

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

Muhammad Ivan Pradana *), Munawar Agus Riyadi dan Iwan Setiawan

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

**)E-mail: Ivanprdn2@gmail.com*

Abstrak

Konsumsi jumlah energi global yang semakin cepat membutuhkan sumber energi terbarukan. Oleh karena itu, energi terbarukan yang berkelanjutan dan tak habis-habis didapatkan dari angin, photovoltaic, atau pasang surut air laut yang menarik untuk diteliti. Inverter satu fasa adalah converter yang mengubah input DC menjadi output AC. Dalam penelitian ini, dirancang inverter satu fasa tipe Full Bridge dengan metode kontrol proportional-integral menggunakan mikrokontroler 16-bit dsPIC30F4011 karena metode kontrol tersebut mampu memperbaiki respon sistem dengan cepat. Arus keluaran inverter diumpun-balikkan oleh sensor arus ACS712-05B. Pengujian dilakukan dengan rentang pembangkitan arus referensi 1 – 2,5 A pada variasi beban 4 Ω dan 9 Ω , dan beberapa nilai parameter k_p dan k_i . Hasil pengujian menunjukkan bahwa kontrol proportional integral adalah kontroler yang paling baik untuk digunakan sebagai pengendalian arus AC. Arus keluaran inverter dengan kontrol open loop belum bisa mengikuti arus referensi. Implementasi kontrol Proportional dapat meningkatkan kemampuan arus aktual dalam mencapai arus referensi walaupun masih belum mampu mengikuti gelombang arus aktual dengan baik dan masih terdapat pergeseran fasa. Kontrol Proportional-Integral dengan pemilihan nilai k_p sebesar 0.99 dan k_i sebesar 0.99 menunjukkan hasil yang terbaik. Tegangan output menyesuaikan arus yang melewati beban resistif.

Kata Kunci : *Inverter, Kontrol Arus, Proportional-Integral, dsPIC30F4011.*

Abstract

The rapid increase in global energy consumption accelerate the need for greener energy sources. Nowadays, renewable, highly sustainable energies derived from inexhaustible sources such as wind, photovoltaic, or tides have attracted more attention. Single-phase inverters are the converter which transform DC input to AC output. In this research, I designed the Full-bridge type of one-phase inverter with PI current control method using 16-bit microcontroller dsPIC30F4011 because the control method is able to improve the system's response quickly. Inverter output current fed by the ACS712-05B current sensor. Test is carried out with a current reference range of 1 - 2.5A on a load variation of 4 Ω and 9 Ω , and some parameter of k_p and k_i . Test results show that PI control is the best controller for controlling AC current. Output current from openloop control unable to follow the reference current. Implementation of PI control able to improve the ability of actual output current to reach current reference eventhough it still has phase shifting and ripple. PI control with the k_p value at 0.99 and k_i value at 0.99 show the best result. The output voltage is adjusting the current that through the resistive load.

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

1. Pendahuluan

Konsumsi jumlah energi global yang semakin cepat membutuhkan sumber energi terbarukan. Oleh karena itu pemanfaatan energi terbarukan yang berkelanjutan dan tak habis-habis didapatkan dari angin, *photovoltaic*, atau pasang surut air laut yang menarik untuk diteliti. *Distributed power generation systems* (DPGS) cukup

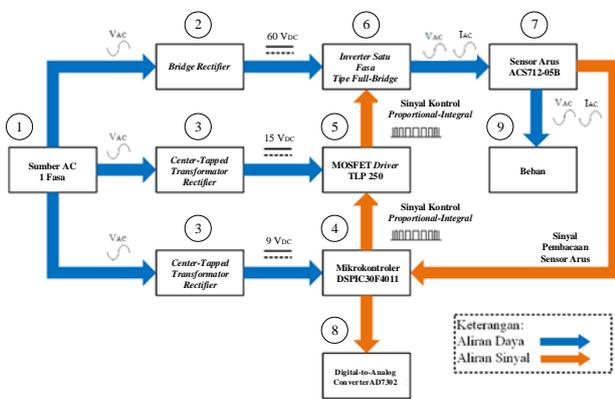
menarik untuk diteliti, dan salah satu yang paling penting dalam DPGS adalah *inverter* yang terhubung dengan *grid* menjadi pusat penelitian [1].

