appropriate. A small output voltage in resistive load occurs because current that through the resistive load is small, the voltage's drop on inverter output and the voltage divider from the inductor because assembled in series.

Keywords: *Inverter, Current Control, Proportional Resonant, dsPIC30F4011.*

1. Pendahuluan

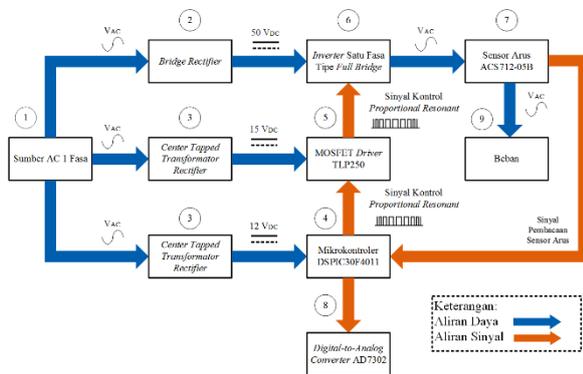
Peningkatan konsumsi jumlah energi global yang semakin cepat membutuhkan sumber *greener energy*. Oleh karena itu, energi terbarukan yang berkelanjutan dan tak habis-habis dari angin, *photovoltaic*, atau pasang surut air laut banyak diteliti. *Distributed power generation systems* (DPGS) cukup menarik dalam hal penjualan dan peneliti, dan yang paling penting dalam DPGS adalah *inverter* yang terkoneksi dengan *grid* menjadi pusat penelitian [1].

Inverter satu fasa adalah converter yang mengubah *input* DC menjadi *output* AC. *Inverter* dapat ditingkatkan menjadi *inverter* 3 fasa, yang lebih cocok untuk dikoneksikan ke *grid*. Keluaran *inverter* satu fasa adalah tegangan *output* (V_o) dan arus induktor (I_L) serta mengendalikan arus induktor agar dapat digunakan di *grid* [2]. Dalam penelitian ini telah dirancang *inverter* yang mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC satu fasa. Dari sekian metode pemecuan *inverter Pulse Width Modulation* (PWM), dipilih mode pemecuan *Sinusoidal*

Pulse Width Modulation (SPWM) untuk menghasilkan sinyal referensi sinusoidal yang presisi [3]. Oleh karena itu, dalam Penelitian ini telah dirancang *inverter* satu fasa dengan sistem kendali menggunakan dsPIC30F4011. Pembangkitan sinyal SPWM menggunakan dsPIC30F4011 lebih mudah dan ringkas karena mikrokontroler ini sudah langsung memiliki keluaran 6 *output* PWM, dan pembangkitan sinyalnya dilakukan melalui senarai program. Selain itu dsPIC30F4011 memiliki kemampuan *Digital Signal Processing* [4] yang mampu memproses data secara cepat dan mempunyai lebar data 16 bit [5]. Dalam Penelitian ini, dirancang *inverter* satu fasa dengan teknik pemucuan SPWM berbasis microcontroller 16-bit dsPIC30f4011. Pengendalian arus direalisasikan dengan menggunakan metode *Proportional Resonant*. Sinyal *carrier* dirancang pada 20 kHz. Diharapkan *inverter* yang telah dibuat memiliki performa handal dengan efisiensi tinggi dan arus keluaran *inverter* dapat menyesuaikan referensi.

2. Metode

Gambar 1. merupakan blok diagram perancangan perangkat keras *inverter* satu fasa dengan kontroler arus *Proportional Resonant*. Perancangan ini terdiri beberapa blok utama yaitu blok suplai AC 1 fasa, rangkaian daya, rangkaian kontrol, sensor arus ACS712-05B, *Digital to Analog Converter* AD7302, dan blok beban. Pada rangkaian kontrol terdapat rangkaian mikrokontroler DSPIC30F4011 dan rangkaian *driver* MOSFET TLP250. Pada rangkaian daya terdapat *full wave bridge rectifier* sebagai sumber daya DC masukan *inverter* dan *inverter* satu fasa tipe *Full Bridge*.



Gambar 1. Blok Diagram Perangkat Keras

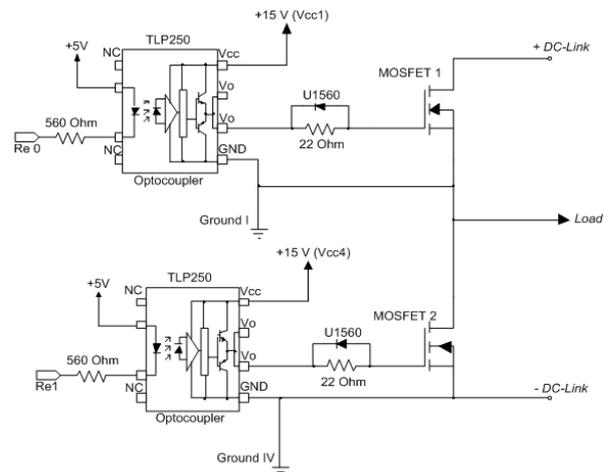
Spesifikasi *inverter* satu fasa tipe *full bridge* berdasarkan Gambar 1. yang dirancang pada penelitian ini dijelaskan sebagai berikut.

1. Sumber tegangan AC 1 fasa digunakan untuk mensuplai rangkaian daya dan rangkaian kontrol.
2. Suplai tegangan DC untuk rangkaian daya *inverter* diperoleh dari hasil penyearahan tegangan AC menggunakan *bridge rectifier*.

