

# Integrasi *Photovoltaic* ke Jaringan Distribusi Listrik Tiga Fase Empat Kawat untuk Transfer Daya dan Perbaikan Kualitas Daya

Susatyo Handoko<sup>1,2</sup>, Sasongko Pramono Hadi<sup>1</sup>, Suharyanto<sup>1</sup>, Eka Firmansyah<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

Jl. Grafika No. 2 Yogyakarta – 55281, Indonesia

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedharto SH, Tembalang, Semarang – 50275, Indonesia

susaty073@gmail.com, sasongko@te.ugm.ac.id, suharyanto@ugm.ac.id, eka.firmansyah@ugm.ac.id

**Abstract**—Integration of photovoltaic (PV) to a three-phase four-wire electricity distribution system is a major concern in this paper. A two-stage inverter comprising a boost DC-DC converter (chopper) and three-phase four legs DC-AC inverter is implemented. The functions of this inverter are for injecting power and improving power quality. Chopper controller was designed so that all available PV power would be injected to distribution system. In addition to sending power, the mentioned inverter also serves as an active power filter that can provide reactive power compensation, harmonic, and current imbalance simultaneously. The study was conducted with PSIM-based simulation. The results show that inverter works effectively. It is shown by the injection of the available power from the PV to the distribution system, power factor improvement, reduced harmonic distortion, and balanced current in distribution system.

**Keywords:** inverter, photovoltaic (PV), power quality, three-phase four-wire distribution system

**Abstrak** — Integrasi *photovoltaic* (PV) ke sistem distribusi listrik tiga fase empat kawat menjadi perhatian utama pada penelitian ini. Inverter dua tingkat yang terdiri dari DC-DC converter (*chopper*) dan DC-AC inverter tiga fase empat lengan diimplementasikan. Fungsi inverter adalah untuk mengirimkan daya dan memperbaiki kualitas daya. Pengendali *chopper* didesain supaya semua daya PV yang tersedia akan dikirimkan ke sistem distribusi. Selain mengirimkan daya, inverter juga berfungsi sebagai filter daya aktif yang memberikan kompensasi daya reaktif, harmonik, dan ketidakseimbangan arus secara bersamaan. Simulasi dilakukan menggunakan PSIM. Hasil simulasi menunjukkan inverter bekerja dengan efektif. Hal ini ditunjukkan dengan transfer daya PV yang tersedia ke sistem distribusi, perbaikan faktor daya, distorsi harmonik yang berkurang, dan arus yang seimbang di sistem distribusi.

**Kata kunci:** inverter, photovoltaic (PV), kualitas daya, sistem distribusi tiga fase empat kawat

## I. PENDAHULUAN

Salah satu aplikasi energi matahari yang penting adalah *photovoltaic* (PV) yang terhubung ke jaringan listrik. PV dapat dihubungkan dengan jaringan listrik menggunakan inverter satu tingkat atau inverter dua tingkat. Pada inverter satu tingkat, untuk menghubungkan PV dan jaringan hanya digunakan inverter sedangkan

pada inverter dua tingkat digunakan *boost converter* dan inverter.

Pada inverter dua tingkat, *boost converter* berfungsi sebagai *maximum power point tracking* (MPPT) untuk mendapatkan titik daya maksimum dan inverter digunakan untuk mengirimkan daya ke jaringan listrik. Beberapa penelitian sudah membahas algoritma MPPT [1]-[3]. Pengembangan model untuk array PV dan teknik MPPT berbasis algoritma *perturb & observe* dibahas di [2]. Pembahasan MPPT berbasis korelasi riak ditunjukkan di [3]. Output dari *boost converter* dihubungkan ke DC-link inverter. Semua daya dari PV dikirimkan ke DC-link dan kemudian ke jaringan listrik dengan kendali inverter yang tepat. Beberapa penelitian membahas sistem PV terhubung jaringan menggunakan inverter dua tingkat [4]-[7].

