

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

Ferry Aditya Sandjojo^{*)}, Iwan Setiawan dan Trias Andromeda

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

^{*)}E-mail : ferryaditya863@gmail.com

Abstrak

Inverter merupakan perangkat yang umum digunakan sebagai konverter untuk mengubah tegangan DC ke AC. Aplikasi inverter yang sering dijumpai adalah pada sistem photovoltaic yang tersambung dengan grid dimana kualitas arus keluaran inverter sangat berpengaruh terhadap kualitas daya, serta pada UPS dengan daya rendah hingga menengah dimana arus keluaran inverter harus dikontrol untuk meningkatkan performa UPS. Dibandingkan dengan inverter PWM open loop, inverter dengan kontrol arus memiliki beberapa keunggulan diantaranya respon sistem yang lebih cepat dan memiliki akurasi tinggi dalam pengontrolan. Salah satu metode yang umum digunakan untuk mengontrol arus keluaran inverter adalah kontroler arus histeresis, dimana arus keluaran inverter dan referensi yang diberikan dibandingkan dalam batas histeresis tertentu. Metode kontrol ini banyak digunakan karena sederhana, respon sistem yang cepat dan robust terhadap perubahan beban. Dalam penelitian ini, dirancang inverter satu fasa Full Bridge dengan metode kontrol arus histeresis menggunakan mikrokontroler 16-bit DSPIC30F4011. Arus keluaran inverter diumpan-balikkan oleh sensor arus ACS712-05B. Pengujian dilakukan dengan rentang referensi arus sebesar 1 – 3 A pada variasi beban 4,6 Ω dan 9,4 Ω . Hasil pengujian menunjukkan gelombang arus keluaran inverter mampu mengikuti referensi arus yang diberikan. Rata-rata error pada arus keluaran inverter adalah 0,55 A untuk beban 4,6 Ω dan 0,06 A untuk beban 9,4 Ω .

Kata Kunci : Kontrol Arus, Histeresis, Inverter, DSPIC30F4011.

Abstract

Inverter is the most commonly used device to convert DC to AC voltage. Application of inverter is often found in grid connected photovoltaic systems where power quality depends on output current quality and also in low and medium power UPSs where inverter output current needs to be controlled to improve UPS's performance. Compared to the open-loop PWM inverters, the current-controlled inverters have some advantages such as quick system response and high accuracy. One of the most common current control methods to control the inverter output current is hysteresis current control, where inverter output current is compared with reference current in a specific hysteresis band. This current control method is often used because of its quick system response and robustness towards load parameter change. In this research, a Full Bridge inverter with hysteresis current control is designed using 16-bit microcontroller DSPIC30F4011. Inverter output current is fed-back by current sensor ACS712-05B. Experiment is done with reference current range of 1 – 3 A at 4,6 Ω and 9,4 Ω loads. Experiment result shows that inverter output current waveform is able to follow the given reference current. Inverter output current average error is 0,55 A for 4,6 Ω load and 0,06 A for 9,4 Ω load.

Keywords : Current Control, Hysteresis, Inverter, DSPIC30F4011.

1. Pendahuluan

Inverter merupakan perangkat yang paling umum digunakan sebagai konverter untuk mengubah tegangan DC ke dalam tegangan AC. Salah satu aplikasi *inverter* yang paling sering dijumpai adalah pada sistem *photovoltaic* yang tersambung dengan *grid*, dimana tegangan yang terhubung pada sistem *grid* tidak dapat dikontrol [1]. Kualitas arus keluaran *inverter* sangat

berpengaruh terhadap kualitas daya. Contoh aplikasi lain *inverter* adalah pada *Uninterruptable Power Supply* (UPS) dengan daya rendah hingga menengah [2]. Untuk meningkatkan performa UPS, *inner current controller* biasa digunakan untuk mengontrol arus keluaran *inverter*. Salah satu metode untuk mengontrol arus keluaran *inverter* adalah kontroler arus histeresis. Kontroler arus histeresis membandingkan arus keluaran *inverter* dengan referensi yang diberikan dalam batas histeresis tertentu. Metode ini

sensor saat arus yang terbaca sebesar 5 A sesuai dengan Persamaan 1 berikut.