Dalam Penelitian ini, dirancang *inverter* satu fasa dengan teknik pemucuan SPWM berbasis microcontroller 16-bit dsPIC30f4011 dan kontroler arus dengan metode kontrol *Proportional-integral*. Sinyal *carrier* dirancang pada 20 kHz. Diharapkan *inverter* yang telah dibuat memiliki

performa handal dengan efisiensi tinggi dan arus keluaran *inverter* dapat bekerja menyesuaikan referensi.

2. Metode

Gambar 1. merupakan blok diagram perancangan perangkat keras *inverter* satu fasa dengan kontroler arus *Proportional-Integral*. 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

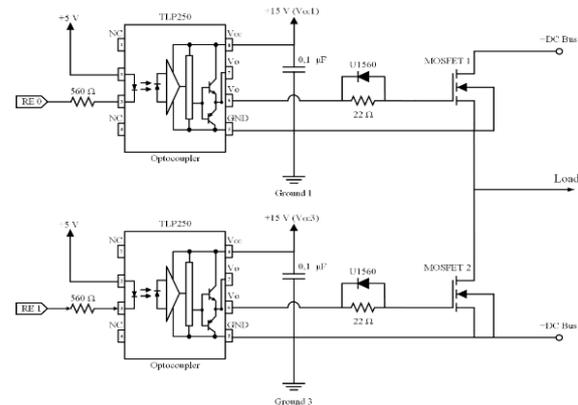
Spesifikasi *inverter* satu fasa tipe *full bridge* berdasarkan Gambar 1. yang dirancang pada penelitian ini dijelaskan sebagai berikut.

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 *brige 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 Integral* 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].

7. Sensor arus ACS712-05B digunakan untuk mengukur arus keluaran *inverter* dan mengirim informasi berupa tegangan kepada mikrokontroler DSPIC30F4011 melalui fasilitas ADC [2] [5].
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-Integral* 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* [6].



Gambar 2. Rangkaian MOSFET Driver TLP250

Gambar 2 menunjukkan 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 [3] [4].

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.

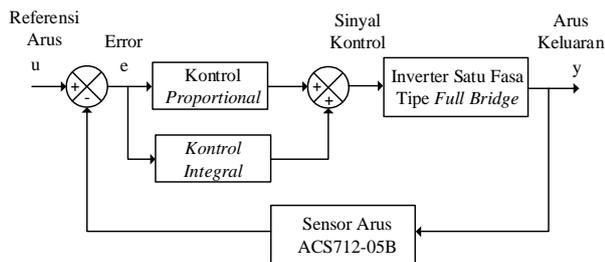
Tegangan keluaran sensor akan bernilai sekitar 2,5 V saat tidak ada arus yang mengalir melewati sensor. Berdasarkan *datasheet*, sensitivitas sensor arus ACS712-05B ini adalah sebesar 185 mV/A [8], namun jenis sensor yang digunakan sudah dilengkapi IC *op-amp* atau penguat sinyal TLC2272ACD yang dapat 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.

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

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

2.3. Kontroler Arus *Proportional-Integral*

Sinyal kontrol *Proportional Integral* digunakan untuk mengumpukan balik nilai keluaran arus dari *inverter* dengan memberikan *gain*. 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}) [9]. Setelah nilai $e(t)$ didapatkan, kontroler akan menghitung nilai *error* dengan nilai penguatan untuk menghasilkan sinyal kontrol. Gambar 3 menunjukkan diagram blok dari kontroler *Proportional Integral* secara umum.



Gambar 3. Diagram Blok Kontroler *Proportional- Integral*

Berikut adalah persamaan kontroler *proportional-integral* dalam bentuk transformasi *Laplace*:

$$G_{PI}(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} \right] e(s) \quad (4)$$

parameter yang dibutuhkan untuk kontroler PI adalah sebagai berikut:

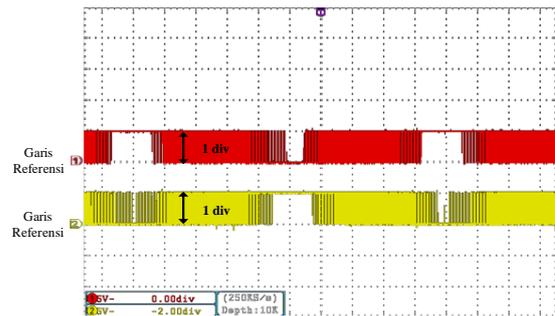
- K_p untuk mendapatkan respon *transient* yang cepat dan kestabilan yang bagus.
- K_i untuk mengurangi *steady-state error*