Dengan kemajuan dalam bidang elektronika daya dan teknologi kontrol digital, inverter terhubung jaringan dapat dikendalikan secara aktif untuk meningkatkan operasi sistem dengan meningkatkan kualitas daya di PCC. Beberapa penelitian sudah membahas kendali inverter yang berfungsi untuk mengirimkan daya dan perbaikan kualitas daya [8]-[11]. Sebuah penelitian membahas tentang kendali inverter terhubung jaringan untuk memberikan kompensasi faktor daya [8]. Beberapa penelitian yang lain membahas kendali inverter terhubung jaringan distribusi tiga fase empat kawat dengan fitur perbaikan kualitas daya [9], [10].

Pada penelitian ini akan dibahas integrasi PV dan sistem distribusi listrik tiga fase empat kawat. Pengendalian dilakukan untuk mengirimkan semua daya yang tersedia pada PV dan memperbaiki kualitas daya di sisi jaringan yang mencakup kompensasi harmonik, daya reaktif, dan ketidakseimbangan arus. *Boost converter* yang digunakan sebagai MPPT menggunakan algoritma *perturb & observe* karena implementasi yang sederhana. Tegangan DC-link diatur menggunakan pengendali PI (*proportional integral*).

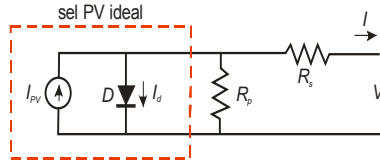
## II. KONFIGURASI SISTEM

Skema integrasi PV dan jaringan distribusi tiga-fase empat-kawat ditunjukkan pada Gambar 1. Sel *photovoltaic* ideal dapat dituliskan dengan persamaan matematik sebagai berikut :

$$I = I_{pv,sel} - I_d \quad (1)$$

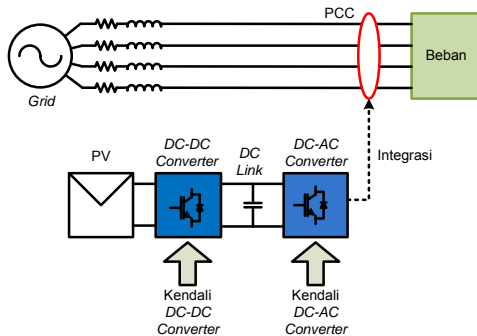
$$I_d = I_{0,sel} \left[ \exp \left( \frac{qV}{akT} \right) - 1 \right] \quad (2)$$

Rangkaian ekivalen modul *photovoltaic* ditunjukkan pada Gambar 1 yang terdiri dari sumber arus cahaya (*photocurrent source*)  $I_{PV}$ , dioda terbalik (*reverse diode*)  $D$ , dan dua resistansi yang merupakan rugi-rugi (*loss resistance*) yaitu resistansi paralel (*shunt*)  $R_p$  dan resistansi seri (*series*)  $R_s$ .



Gambar 1. Rangkaian ekivalen modul *photovoltaic*.

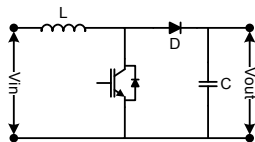
Terdapat 2 (dua) *converter* yang digunakan yaitu *DC-DC converter* dan *DC-AC converter*.



Gambar 2. Skema integrasi PV dan jaringan distribusi

#### A. DC-DC Converter

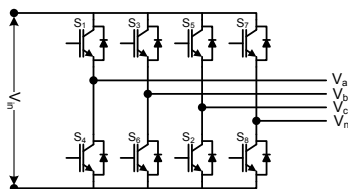
*DC-DC converter* yang digunakan adalah tipe *boost*. Dengan menggunakan *DC-DC converter* tipe *boost* maka tegangan *DC-link* akan lebih tinggi daripada tegangan output PV. Gambar 3 menunjukkan rangkaian *DC-DC converter* tipe *boost*.