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

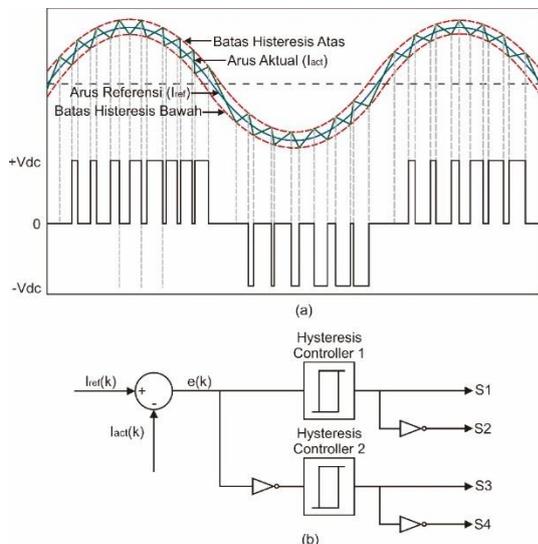
Tegangan keluaran sensor diatur menjadi maksimal 5 V untuk memudahkan pembacaan oleh modul *analog-to-digital converter* yang memiliki tegangan referensi sebesar 5 V.



Gambar 3. Sensor Arus ACS712-05B

2.3. Inverter Satu Fasa dengan Kontrol Arus Histeresis

Sinyal kontrol histeresis yang digunakan untuk memicu *gate* MOSFET pada *inverter* diperoleh dengan cara membandingkan nilai kesalahan atau *error e(k)* dan batas histeresis yang telah ditentukan. Nilai error diperoleh dari hasil pengurangan nilai arus aktual yang diukur oleh sensor arus (i_{act}) dan nilai referensi arus yang diberikan lewat potensiometer (i_{ref}) [3]. Setelah nilai $e(k)$ didapatkan, kontroler akan membandingkannya dengan batas histeresis atas dan batas histeresis bawah untuk menghasilkan sinyal kontrol.

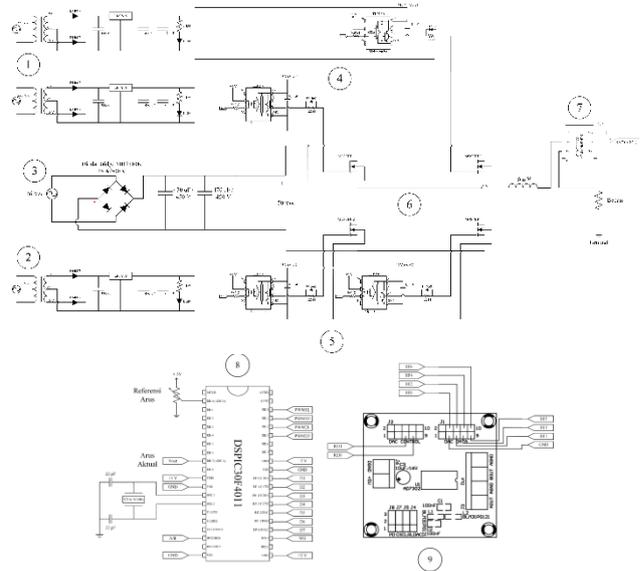


Gambar 4. (a) Arus dan Tegangan Keluaran *Inverter*, (b) Blok Kontroler Histeresis

Untuk membangkitkan sinyal kontrol histeresis dalam satu *leg* pada *inverter*, maka kontroler perlu membandingkan

nilai *error* dan batas histeresis dengan ketentuan sebagai berikut [10].

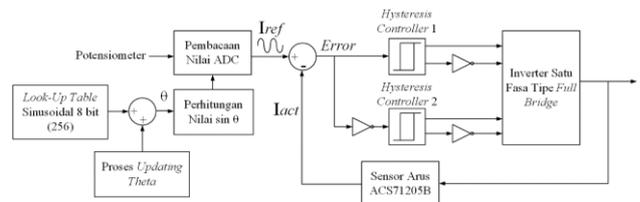
- ❖ Jika $e(k) > UPPHYS$ maka sinyal kontrol = 1.
 - ❖ Jika $e(k) < LOWHYS$ maka sinyal kontrol = 0.
- Dimana UPPHYS adalah batas histeresis atas dan LOWHYS adalah batas histeresis bawah.