3. Suplai 15 V DC untuk rangkaian *driver* MOSFET dan mikrokontroler DSPIC30F4011 diperoleh dari hasil penyearahan tegangan AC keluaran trafo menggunakan *center-tapped full wave rectifier*.
4. Mikrokontroler 16-Bit DSPIC30F4011 digunakan untuk menghasilkan sinyal kontrol *Proportional Resonant* berdasarkan arus aktual yang terukur oleh sensor dan arus referensi yang diberikan. Arus referensi dihasilkan melalui pembacaan potensiometer melalui fasilitas ADC.
5. TLP250 digunakan sebagai MOSFET *driver* dengan suplai DC yang memiliki *ground* berbeda-beda pada sisi *high inverter* satu fasa.
6. Jenis *inverter* yang dirancang adalah *inverter* satu fasa tipe *full bridge*, yang terdiri dari empat buah MOSFET tipe IRF460.
7. Sensor arus ACS712-05B digunakan untuk mengukur arus keluaran *inverter* dan mengirim informasi berupa tegangan kepada mikrokontroler DSPIC30F4011 melalui fasilitas ADC.
8. *Digital-to-Analog Converter* AD7302 digunakan untuk menampilkan tegangan keluaran yang merepresentasikan arus referensi dan arus aktual yang diukur oleh sensor pada osiloskop.
9. Blok beban terdiri dari beban yang terhubung dengan keluaran *inverter* satu fasa. Beban yang digunakan dalam perancangan penelitian ini adalah berupa resistor.

2.1. MOSFET Driver TLP250

Rangkaian TLP250 digunakan untuk mengisolasi dan menguatkan sinyal kontrol *Proportional Resonant* dengan level tegangan 5 Volt yang dibangkitkan oleh mikrokontroler DSPIC30F4011 menjadi level tegangan yang lebih tinggi dengan sistem *ground* terpisah (level tegangan 15 Volt) dan cukup untuk memicu MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) sebagai *driver* [17].



Gambar 2. 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 [17].

2.2. Sensor Arus ACS712-05B

Sensor arus ACS712-05B digunakan sebagai perangkat pengukuran dan pembacaan nilai arus aktual yang melalui beban dalam perancangan penelitian ini. Sensor ini bekerja dengan prinsip *hall effect*. Arus yang mengalir melewati sensor akan dibaca dan dikonversikan menjadi nilai tegangan yang proporsional, kemudian sinyal berupa tegangan tersebut akan dibaca oleh modul ADC pada mikrokontroler DSPIC30F4011.

Tegangan keluaran sensor akan bernilai sekitar 2,5 V saat tidak ada arus yang mengalir melewati sensor. Berdasarkan *datasheet*, sensitivitas sensor arus ACS712-05B ini adalah sebesar 185 mV/A [12], namun jenis sensor yang digunakan sudah dilengkapi IC *op-amp* atau penguat sinyal TLC2272ACD yang dapat digunakan untuk mengatur nilai *offset* dan *gain* melalui dua potensiometer yang dihubungkan pada IC *op-amp* tersebut. Potensiometer *gain* diatur hingga nilai sensitivitas sensor berubah menjadi 0,5 V/A, sehingga nilai tegangan keluaran maksimal dari sensor saat arus yang terbaca sebesar 5 A sesuai dengan Persamaan 1 berikut:

$$\begin{aligned} V_{out} &= 2,5 + 0,5 \cdot i \\ V_{out} &= 2,5 + 0,5 \cdot 5 \\ V_{out} &= 5 V \end{aligned} \quad (1)$$

Tegangan keluaran sensor diatur menjadi maksimal 5 V untuk memudahkan pembacaan oleh modul *analog-to-digital converter* yang memiliki tegangan referensi sebesar 5 V.



Gambar 3. Sensor Arus ACS712-05B

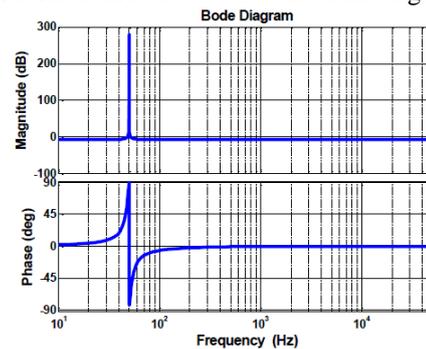
2.3. Inverter Satu Fasa dengan Kontrol Arus Proportional Resonant

Kontrol *Proportional Resonant* adalah salah satu sistem kontrol loop tertutup yang mampu untuk memperbaiki respon sistem. Seperti diketahui *output* frekuensi dari *inverter* yang dikehendaki adalah 50 Hz. Tujuan dari kontroler ini adalah untuk mengontrol variabel sinusoidal

yang memiliki frekuensi resonansi di 50 Hz dan di saat yang sama menolak frekuensi yang lain [2]. Berikut adalah transformasi *Laplace* dari kontroler PR secara ideal [1]:

$$G_{PR}(s) = K_p + \frac{2K_r s}{s^2 + \omega_1^2} \quad (2)$$

Di mana K_p adalah *gain* proporsional, ω_1 adalah frekuensi resonan, dan K_r adalah gain resonan. Kontroler PR memberikan *gain* tak terhingga pada frekuensi tertentu (frekuensi resonan) dan nol pergeseran fasa. Namun, kontroler ini tidak mampu merealisasikan rangkain sirkuit fisik tanpa rugi, dan bentuk kontroler yang diperbaiki adalah alternatif praktisnya [1]. Gambar 4. mengilustrasikan kontroler PR ideal dalam diagram *Bode*.