Gambar 3. Rangkaian *DC-DC converter* tipe *boost*

#### B. DC-AC Converter (*inverter*)

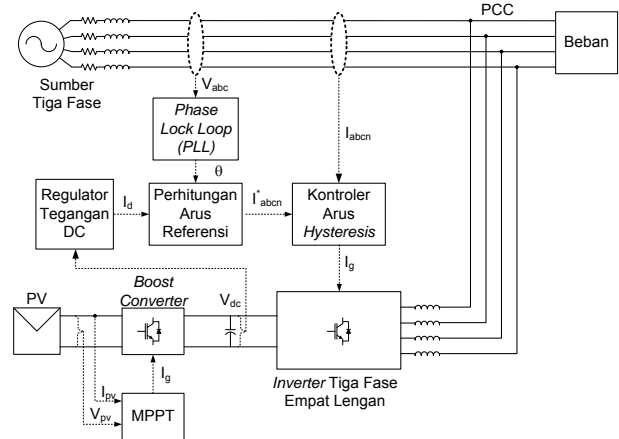
*Inverter* yang digunakan adalah *inverter* tiga fase empat lengan. Rangkaian *inverter* tiga fase empat lengan ditunjukkan pada Gambar 4. Kaki ke-4 dihubungkan ke kawat netral dan digunakan untuk mengatasi ketidakseimbangan arus.



Gambar 4. Rangkaian *inverter* tiga fase empat lengan

### III. STRATEGI KENDALI

Gambar 5 menunjukkan skema strategi kendali.

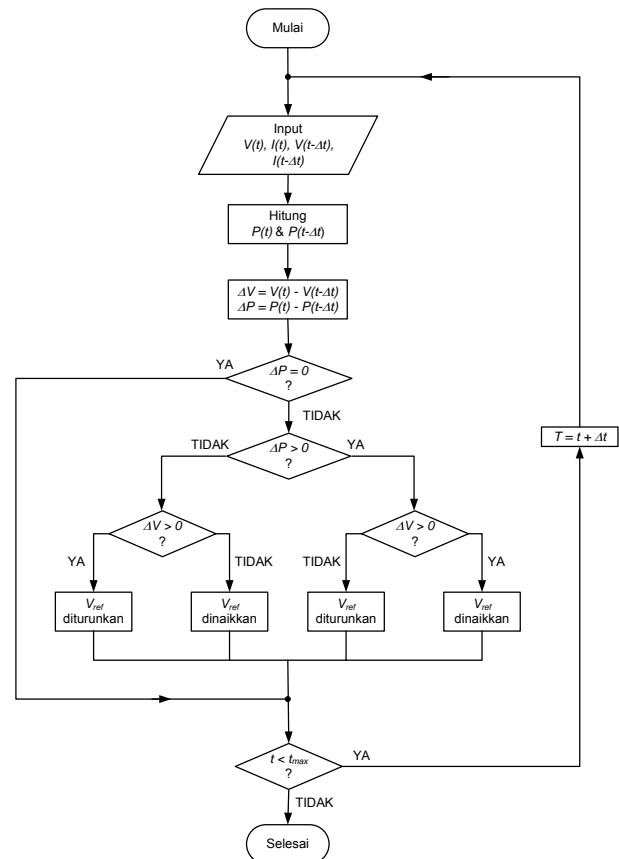


Gambar 5. Skema strategi kendali

Terdapat 5 (lima) blok untuk mengendalikan sistem PV terhubung jaringan distribusi yaitu:

#### A. Maximum power point tracking (MPPT)

Untuk mendapatkan output daya PV yang maksimum digunakan *maximum power point tracking* (MPPT). Algoritma MPPT yang digunakan adalah *perturb & observe* (PO). Gambar 6 menunjukkan diagram alir algoritma *perturb & observe* pada MPPT.