Gambar 5. Rangkaian *Inverter* Satu Fasa dengan Kontroler Arus Histeresis

2.4. Kontroler Arus Histeresis

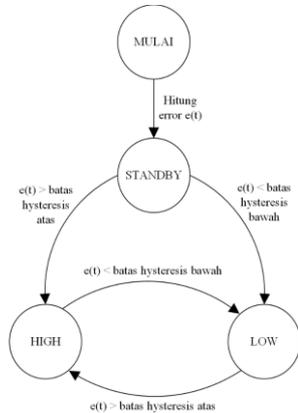
Untuk mengendalikan nilai arus aktual keluaran *inverter* agar dapat mengikuti referensi, mikrokontroler DSPIC30F4011 harus membangkitkan sinyal kontrol dengan *band* histeresis. Sinyal kontrol histeresis dibentuk dengan menghitung selisih antara arus aktual keluaran *inverter* yang dibaca oleh sensor dengan arus referensi yang berupa sinyal sinus, kemudian nilai *error* yang didapatkan dibandingkan dengan batas histeresis yang telah ditentukan [11].



Gambar 6. Diagram Blok Kontroler Arus Histeresis

Pembentukan sinyal kontrol histeresis pada Gambar 6 berdasarkan pada nilai *error e(k)* yang merupakan selisih antara arus aktual dan arus referensi, yang kemudian dibandingkan dengan batas histeresis atas dan bawah yang nilainya dapat diatur. Saat sistem dinyalakan maka kontroler akan berada dalam keadaan *STANDBY*. Jika nilai $e(k)$ lebih besar dari batas histeresis atas maka kontroler

akan mengalami transisi ke dalam keadaan *HIGH* dimana sinyal kontrol = 1, sementara jika nilai $e(k)$ lebih kecil dari batas histeresis bawah maka kontroler akan bertransisi ke dalam keadaan *LOW* dimana sinyal kontrol = 0. Siklus tersebut akan terus mengalami perulangan selama sistem menyala sehingga membentuk sinyal kontrol histeresis.



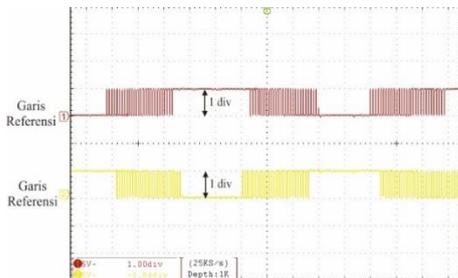
Gambar 7. Skema Pembentukan Sinyal Kontrol Histeresis

3. Hasil dan Analisa

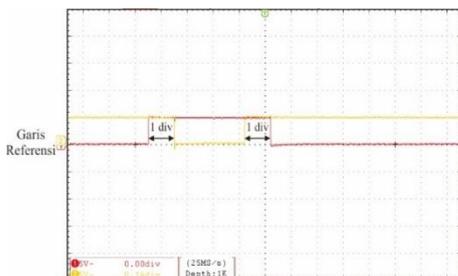
3.1. Pengujian Gelombang Keluaran Rangkaian Kontrol

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 2 uS antara pin PWMxL dan PWMxL. Pengujian dilakukan dengan program PWM *open loop* dengan frekuensi PWM 20 kHz.



Gambar 9. Gelombang Keluaran PWM *Open Loop*

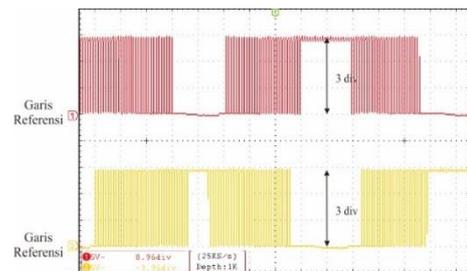


Gambar 10. *Dead Time* pada Keluaran PWM *Open Loop*

Hasil pengujian keluaran DSPIC30F4011 pada SPWM *open loop* menunjukkan bahwa sinyal kontrol bekerja dalam mode komplementer serta adanya *dead time* sebesar 2 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 pemucuan MOSFET.