3. Hasil dan Analisa

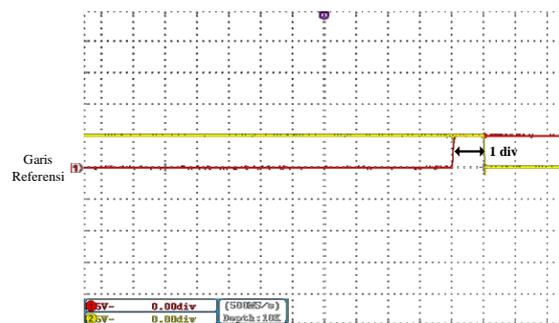
3.1. Pengujian Gelombang Keluaran Rangkaian Kontrol

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 4. Gelombang Keluaran PWM *Open Loop*



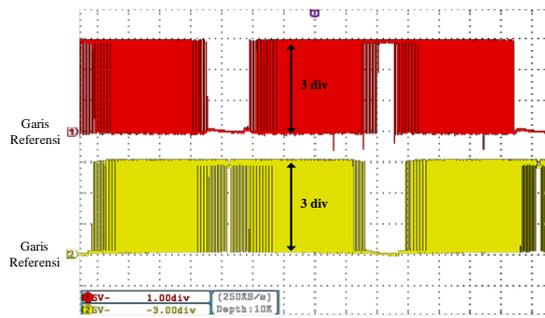
Gambar 5. *Dead Time* pada Keluaran PWM *Open Loop*

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*.

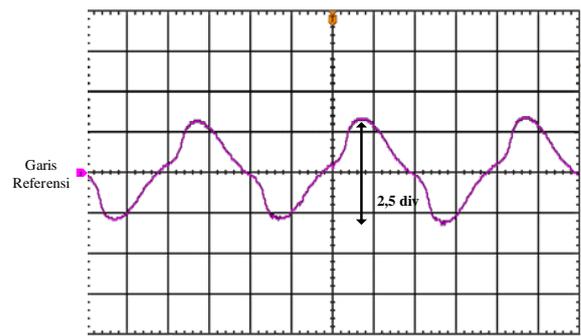
3.1.2. Pengujian Gelombang Keluaran MOSFET Driver TLP250

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

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



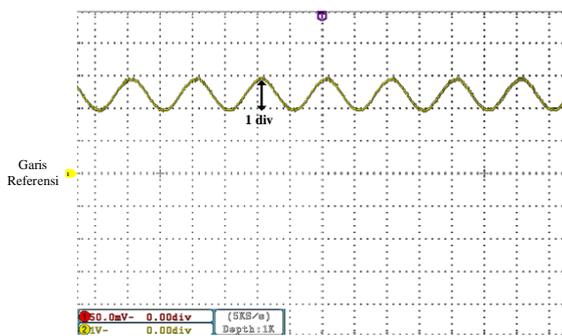
Gambar 6. Gelombang Keluaran Driver MOSFET TLP250



Gambar 8. Tegangan Keluaran Inverter Open Loop dengan Beban 4 Ω pada Referensi 2 A.

3.2. Pengujian Sensor Arus ACS712-05B

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



Gambar 7. Gelombang Keluaran Sensor Arus ACS712-05B

Nilai tegangan puncak ke puncak pada pengujian sensor dalam Gambar 7 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.

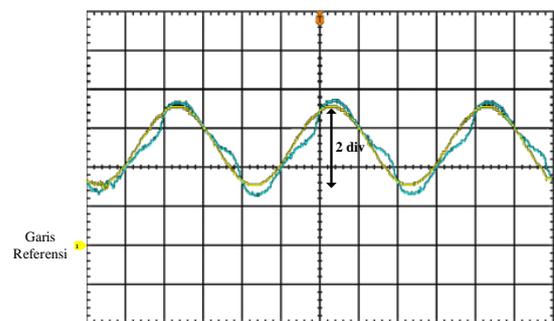
$$V_{out} = 2,5 + 0,5 \cdot i$$

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

$$V_{out} = 3 V$$

3.3. Pengujian Keluaran Inverter Satu Fasa dengan SPWM Open Loop

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 2 A. Arus keluaran *inverter* tidak diumpam-balikkan. Hasil pengujian adalah sebagai berikut.