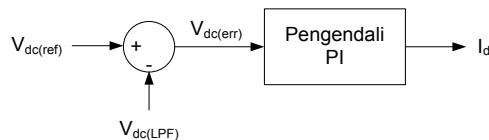
Gambar 6. Algoritma *perturb & observe* pada MPPT

### B. Regulator tegangan DC

Tegangan kapaitor *DC-link* diatur supaya nilainya konstan. Regulator tegangan DC berperan dalam mengatur aliran daya antara sumber tiga fase dan PV. Pengendali PI digunakan dalam regulator tegangan DC untuk menghasilkan nilai puncak arus pada jaringan distribusi. Galat tegangan *DC-link* diperoleh dengan:

$$V_{dc(err)} = V_{dc(ref)} - V_{dc(LPF)} \quad (3)$$

Input regulator tegangan DC adalah galat tegangan DC  $V_{dc(err)}$  dan outputnya adalah nilai puncak arus yang mengalir di jaringan distribusi  $I_d$ . Gambar 7 menunjukkan diagram blok regulator tegangan DC.

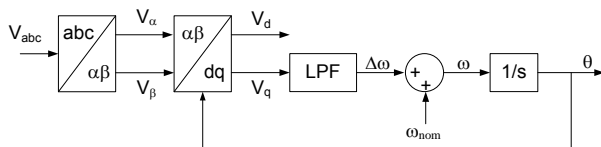


Gambar 7. Diagram blok regulator tegangan DC

Arus  $I_d$  digunakan untuk menghasilkan tiga buah arus fase a, b, dan c pada jaringan distribusi. Sudut fase diperoleh dari *phase locked loop* (PLL).

### C. Phase locked loop (PLL)

Teknik *phase-locked loop* (PLL) merupakan teknik yang umum dipakai untuk mendapatkan informasi frekuensi dan sudut fase. Pada penelitian ini, PLL digunakan untuk membuat arus jaringan yang sefase dengan tegangan jaringan. Gambar 8 menunjukkan konfigurasi PLL yang digunakan.



Gambar 8. Konfigurasi PLL

### D. Perhitungan arus referensi

Nilai sesaat arus referensi jaringan distribusi dihitung dengan,

$$I_a^* = I_m \cos(\theta) \quad (4)$$

$$I_b^* = I_m \cos(\theta - 120^\circ) \quad (5)$$

$$I_c^* = I_m \cos(\theta - 240^\circ) \quad (6)$$

$$I_n^* = 0 \quad (7)$$

### E. Pengendali arus hysteresis

Pengendali arus *hysteresis* berfungsi untuk menghasilkan pulsa pensaklaran IGBT. Arus aktual dibandingkan dengan arus referensi dengan pita *hysteresis* yang sudah ditentukan. Pola pensaklaran IGBT ditentukan dengan

Jika  $(I_a^* - I_a) = +h_b$ , maka saklar atas  $S_1$  akan *ON* dan saklar bawah  $S_4$  akan *OFF* pada *inverter* lengan “a”.

Jika  $(I_a^* - I_a) = -h_b$ , maka saklar atas  $S_1$  akan *OFF* dan saklar bawah  $S_4$  akan *ON* pada *inverter* lengan “a”.

Dengan  $h_b$  adalah lebar pita *hysteresis*. Pulsa pensaklaran untuk lengan *inverter* yang lain dilakukan dengan pola yang sama.

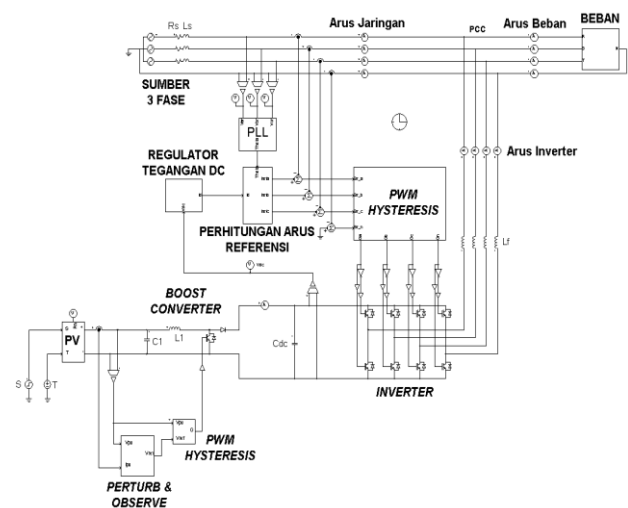
## IV. HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

Parameter yang digunakan untuk simulasi ditunjukkan pada tabel 1.