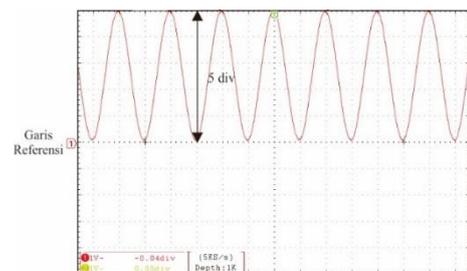
Gambar 11. Gelombang Keluaran *Driver* MOSFET TLP250

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 5 A. Arus diberikan dengan cara memasang beban resistif secara seri dengan sumber tegangan AC yang diatur sedemikian rupa hingga nilai arus yang mengalir adalah 5 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 12. Gelombang Keluaran Sensor Arus ACS712-05B ($I = 5 \text{ A}$)

Nilai tegangan puncak ke puncak pada pengujian sensor dalam Gambar 12 memiliki jumlah div 5 dengan skala

V/div = 1 V dengan faktor pengali *probe* 1x. Hal ini sudah sesuai dengan perancangan dimana saat arus = 5 A maka diperoleh tegangan keluaran sensor sebagai berikut.

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

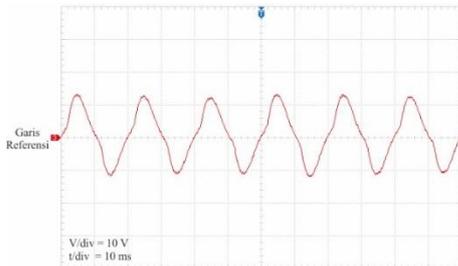
$$V_{out} = 2,5 + 0,5 \cdot 5$$

$$V_{out} = 5 \text{ V}$$

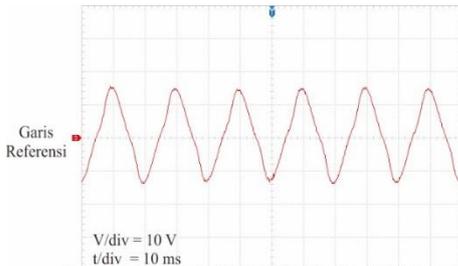
3.3. Pengujian Keluaran *Inverter* Satu Fasa dengan SPWM *Open Loop*

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 4,6 Ω dan 9,4 Ω.



Gambar 13. Tegangan Keluaran *Inverter* Open Loop dengan Beban 4,6 Ω pada Referensi 2 A.



Gambar 14. Tegangan Keluaran *Inverter* Open Loop dengan Beban 9,4 Ω pada Referensi 2 A.

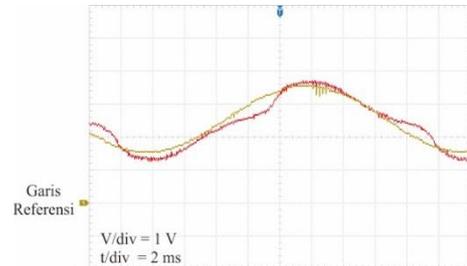
Hasil pengujian tegangan keluaran *inverter open loop* pada referensi arus 2 A menunjukkan bahwa nilai tegangan keluaran akan berubah saat *inverter* mengalami perubahan beban. Nilai tegangan rms yang terukur pada multimeter adalah 8,43 V untuk beban 4,6 Ω dan 9,9 V untuk beban 9,4 Ω. Hal ini cukup mendekati teori dimana nilai tegangan berbanding lurus dengan nilai resistansi pada beban.

3.3.2. Pengujian Arus Keluaran *Inverter*

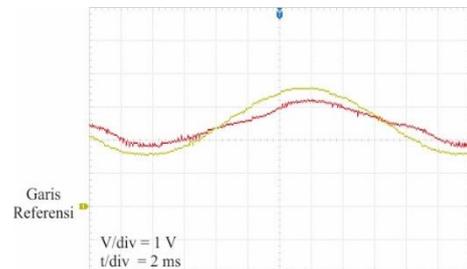
Pengujian bertujuan untuk mengamati bentuk gelombang dan *magnitude* arus keluaran *inverter* satu fasa yang dipicu oleh SPWM *open loop*. Arus keluaran diamati melalui

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 diumpun-balikkan pada sistem. Hasil pengujian arus keluaran *inverter* dengan SPWM *open loop* pada beban 4,6 Ω dan 9,4 Ω.