Gambar 9. Arus Keluaran Inverter Open Loop dengan Beban 4 Ω pada Referensi 2 A.

Hasil pengujian *inverter* satu fasa dengan kontroler *open loop* pada variasi referensi arus dengan rentang 2 – 3 A dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

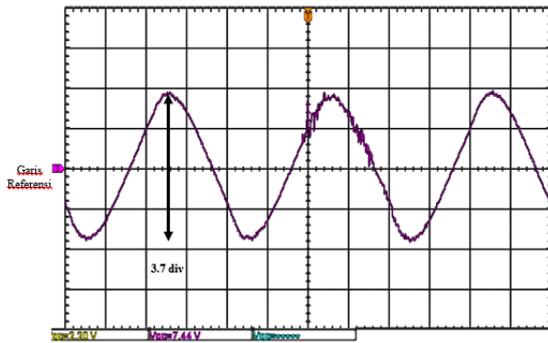
Tabel 1. Data Pengujian Sistem Openloop

Arus Referensi	Variasi Beban	I_{out}/I_{ref} (max) (A)	I_{out}/I_{ref} (max) (A)
2	4 Ω	+0.32	1.15
2	9 Ω	-0.6	0.7
3	4 Ω	+0.76	1.24
3	9 Ω	-0.84	0.73

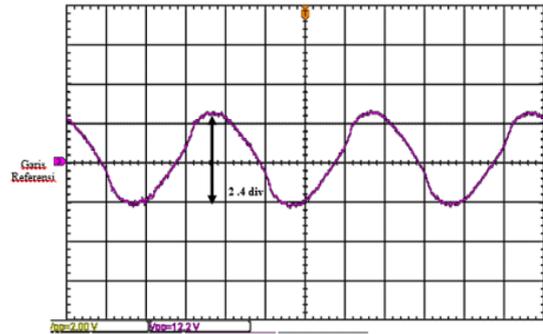
Hasil data pengujian pada table 1 menunjukkan nilai tegangan keluaran akan berubah saat *inverter* mengalami perubahan beban dan belum membentuk gelombang sinus sempurna. Hasil pengujian arus menunjukkan nilai arus aktual belum mampu mengikuti gelombang arus referensi.

3.4. Pengujian Inverter dengan Variasi Nilai Kp pada Kontrol Proportional

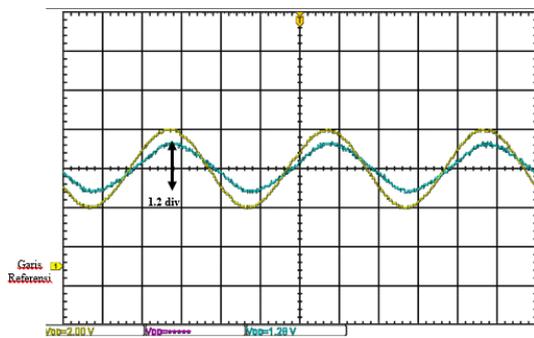
Untuk mengamati bentuk gelombang dan *magnitude* tegangan keluaran *inverter* akibat variasi nilai Kp, referensi arus yang diberikan adalah sebesar 2 A dan beban tetap 4 ohm. Hasil pengujian adalah sebagai berikut :



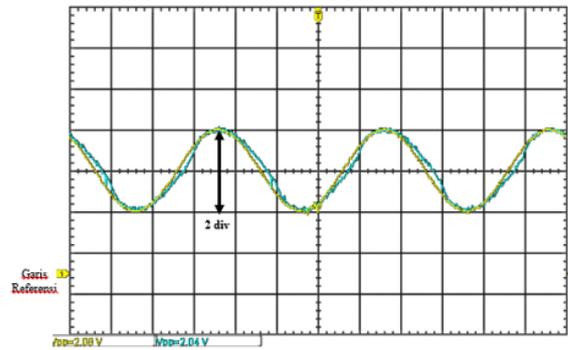
Gambar 10. Tegangan keluaran inverter pada beban 4 ohm dengan kontrol Proportional nilai $k_p = 0.99$