TABEL I. PARAMETER SISTEM

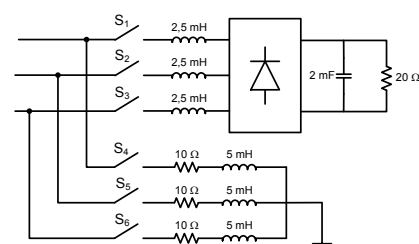
Parameter	Nilai
Tegangan sumber per fase (L-N)	220 V
Frekuensi	50 Hz
Resistansi jaringan ( $R_s$ )	0,1 $\Omega$
Induktansi jaringan ( $L_s$ )	0,5 mH
Tegangan bus DC referensi ( $V_{dc(ref)}$ )	800 V
Kapasitor <i>DC-link</i> ( $C_{dc}$ )	10 mF
Kapasitor <i>boost converter</i> ( $C_1$ )	2,35 mF
Induktansi filter ( $L_f$ )	4,2 mH
Induktansi <i>boost converter</i> ( $L_1$ )	1 mH
Daya maksimum PV ( $P_m$ ) saat $S = 1000$ W/m <sup>2</sup> dan $T = 25^\circ\text{C}$	40,36 kW

Gambar 9 menunjukkan blok simulasi sistem yang dibuat dengan PSIM.



Gambar 9. Blok simulasi dengan PSIM

Rangkaian beban yang digunakan untuk menganalisis kinerja sistem kendali ditunjukkan pada Gambar 10.

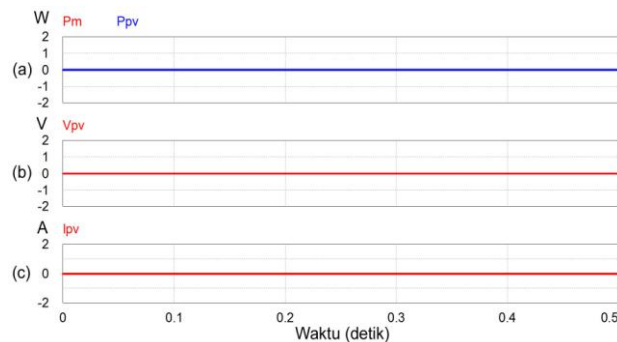


Gambar 10. Rangkaian beban

Simulasi dilakukan dengan melakukan variasi terhadap nilai iradiasi ( $S$ ), temperatur ( $T$ ), dan posisi saklar ( $S_1$ - $S_6$ ). Terdapat 3 (tiga) kasus yang dibahas pada penelitian ini.

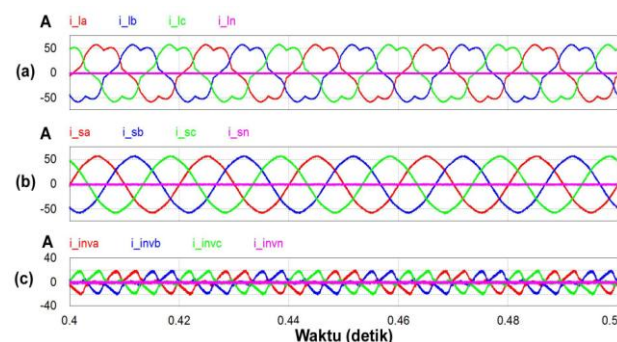
A. Kasus 1 ( $S = 0 \text{ W/m}^2$ ,  $T = 25^\circ\text{C}$ ,  $S_1 - S_6$  on)