Gambar 15. Arus Keluaran *Inverter* Open Loop dengan Beban 4,6 Ω pada Referensi 2 A.



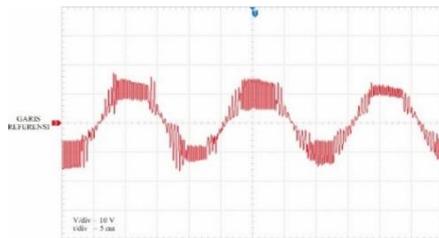
Gambar 16. Arus Keluaran *Inverter* Open Loop dengan Beban 9,4 Ω pada Referensi 2 A.

Gambar 15 dan Gambar 16 menunjukkan hubungan arus keluaran *inverter* (merah) dan referensi arus yang dibandingkan (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. Nilai arus rms yang terukur pada tang ampere adalah 1,72 A untuk beban 4,6 Ω dan 0,98 A untuk beban 9,4 Ω. Hal ini cukup mendekati teori dimana nilai arus berbanding terbalik dengan nilai resistansi pada beban. Namun, dapat dilihat pada Gambar 15 dan Gambar 16 bahwa gelombang arus keluaran *inverter* dengan SPWM *open loop* tidak dapat mengikuti gelombang referensi arus yang diberikan.

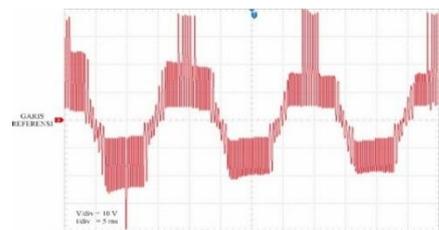
3.4. Pengujian Keluaran *Inverter* Satu Fasa dengan Kontrol Arus Histeresis

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 histeresis. Referensi arus yang diberikan adalah sebesar 2 A. Arus keluaran *inverter* diumpun-balikkan pada mikrokontroler DSPIC30F4011. Hasil pengujian tegangan keluaran *inverter* dengan kontroler arus histeresis pada beban 4,6 Ω dan 9,4 Ω.



Gambar 17. Tegangan Keluaran Inverter Histeresis dengan Beban $4,6 \Omega$ pada Referensi 2 A



Gambar 18. Tegangan Keluaran Inverter Histeresis dengan Beban $9,4 \Omega$ pada Referensi 2 A

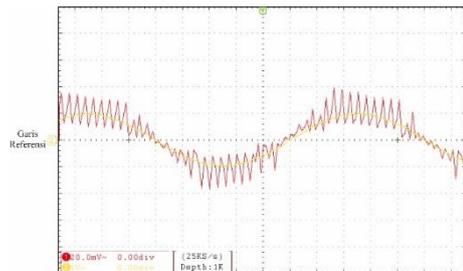
Hasil pengujian tegangan keluaran *inverter* dengan kontroler histeresis pada referensi arus 2 A menunjukkan bahwa nilai tegangan keluaran akan berubah saat *inverter* mengalami perubahan beban. Nilai tegangan rms yang terukur pada multimeter adalah 10,99 V untuk beban $4,6 \Omega$ dan 16,9 V untuk beban $9,4 \Omega$. Hal ini sesuai dengan teori kontrol arus, dimana nilai tegangan keluaran *inverter* akan berubah ketika nilai resistansi beban berubah. Sehingga nilai arus yang mengalir pada beban akan tetap mengikuti referensi meskipun beban diubah-ubah.

Namun dapat dilihat pada gambar hasil pengujian tegangan bahwa pada gelombang tegangan banyak terdapat *ripple*. Adanya *ripple* disebabkan oleh efek pensaklaran yang dikontrol secara manual oleh kontroler histeresis. Nyala dan matinya saklar dipengaruhi oleh perbandingan *error* arus dan batas histeresis yang diberikan yaitu 0,01 ampere, sehingga terjadi *ripple* tegangan yang cukup besar.