Gambar 4. Diagram *Bode* kontroler PR ideal

Untuk dapat merealisasikan dalam rangkaian sirkuit fisik, persamaan kontroler PR ideal perlu diperbaiki. Dengan begitu, didapat persamaan kontroler PR dalam bentuk transformasi *Laplace* yang dapat digunakan dalam rangkaian sirkuit fisik yang ditunjukkan pada persamaan (3) [1].

$$G_{PR}(s) = K_p + \frac{2K_r \omega_{PRC} s}{s^2 + 2\omega_{PRC} s + \omega_1^2} \quad (3)$$

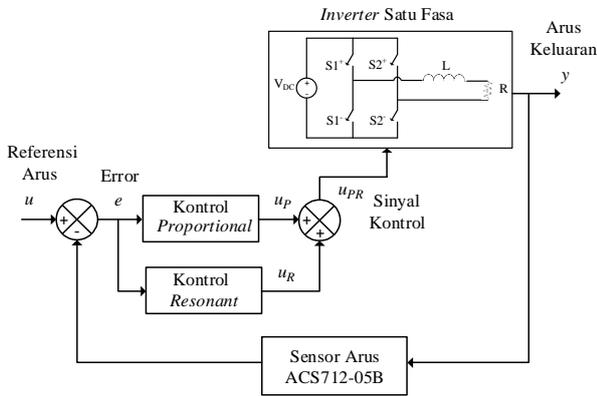
Tiga parameter yang dibutuhkan untuk kontroler PR adalah sebagai berikut [15]:

- ω_{PRC} untuk menyesuaikan *bandwidth* di sekitar frekuensi resonan.
- K_p untuk mendapatkan respon *transient* yang cepat dan kestabilan yang bagus.
- K_r untuk menghilangkan *steady-state error* fasa dan magnitude.
- ω_1 adalah frekuensi resonan.

2.4. Kontroler Arus *Proportional Resonant*

Sinyal kontrol *Proportional Resonant* digunakan untuk mengumpan balikkan nilai keluaran arus dari *inverter* dengan mengontrol variabel sinusoidal yang memiliki frekuensi resonansi di 50 Hz. Nilai *error* $e(t)$ diperoleh dari hasil pengurangan nilai arus aktual yang diukur oleh sensor arus (i_{act}) dan nilai referensi arus yang diberikan

lewat potensiometer (i_{ref}). Setelah nilai $e(t)$ didapatkan, kontroler akan menghitung nilai $error$ dengan nilai penguatan untuk menghasilkan sinyal kontrol. Gambar 5. menunjukkan diagram blok dari kontroler *Proportional Resonant* secara umum.



Gambar 5. Diagram Blok Kontroler *Proportional Resonant*

Berikut adalah persamaan kontroler *Proportional Resonant* dalam bentuk transformasi Laplace [1]:

$$G_{PR}(s) = K_p + \frac{2K_r \omega_{PRC} s}{s^2 + 2\omega_{PRC} s + \omega_1^2} \quad (4)$$

Fungsi alih dalam domain s harus didiskritisasi menjadi domain k agar dapat diolah dalam mikrokontroler. Dengan metode pendekatan *Backward Difference* yang ditunjukkan dalam persamaan (5) [20]:

$$s = \frac{1 - z^{-1}}{T} \quad (5)$$

Berikut ini adalah nilai parameter kontroler *proportional* yang dilakukan dengan metode empiris:

- $K_p = 0,9$

Didapat persamaan kontroler *proportional* sebagai berikut:

$$u_p(k) = K_p \cdot e(k) \quad (6)$$

$$u_p(k) = 0,9 \cdot e(k)$$

Persamaan yang didiskritisasi adalah *gain resonant* karena memiliki sistem orde dua dalam fungsi alih domain s.

$$\frac{u_R(s)}{e(s)} = \frac{2Kr\omega_{PRS}}{s^2 + 2\omega_{PRS} + \omega^2} \quad (7)$$

$$u_R(z) = \left(\frac{1}{1 + 2\omega_{PR}T + \omega^2 T^2} \right) (-u(z) \cdot z^{-2} + u(z) \cdot z^{-1} (2 + 2\omega_{PR}T) - e(z) \cdot z^{-1} (2Kr\omega_{PR}T) + e(z) (2Kr\omega_{PR}T)) \quad (8)$$

$$u_R(k) = \left(-\frac{u(k-2)}{1 + 2\omega_{PR}T + \omega^2 T^2} + \frac{(2 + 2\omega_{PR}T) \cdot u(k-1)}{1 + 2\omega_{PR}T + \omega^2 T^2} - \frac{2Kr\omega_{PR}T \cdot e(k-1)}{1 + 2\omega_{PR}T + \omega^2 T^2} + \frac{2Kr\omega_{PR}T \cdot e(k)}{1 + 2\omega_{PR}T + \omega^2 T^2} \right) \quad (9)$$

Berikut ini adalah nilai parameter kontroler *resonant* yang dilakukan dengan metode empiris:

- $K_r = 7135,69$
- $\omega_{PRC} = 0,07$
- $\omega_1 = 314$
- $T = 0,0001$

Berdasarkan persamaan (9) didapat persamaan kontroler *resonant* sebagai berikut:

$$u_R(k) = -0,999 \cdot u(k-2) + 1,998 \cdot u(k-1) - 0,09998 \cdot e(k-1) + 0,09998 \cdot e(k)$$