Gambar 12. Tegangan keluaran inverter pada beban 4 ohm dengan kontrol Proportional-Integral nilai $k_i = 0.1$



Gambar 11. Perbandingan arus referensi 2 A dengan arus aktual pada beban 4 ohm dengan kontrol Proportional nilai $k_p = 0.99$ ($t/div=5ms$)



Gambar 13. Perbandingan arus referensi 2 A dengan arus aktual pada beban 4 ohm dengan kontrol Proportional-Integral nilai $k_i = 0.1$ ($t/div=5ms$)

Hasil pengujian *inverter* satu fasa dengan kontroler *Proportional* pada variasi nilai K_p dengan rentang 0.5 – 1.5 dapat dilihat pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Hasil Pengujian Variasi nilai K_p pada Sistem Inverter Kontrol Proportional

Arus Referensi	Variasi k_p	I_{out}/I_{ref} (max) (A)	I_{out}/I_{ref} (max) (A)	Geser fasa
2	0,5	-1.2	0.4	5%
	0.75	-0.92	0.54	5%
	0.99	-0.72	0.64	2.5%
	1.5	-1	0.64	2.5%

Hasil pengujian ditunjukkan oleh tabel 2, semakin tinggi nilai K_p maka kemampuan arus aktual mengikuti gelombang arus referensi semakin membaik. kemampuan tegangan menyesuaikan arus dan beban juga semakin tinggi. Namun sistem kontrol *Proportional* saja belum cukup untuk menciptakan kontrol arus yang baik.

3.5. Pengujian *Inverter* dengan Variasi nilai K_i pada Kontrol *Proportional Integral*

Untuk mengamati bentuk gelombang dan *magnitude* tegangan keluaran *inverter* akibat variasi nilai K_i , referensi arus yang diberikan adalah sebesar 2 A dan beban tetap 4 ohm serta $k_p=0.99$. Hasil pengujian adalah sebagai berikut:

Hasil pengujian *inverter* satu fasa dengan kontroler *Proportional* pada variasi nilai K_i dengan rentang 0.25 – 0.99 dapat dilihat pada Tabel 3 berikut.

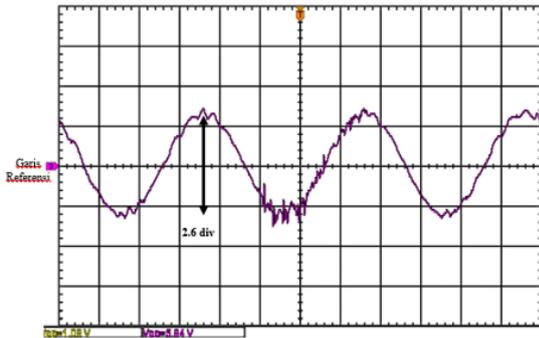
Tabel 3. Hasil Pengujian Variasi nilai K_i pada Sistem Inverter Kontrol Proportional-Integral

Arus Referensi	Variasi k_p	I_{out}/I_{ref} (max) (A)	I_{out}/I_{ref} (max) (A)	Geser fasa
2	0,01	-0.56	0.72	5%
	0.1	0.04	1.02	0%
	0.25	0.08	1.04	0%
	0.5	0.12	1.06	0%
	0.75	0.04	1.02	0%
	0.99	0.12	1.06	0%

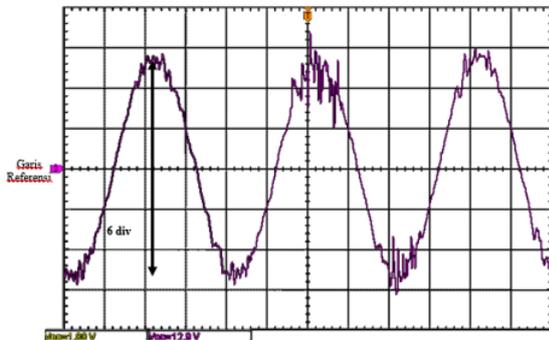
Hasil pengujian variasi nilai K_i pada sistem inverter satu fasa kontrol *Proportional-Integral* pada tabel 3 menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai K_i maka kemampuan arus aktual dalam mengikuti gelombang arus referensi juga semakin baik, namun semakin terlihat gangguan pada gelombang sinus tegangan output inverter yang menyebabkan osilasi. Tidak tampak terdapat pergeseran fasa apabila nilai parameter K_i melebihi nilai 0.1.