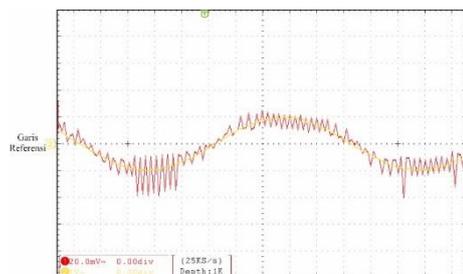
3.4.2. Pengujian Arus Keluaran Inverter

Pengujian bertujuan untuk mengamati bentuk gelombang dan *magnitude* arus keluaran *inverter* satu fasa yang dipicu oleh sinyal kontrol histeresis. 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* diumpam-balikkan pada mikrokontroler DSPIC30F4011. Hasil pengujian arus keluaran *inverter* kontroler arus histeresis pada beban $4,6 \Omega$ dan $9,4 \Omega$.



Gambar 19. Arus Keluaran Inverter Histeresis dengan Beban $4,6 \Omega$ pada Referensi 2 A



Gambar 20. Arus Keluaran Inverter Histeresis dengan Beban $9,4 \Omega$ pada Referensi 2 A

Gambar 19 dan Gambar 20 menunjukkan hubungan arus keluaran *inverter* (merah) dan referensi arus yang dibangkitkan (kuning). Hasil pengujian arus keluaran *inverter open loop* pada referensi arus 2 A menunjukkan bahwa arus keluaran sudah dapat mengikuti referensi yang diberikan. Arus keluaran *inverter* tetap dapat mengikuti referensi saat *inverter* mengalami perubahan beban.

Namun dapat dilihat pada gambar hasil pengujian terlihat bahwa pada gelombang arus keluaran banyak terdapat *ripple*. Adanya *ripple* disebabkan oleh efek pensaklaran yang dikontrol secara manual oleh kontroler histeresis. Nyala dan matinya saklar dipengaruhi oleh perbandingan *error* arus dan batas histeresis yang diberikan yaitu 0,01 ampere, sehingga terjadi *ripple* tegangan yang cukup besar. *Ripple* arus pada beban $4,6 \Omega$ terlihat lebih besar dari pada beban $9,4 \Omega$, hal ini dikarenakan semakin kecil nilai beban maka nilai arus akan semakin besar, sehingga *ripple* yang dihasilkan pun semakin besar.

Referensi arus yang dibangkitkan setara dengan 2 ampere *peak* (I_m), sehingga dengan Persamaan 4.1 didapatkan nilai referensi arus dalam rms sebesar 1,41 A.

Nilai arus rms yang terukur pada tang ampere adalah 2,03 A untuk beban $4,6 \Omega$ dan 1,41 A untuk beban $9,4 \Omega$. Nilai arus rms terukur pada beban $9,4 \Omega$ sama dengan referensi arus yang dibangkitkan. Namun, pada beban $4,6 \Omega$ arus rms yang terukur memiliki selisih yang cukup signifikan dengan referensi. Hal ini dikarenakan *ripple* arus yang terbentuk pada arus keluaran pada beban $4,6 \Omega$ turut terbaca oleh alat ukur arus, sehingga nilai yang ditampilkan memiliki selisih yang signifikan terhadap nilai sebenarnya.

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

Tabel 2. Hasil Pengujian *Inverter* Satu Fasa dengan Kontrol Arus Histeresis

Referensi (A)	Beban 4,6 Ω			Beban 9,4 Ω		
	Tegangan (V)	Arus (A)	Error (A)	Tegangan (V)	Arus (A)	Error (A)
1	4,65	1,14	0,70	11,1	0,88	-0,17
1,5	9,6	1,6	1,06	13,8	1,2	-0,13
2	10,99	2,03	1,41	16,9	1,41	0,004
2,5	11,77	2,48	1,76	19,6	1,78	-0,01
3	12,1	2,62	2,12	20,5	2,14	-0,01