Setelah itu didapatkan persamaan akhir dari kontroler *Proportional Resonant* sebagai berikut:

$$u_{PR}(k) = u_p(k) + u_R(k) \quad (10)$$

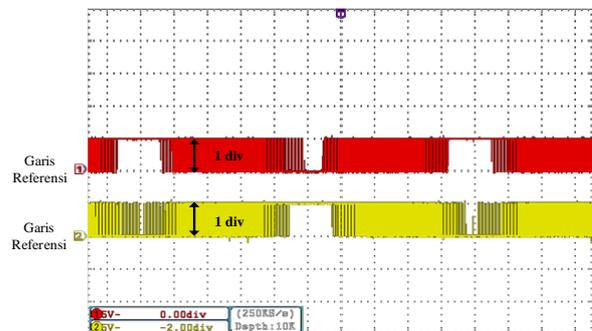
$$u_{PR}(k) = 0,9 \cdot e(k) - 0,999 \cdot u(k-2) + 1,998 \cdot u(k-1) - 0,09998 \cdot e(k-1) + 0,09998 \cdot e(k)$$

3. Hasil dan Analisa

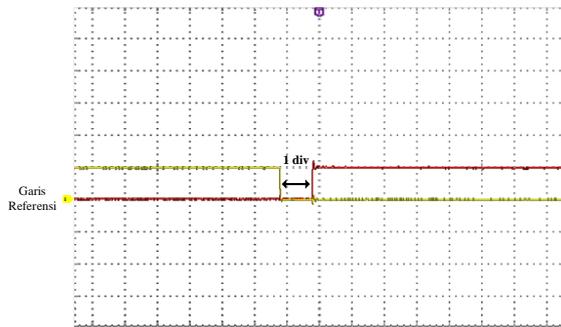
3.1. Pengujian Gelombang Keluaran Rangkaian Kontrol

3.1.1. Pengujian Gelombang Keluaran DSPIC30F4011

Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa modul PWM pada DSPIC30F4011 dapat membangkitkan sinyal kontrol dalam mode komplementer dengan adanya *dead time* sebesar 1 uS antara pin PWMxL dan PWMxL. Pengujian dilakukan dengan program PWM *open loop* dengan frekuensi PWM 20 kHz.



Gambar 6. Gelombang Keluaran PWM *Open Loop*

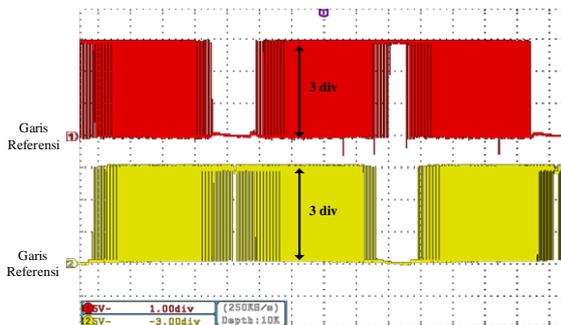


Gambar 7. Dead Time pada Keluaran PWM Open Loop

Hasil pengujian keluaran DSPIC30F4011 pada SPWM *open loop* menunjukkan bahwa sinyal kontrol bekerja dalam mode komplementer serta adanya *dead time* sebesar 1 uS antara PWM sisi *high* dan PWM sisi *low*.

3.1.2. Pengujian Gelombang Keluaran MOSFET Driver TLP250

Pengujian pada rangkaian ini dilakukan untuk mengetahui dan memastikan gelombang tegangan keluaran dari MOSFET *driver* TLP250 telah sesuai dengan perancangan dan dapat digunakan untuk pemicuan MOSFET.



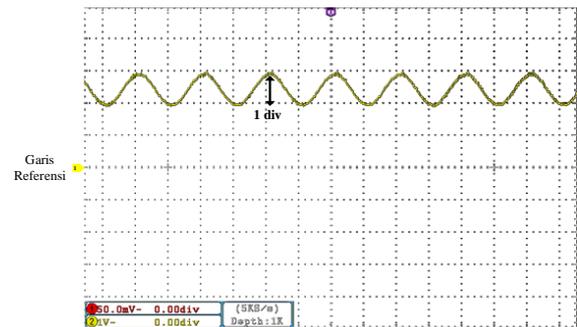
Gambar 8. Gelombang Keluaran Driver MOSFET TLP250

Hasil pengujian gelombang keluaran dari MOSFET *driver* TLP250 telah sesuai dengan perancangan dan dapat digunakan untuk memicu MOSFET.

3.2. Pengujian Sensor Arus ACS712-05B

Pengujian sensor arus ACS712-05B dilakukan dengan mengukur tegangan keluaran sensor yang telah dikalibrasi sebelumnya saat dialiri arus sebesar 1 A. Arus diberikan dengan cara memasang beban resistif secara seri dengan sumber tegangan AC yang diatur sedemikian rupa hingga nilai arus yang mengalir adalah 1 A.

Nilai arus yang diukur oleh sensor direpresentasikan secara proporsional oleh tegangan keluaran sensor. Sebelumnya pada perancangan sensor arus telah diatur nilai offset tegangan keluaran sensor adalah 2,5 V dan sensitivitas pembacaan arus oleh sensor adalah 0,5 V/A.