3.6. Pengujian Inverter dengan Variasi nilai Arus Referensi dan Beban pada Kontrol *Proportional-Integral*

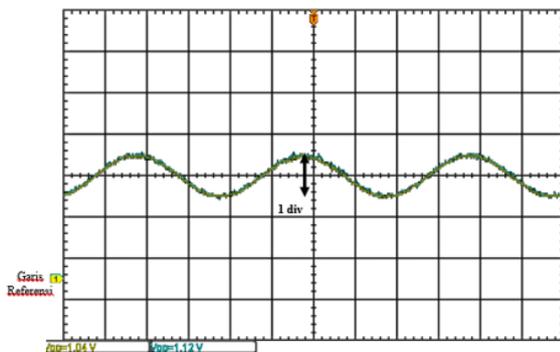
Pengujian bertujuan untuk mengamati bentuk gelombang dan *magnitude* tegangan dan arus keluaran *inverter* akibat variasi nilai arus referensi dan juga nilai beban pada output inverter. Dalam pengujian ini digunakan nilai K_p sebesar 0.99 dan K_i sebesar 0.99. Hasil pengujian adalah sebagai berikut



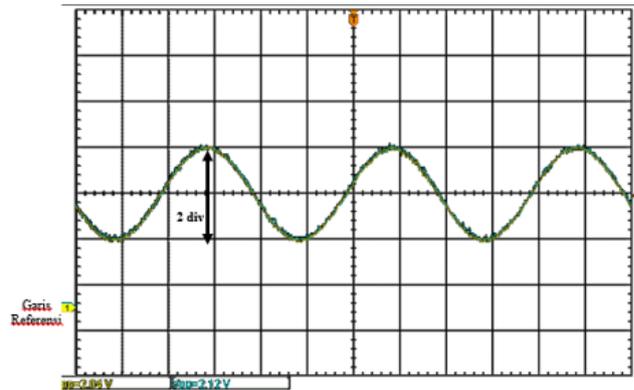
Gambar 14. Tegangan keluaran inverter pada beban 4 ohm dengan kontrol *Proportional-Integral* ($K_p=K_i=0.99$) pada arus referensi 1 A



Gambar 15. Tegangan keluaran inverter pada beban 4 ohm dengan kontrol *Proportional-Integral* ($K_p=K_i=0.99$) pada arus referensi 2 A



Gambar 16. Perbandingan arus referensi 1 A dengan arus aktual pada beban 4 ohm dengan kontrol *Proportional-Integral* ($K_p=K_i=0.99$)



Gambar 17. Perbandingan arus referensi 2 A dengan arus aktual pada beban 4 ohm dengan kontrol *Proportional-Integral* ($K_p=K_i=0.99$)

Hasil pengujian *inverter* satu fasa dengan sistem kontrol umpan balik *Proportional-Integral* pada variasi nilai arus referensi dengan rentang 1-2.5 dan dengan beban 4 Ω serta 9 Ω dapat dilihat pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4. Hasil Pengujian Variasi Arus referensi dan beban pada Sistem Inverter Kontrol *Proportional-Integral* ($K_p=K_i=0.99$)

Arus Referensi	Variasi k_p	I_{out}/I_{ref} (max) (A)	I_{out}/I_{ref} (max) (A)	Geser fasa
1	4 Ω	0.12	1.12	0%
	9 Ω	0.04	1.04	0%
1.5	4 Ω	0.12	1.07	0%
	9 Ω	0.02	1.01	0%
2	4 Ω	0.12	1.06	0%
	9 Ω	0.00	1	0%
2.5	4 Ω	0.02	1.01	0%
	9 Ω	0.08	1.032	0%

Hasil pengujian pada tabel 4 menunjukkan walau terjadi perubahan nilai beban pada keluaran inverter dan juga perubahan nilai arus referensi yang dibangkitkan, arus aktual dari inverter *Proportional-Integral* ($K_p=K_i=0.99$) sudah dapat bekerja dengan baik. Hal ini ditunjukkan dengan gelombang arus aktual sudah dapat mengikuti arus referensi dengan cukup baik tanpa pergeseran fasa atau selisih yang signifikan. Besar nilai tegangan *output* inverter menyesuaikan mengikuti arus aktual yang melewati beban resistif. Terdapat osilasi pada gelombang tegangan dikarenakan nilai K_i yang tinggi.