4. Kesimpulan

Kontrol arus dengan Metode Histeresis telah berhasil diimplementasikan pada *inverter* satu fasa tipe Full Bridge, sehingga arus keluaran *inverter* dapat diatur mengikuti referensi yang diinginkan. Mikrokontroler DSPIC30F4011 dapat digunakan dengan baik untuk menghasilkan sinyal kontrol Histeresis sebagai sinyal pemuncian pensaklaran MOSFET pada *inverter* satu fasa. Gelombang arus keluaran pada *inverter* dengan SPWM open loop tidak dapat mengikuti referensi arus yang diberikan. Dengan rata-rata error arus sebesar 0,62 A untuk beban 4,6 Ω dan 0,38 A untuk beban 9,4 Ω. Gelombang arus keluaran pada *inverter* dengan kontroler arus Histeresis dapat mengikuti referensi arus dengan baik, meskipun nilai resistansi beban diubah. Rata-rata error arus pada *inverter* dengan kontroler arus Histeresis sebesar 0,55 A untuk beban 4,6 Ω dan 0,06 A untuk beban 9,4 Ω. Nilai error yang cukup besar pada beban 4,6 Ω disebabkan oleh ripple arus yang terukur oleh tang ampere sehingga nilai arus yang ditampilkan memiliki selisih yang cukup besar dengan nilai referensinya. Adanya ripple pada tegangan dan arus keluaran *inverter* dengan kontroler arus Histeresis disebabkan oleh pensaklaran MOSFET yang keadaan on dan off-nya dipicu oleh sinyal kontrol histeresis, dimana sinyal kontrol tidak membentuk pola yang teratur. Hal ini dikarenakan sinyal kontrol akan berpindah state dari 0 ke 1 dan dari 1 ke 0 secara instan berdasarkan perbandingan nilai error dan batas histeresis yang diberikan.

Referensi

- [1]. N. A. R. Krismadinata and J. Selvaraj, "Hysteresis Current Control and Sensorless MPPT for Grid-Connected Photovoltaic Systems," *2007 IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, no. L, pp. 572–577, 2007.
- [2]. P. A. Dahono and I. Krisbiantoro, "New hysteresis current controller for single-phase full-bridge inverters," *IET Power Electron.*, vol. 2, no. 5, pp. 585–594, 2009.
- [3]. M. Salman, M. Ashari, and H. Suryatomo, "Perancangan *Inverter* Satu Fasa Yang Terhubung Dengan Jaringan Distribusi Menggunakan Metode Hysteresis Current Control," *Proceeding Semin. Tugas Akhir*, pp. 1–7.
- [4]. X. Dai and Q. Chao, "The research of photovoltaic grid-connected *inverter* based on adaptive current hysteresis band control scheme," *1st Int. Conf. Sustain. Power Gener. Supply, SUPERGEN '09*, 2009.
- [5]. G. Rață and R. Marschalko, "Development of hysteresis modulation methods for PWM AC - to - DC converters based on dead - Beat control," *2006 IEEE Int. Conf. Autom. Qual. Testing, Robot. AQTR*, pp. 220–224, 2006.
- [6]. TOSHIBA, "TOSHIBA Photocoupler GaAlAs Ired & Photo-IC TLP 250," vol. 5, pp. 1–8, 2007.
- [7]. Intersil, "Mur1540, mur1560, rurp1540, rurp1560," no. 2778, pp. 1–4, 2000.
- [8]. S. Muttaqin, I. Setiawan, and M. Facta, "DESAIN DAN IMPLEMENTASI VOLTAGE-SOURCE INVERTER (VSI) TIGA FASE SINUSOIDAL PULSE-WIDTH MODULATION (SPWM) DENGAN DSPIC30F4011," *TRANSMISI*, vol. 18, no. 4, 2016.
- [9]. Allegro, "ACS712 Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC," pp. 217–219, 2017.
- [10]. R. De Doncker, D. W. J. Pulle, and A. Veltman, *Advanced Electrical Drives: Analysis, Modeling, Control*. Springer Science+Business Media, 2011.
- [11]. B. V. Ranganadh, A. M. Prasad, and M. Sreedhar, "Modelling And Simulation Of A Hysteresis Band Pulse Width Modulated Current Controller Applied To A Three Phase Voltage Source *Inverter* By Using Mat lab," *IJAREEIE*, vol. 2, no. 9, pp. 4378–4387, 2013.