Gambar 9. Gelombang Keluaran Sensor Arus ACS712-05B (I = 1 A)

Nilai tegangan puncak ke puncak pada pengujian sensor dalam Gambar 11 memiliki jumlah div 5 dengan skala V/div = 1 V dengan faktor pengali *probe* 1x. Hal ini sudah sesuai dengan perancangan dimana saat arus = 1 A maka diperoleh tegangan keluaran sensor sebagai berikut.

$$V_{out} = 2,5 + 0,5 \cdot i$$

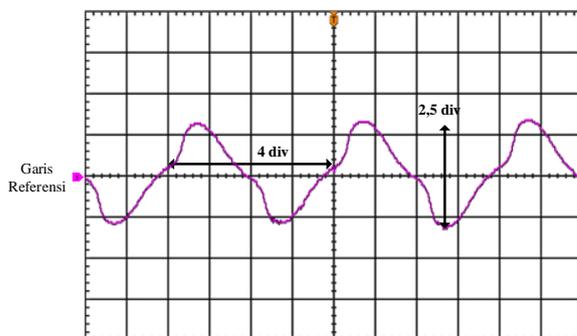
$$V_{out} = 2,5 + 0,5 \cdot 1$$

$$V_{out} = 3 \text{ V}$$

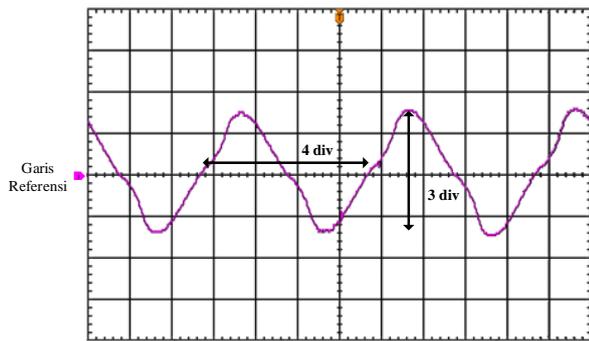
3.3. Pengujian Keluaran Inverter Satu Fasa dengan SPWM Open Loop

3.3.1. Pengujian Tegangan Keluaran Inverter

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui bentuk Pengujian bertujuan untuk mengamati bentuk gelombang dan *magnitude* tegangan keluaran *inverter* satu fasa yang dipicu oleh SPWM *open loop*. Referensi arus yang diberikan adalah sebesar 2 A. Arus keluaran *inverter* tidak diumpun-balikkan pada sistem. Hasil pengujian tegangan keluaran *inverter* dengan SPWM *open loop* pada beban 4 Ω dan 9 Ω.



Gambar 10. Tegangan Keluaran Inverter Open Loop dengan Beban 4 Ω pada Referensi 2 A.

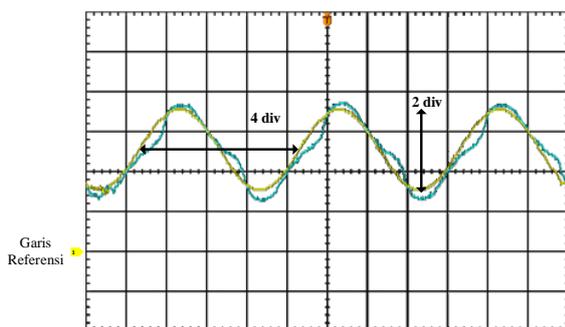


Gambar 11. Tegangan Keluaran Inverter Open Loop dengan Beban 9Ω pada Referensi 2 A.

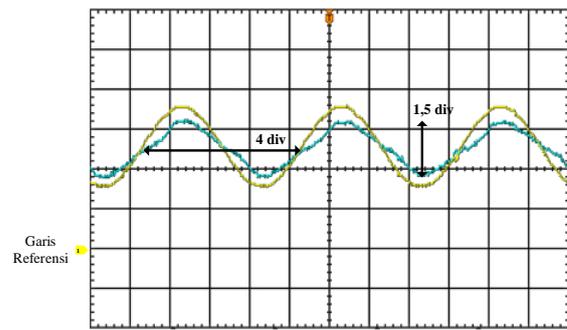
Hasil pengujian tegangan keluaran *inverter open loop* pada referensi arus 2 A menunjukkan bahwa nilai tegangan keluaran akan berubah saat *inverter* mengalami perubahan beban. Nilai tegangan rms yang terukur pada multimeter adalah 8,43 V untuk beban 4Ω dan 9,9 V untuk beban 9Ω . Tegangan *output* yang kecil terjadi karena penyesuaian arus yang melewati beban resistif, drop tegangan, dan pembagi tegangan dari induktor.

3.3.2. Pengujian Arus Keluaran Inverter

Pengujian bertujuan untuk mengamati bentuk gelombang dan magnitude arus keluaran inverter satu fasa yang dipicu oleh SPWM open loop. Arus keluaran diamati melalui tegangan keluaran DAC. Tegangan DAC tersebut merepresentasikan referensi arus dan arus aktual secara proporsional. Referensi arus yang diberikan adalah sebesar 2 A. Arus keluaran inverter tidak diumpan-balikkan pada sistem. Hasil pengujian arus keluaran inverter dengan SPWM open loop pada beban 4Ω dan 9Ω .



Gambar 12. Arus Keluaran Inverter Open Loop dengan Beban 4Ω pada Referensi 2 A.