3.7. Analisa Pengujian

Disaat dilakukan pengujian variasi beban resistif dan variasi arus referensi yang dibangkitkan, dapat dilihat bahwa semakin tinggi nilai K_p dan K_i yang digunakan maka kemampuan bentuk gelombang arus aktual dalam mengikuti bentuk gelombang arus referensi akan semakin baik dan dapat mengikuti perubahan nilai referensi yang dibangkitkan. Nilai K_p lebih dari 1 tidak digunakan karena pada sistem yang berubah secara dinamis, nilai k_p lebih dari

satu tidak berjalan dengan ideal dan berpotensi memberi gangguan *overshoot*. Perubahan variasi pada beban menunjukkan bahwa arus aktual yang dihasilkan oleh inverter akan bersifat tetap menyesuaikan diri dengan nilai arus referensi yang diinginkan. Nilai tegangan pada output inverter akan berubah menyesuaikan kepada nilai beban dan nilai arus referensi. Dalam pengujian menggunakan osiloskop dapat diamati perbedaan nilai puncak gelombang arus aktual dan arus referensi, namun variasi dengan nilai selisih $I_{ref} - I_{out}(\max)$ terkecil tidak dianggap sebagai variasi dengan hasil terbaik karena fokus dalam perancangan kontrol arus menitik beratkan kemampuan gelombang arus aktual untuk mengikuti gelombang arus referensi tanpa terjadi pergeseran fasa dan bentuk gelombang yang halus tanpa *ripple*.

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. Pada sistem kontrol *open loop*, arus aktual belum bisa mengikuti gelombang arus referensi dan belum membentuk sinus dan terjadi pergeseran fasa. Pada pengujian variasi nilai K_p pada sistem kontrol *Proportional*, arus aktual juga belum bisa mengikuti gelombang arus referensi dan masih terjadi pergeseran fasa, namun semakin tinggi nilai K_p pada sistem kontrol *Proportional*, kemampuan arus aktual untuk mengikuti arus referensi akan semakin baik. Nilai K_p lebih dari 1 tidak digunakan karena pada sistem yang berubah secara dinamis, nilai k_p lebih dari satu tidak berjalan dengan ideal dan berpotensi memberi gangguan *overshoot*. Pada pengujian variasi nilai K_i pada sistem kontrol *Proportional-Integral*, semakin tinggi nilai K_i maka kemampuan arus aktual dalam mengikuti arus referensi akan meningkat, namun tegangan yang dihasilkan terlihat semakin berosilasi. Tegangan *output* menyesuaikan arus yang melewati beban resistif. Hasil pengujian pada semua jenis sistem kontrol menunjukkan bahwa kontrol *proportional integral* ($K_p=0.99$ dan $K_i=0.99$) adalah kontroler yang paling baik untuk digunakan sebagai pengendalian arus AC karena fokus dalam perancangan kontrol arus menitik beratkan kemampuan gelombang arus aktual untuk mengikuti gelombang arus referensi tanpa terjadi pergeseran fasa dan bentuk gelombang yang halus tanpa *ripple*.

Referensi

- [1]. M. H. Rashid, *POWER ELECTRONICS Academic Press Series in Engineering*. 2001.
- [2]. M. T. Inc., *DSPIC30F4011/12 Data Sheet 16-Bit Digital Signal Controllers*. 2010
- [3]. T. L. Skvarenina, *The power electronics handbook*. New York: CRC Press LLC, 2002.
- [4]. TOSHIBA, "Photocoupler GaAlAs Ired & Photo-IC TLP250," vol. 5, pp. 1–8, 2004.
- [5]. M. Tecnology Inc., "dsPIC30F Family Reference Manual," pp. 15–44, 2006.
- [6]. V. Semiconductors, "IGBT/MOSFET Gate Drive Optocoupler," *Retrieved Jul*, vol. 26, pp. 2007–2008, 2011.
- [7]. V. Siliconix, "Power MOSFET IRFP460, SiHFP460," no. V, pp. 1–9.
- [8]. 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
- [9]. M. Gopal, "Digital Control and State Variable Methods", 2nd ed. Tata McGraw-Hill,