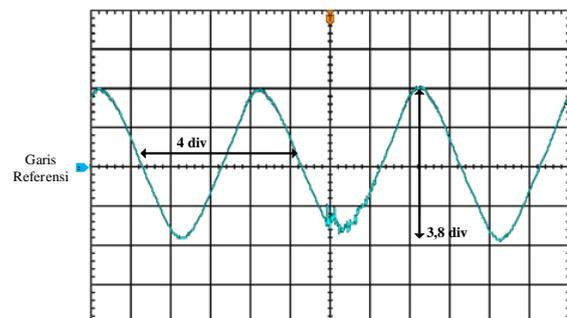
Gambar 13. Arus Keluaran Inverter Open Loop dengan Beban 9Ω pada Referensi 2 A.

Gambar 12 dan Gambar 13 menunjukkan hubungan arus keluaran *inverter* (biru) dan referensi arus yang dibangkitkan (kuning). Hasil pengujian arus keluaran *inverter open loop* pada referensi arus 2 A menunjukkan bahwa nilai arus keluaran akan berubah saat *inverter* mengalami perubahan beban. *Ripple* arus yang terjadi karena nilai filter induktor yang kurang sesuai. Hal ini cukup mendekati teori dimana nilai arus berbanding terbalik dengan nilai resistansi pada beban. Namun, dapat dilihat pada Gambar 12 dan Gambar 13 bahwa gelombang arus keluaran *inverter* dengan SPWM *open loop* tidak dapat mengikuti gelombang referensi arus yang diberikan.

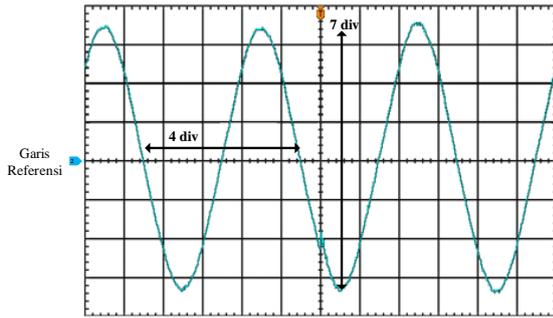
3.4. Pengujian Keluaran Inverter Satu Fasa dengan Kontrol Arus Proportional

3.4.1. Pengujian Tegangan Keluaran Inverter

Pengujian bertujuan untuk mengamati bentuk gelombang dan *magnitude* tegangan keluaran *inverter* satu fasa yang dipicu oleh sinyal kontrol *Proportional*. Referensi arus yang diberikan adalah sebesar 1,5 A. Arus keluaran *inverter* diumpan-balikkan pada mikrokontroler DSPIC30F4011. Hasil pengujian tegangan keluaran *inverter* dengan kontroler arus *Proportional* pada beban 4Ω dan 9Ω .



Gambar 14. Tegangan Keluaran Inverter *Proportional* dengan Beban 4Ω pada Referensi 1,5 A

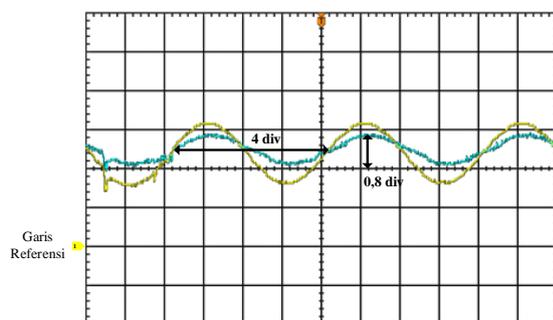


Gambar 15. Tegangan Keluaran Inverter *Proportional* dengan Beban 9Ω pada Referensi 1,5 A

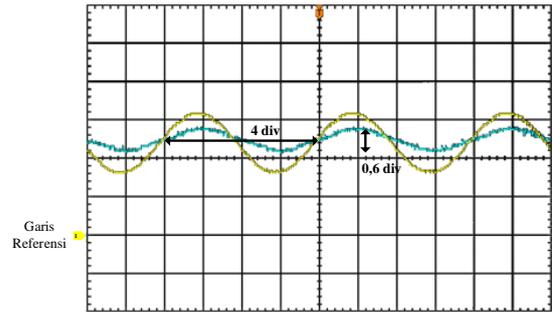
Hasil pengujian tegangan keluaran *inverter* dengan kontroler *Proportional* pada referensi arus 1,5 A menunjukkan bahwa nilai tegangan keluaran akan berubah saat *inverter* mengalami perubahan beban. Nilai tegangan rms yang terukur pada multimeter adalah 2,81 V untuk beban 4Ω dan 4,83 V untuk beban 9Ω . Tegangan *output* yang kecil terjadi karena penyesuaian arus yang melewati beban resistif, drop tegangan, dan pembagi tegangan dari induktor. Sehingga nilai arus yang mengalir pada beban akan tetap mengikuti referensi meskipun beban diubah.

3.4.2. Pengujian Arus Keluaran Inverter

Pengujian bertujuan untuk mengamati bentuk gelombang dan *magnitude* arus keluaran *inverter* satu fasa yang dipicu oleh sinyal kontrol *Proportional*. Arus keluaran diamati melalui tegangan keluaran DAC. Tegangan DAC tersebut merepresentasikan referensi arus dan arus aktual secara proporsional. Referensi arus yang diberikan adalah sebesar 1,5 A. Arus keluaran *inverter* diumpun-balikkan pada mikrokontroler DSPIC30F4011. Hasil pengujian arus keluaran *inverter* kontroler arus *Proportional* pada beban 4Ω dan 9Ω .



Gambar 16. Arus Keluaran Inverter *Proportional* dengan Beban 4Ω pada Referensi 1,5 A



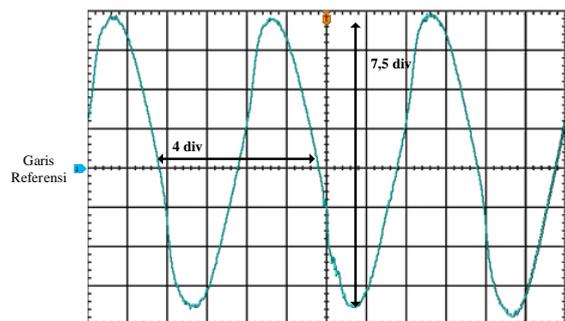
Gambar 17. Arus Keluaran Inverter *Proportional* dengan Beban 9Ω pada Referensi 1,5 A

Gambar 16 dan Gambar 17 menunjukkan hubungan arus keluaran *inverter* (biru) dan referensi arus yang dibangkitkan (kuning). Hasil pengujian arus keluaran *inverter* dengan kontrol *Proportional* pada referensi arus 1,5 A menunjukkan bahwa arus keluaran tidak dapat mengikuti referensi yang diberikan dikarenakan nilai *gain* pada kontroler tidak cukup untuk mencapai referensi. Akan tetapi, arus keluaran *inverter* tetap dapat mengikuti referensi saat *inverter* mengalami perubahan beban. *Ripple* arus yang terjadi karena nilai filter induktor yang kurang sesuai. Hal ini dikarenakan *Ripple* arus yang terbentuk pada arus keluaran pada beban 4Ω dan 9Ω turut terbaca oleh alat ukur arus, sehingga nilai yang ditampilkan memiliki selisih yang signifikan terhadap nilai sebenarnya.

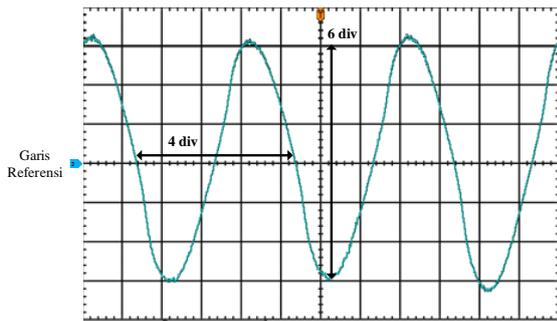
3.5. Pengujian Keluaran Inverter Satu Fasa dengan Kontrol Arus *Proportional Resonant*

3.5.1. Pengujian Tegangan Keluaran Inverter

Pengujian bertujuan untuk mengamati bentuk gelombang dan *magnitude* tegangan keluaran *inverter* satu fasa yang dipicu oleh sinyal kontrol *Proportional Resonant*. Referensi arus yang diberikan adalah sebesar 1,5 A. Arus keluaran *inverter* diumpun-balikkan pada mikrokontroler DSPIC30F4011. Hasil pengujian tegangan keluaran *inverter* dengan kontroler arus *Proportional Resonant* pada beban 4Ω dan 9Ω .



Gambar 18. Tegangan Keluaran Inverter *Proportional Resonant* dengan Beban 4Ω pada Referensi 1,5 A



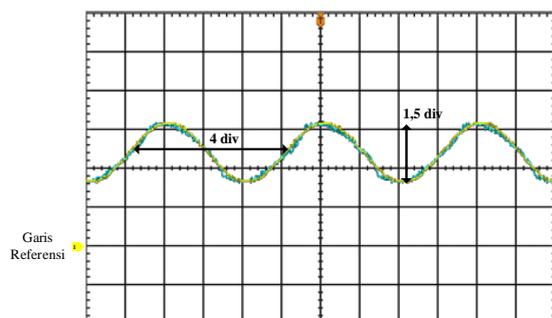
Gambar 19. Tegangan Keluaran Inverter *Proportional Resonant* dengan Beban 9Ω pada Referensi 1,5 A

Hasil pengujian tegangan keluaran *inverter* dengan kontroler *Proportional Resonant* pada referensi arus 1,5 A menunjukkan bahwa nilai tegangan keluaran akan berubah saat *inverter* mengalami perubahan beban. Nilai tegangan rms yang terukur pada multimeter adalah 5,62 V untuk beban 4Ω dan 11,52 V untuk beban 9Ω . Tegangan *output* yang kecil terjadi karena penyesuaian arus yang melewati beban resistif, drop tegangan, dan pembagi tegangan dari induktor. Sehingga nilai arus yang mengalir pada beban akan tetap mengikuti referensi meskipun beban diubah-ubah.

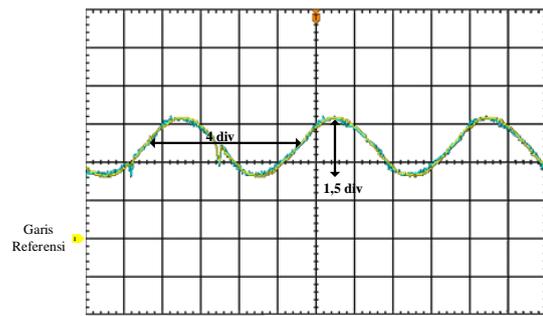
3.5.2. Pengujian Arus Keluaran Inverter

Pengujian bertujuan untuk mengamati bentuk gelombang dan *magnitude* arus keluaran *inverter* satu fasa yang dipicu oleh sinyal kontrol *Proportional Resonant*. Arus keluaran diamati melalui tegangan keluaran DAC. Tegangan DAC tersebut merepresentasikan referensi arus dan arus aktual secara proporsional.

Referensi arus yang diberikan adalah sebesar 1,5 A. Arus keluaran *inverter* diumpun-balikkan pada mikrokontroler DSPIC30F4011. Hasil pengujian arus keluaran *inverter* kontroler arus *Proportional Resonant* pada beban 4Ω dan 9Ω .



Gambar 20. Arus Keluaran Inverter *Proportional Resonant* dengan Beban 4Ω pada Referensi 1,5 A



Gambar 21. Arus Keluaran Inverter *Proportional Resonant* dengan Beban 9Ω pada Referensi 1,5 A

Gambar 20 dan Gambar 21 menunjukkan hubungan arus keluaran *inverter* (biru) dan referensi arus yang dibangkitkan (kuning). Hasil pengujian arus keluaran *inverter* dengan kontrol *Proportional Resonant* pada referensi arus 1,5 A menunjukkan bahwa arus keluaran sudah dapat mengikuti referensi yang diberikan. Arus keluaran *inverter* tetap dapat mengikuti referensi saat *inverter* mengalami perubahan beban. *Ripple* arus yang terjadi karena nilai filter induktor yang kurang sesuai. Hal ini dikarenakan *Ripple* arus yang terbentuk pada arus keluaran pada beban 4Ω dan 9Ω turut terbaca oleh alat ukur arus, sehingga nilai yang ditampilkan memiliki selisih yang signifikan terhadap nilai sebenarnya.

4. Kesimpulan

Inverter satu fasa SPWM telah berhasil direalisasikan dan dapat menghasilkan tegangan keluaran AC satu fasa terkontrol, dengan arus referensi yang dapat diatur. DsPIC30f4011 dapat digunakan dengan baik untuk menghasilkan gelombang pemicuan SPWM *unipolar* pada *inverter* satu fasa SPWM. *Ripple* arus yang terjadi karena nilai filter induktor yang kurang sesuai. Tegangan *output* pada beban resistif yang kecil terjadi karena arus yang melewati beban resistif kecil, *drop* tegangan pada keluaran *inverter* dan pembagi tegangan dari inductor karena dirangkai seri. Hasil pengujian dalam Penelitian ini menunjukkan bahwa kontrol *proportional resonant* adalah kontroler yang paling baik untuk digunakan sebagai pengendalian arus AC dibandingkan dengan kontrol *openloop* dan *proportional*.

Referensi

- [1]. Zhang. Ningyun, "A Systematic Method for Designing a PR Controller and Active Damping of the LCL Filter for Single-Phase Grid-Connected PV Inverters", *Energies*, vol.7, pp. 3934-3954, 2014.
- [2]. Aizam. Shamsul, "Comparison Study in Various Controller Single-Phase Inverters", IEEE SCORED, 2010.

- [3]. S. Yuvarajan and H. L. Chiou, "A Novel Sine PWM Scheme Using Waveform Generators," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 41, no. 3, pp. 372–376, 1994.
- [4]. S. W. Smith, *Digital signal processing*, 2nd ed. San Diego, California: California Technical Publishing, 1999.
- [5]. M. T. Inc., *DSPIC30F4011/12 Data Sheet 16-Bit Digital Signal Controllers*. 2010.
- [6]. T. L. Skvarenina, *The power electronics handbook*. New York: CRC Press LLC, 2002.
- [7]. Daniel W Hart, *Power Electronics*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2011.
- [8]. M. H. Rashid, *POWER ELECTRONICS Academic Press Series in Engineering*, 2001.
- [9]. D. A. K. S. Anjana Thakur, "An Overview of Different PWM Techniques to Reduce Total Harmonic Distortion of Output in," *Int. J. Recent Res. Electr. Electron. Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 65–69, 2016.
- [10]. M. Technology Inc., "dsPIC30F Family Reference Manual," pp. 15–44, 2006.
- [11]. Sardiyanto, "Pembuatan Modul Inverter 3 Fasa Sinusoidal Pulse Width Modulation Sebagai Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Terhubung Segitiga 220 Volt," *Transient*, 2003.
- [12]. Allegro, "Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor", no. 16, pp. 1-16, 2017.
- [13]. O. T. Way, "2.7 V to 5.5 V, Parallel Input Dual Voltage Output 8-Bit DAC," pp. 1–8, 1997.
- [14]. I. Electronics, "DAC-08 Digital to Analog Converter," pp. 7–8, 2005.
- [15]. Ye. Tao, Dai. Ning-Yi, Lam. Chi-Seng, Wong. Man-Chung, Guerrero. Josep M., "Analysis, Design and Implementation of a Quasi-Proportional-Resonant Controller for a Multifunctional Capacitive-Coupling Grid-Connected Inverter". IEEE Transaction on Industry Applications. 2016.
- [16]. N. Semiconductor, *Datasheet LM78XX Series Voltage Regulators*, no. February. 1995, pp. 1–6.
- [17]. TOSHIBA, "Photocoupler GaAlAs Ired & Photo-IC TLP250," vol. 5, pp. 1–8, 2004.
- [18]. Intersil, "Mur1540, mur1560, rurp1540, rurp1560.," no. 2778, pp. 1–4, 2000.
- [19]. I. Rectifier, "IRFP460" vol. PD-9.512B , pp. 1025–1030.
- [20]. M. Gopal, "Digital Control and State Variable Methods", 2nd ed. Tata McGraw-Hill, 2003