Gambar 11 menunjukkan hasil simulasi output PV saat iradiasi ( $S$ ) =  $0 \text{ W/m}^2$  dan temperatur ( $T$ ) =  $25^\circ\text{C}$ . Terlihat bahwa daya maksimum PV ( $P_m$ ), daya output PV ( $P_{pv}$ ), tegangan output PV ( $V_{pv}$ ) dan arus output PV ( $I_{pv}$ ) bernilai 0. Hal ini disebabkan karena iradiasi matahari ( $S$ ) bernilai  $0 \text{ W/m}^2$ .

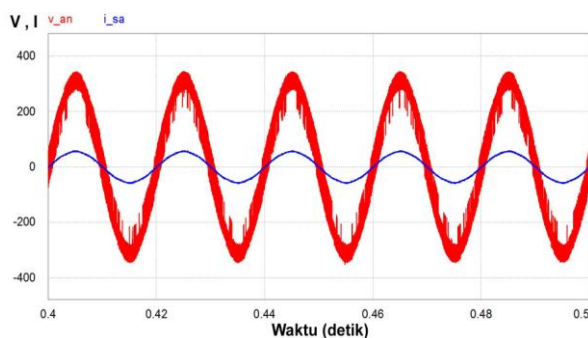


Gambar 11. Output PV (kasus 1)  
(a) Daya (b) Tegangan (c) Arus

Gambar 12 menunjukkan hasil simulasi untuk gelombang arus beban, arus jaringan distribusi, dan arus inverter pada kasus 1. Total harmonic Distortion (THD) arus beban adalah 13,6% dan arus jaringan 2,1%. Dengan  $S_1 - S_6$  on maka arus beban fasa a, b, dan c akan memiliki bentuk yang sama dengan perbedaan fasa  $120^\circ$  dan arus netral sama dengan nol.



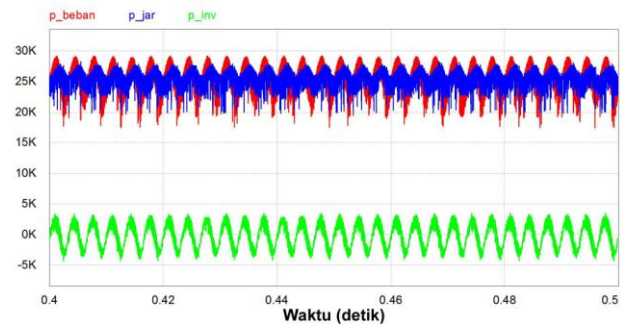
Gambar 12. Gelombang arus (kasus 1)  
(a) Beban (b) Jaringan (c) Inverter



Gambar 13. Gelombang tegangan dan arus fase a (kasus 1)

Gambar 13 menunjukkan gelombang tegangan dan arus fase a yang sefase pada kasus 1. Hal ini berarti bahwa kompensasi daya reaktif dapat dilakukan dengan baik.

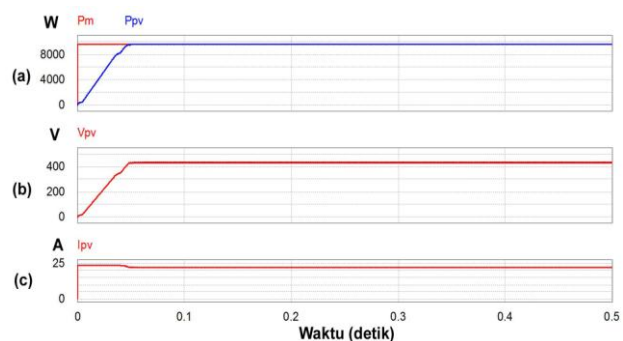
Gambar 14 menunjukkan hasil simulasi untuk daya sesaat di beban, jaringan, dan inverter pada kasus 1. Total Daya sesaat rata-rata di beban dan jaringan memiliki nilai yang sama yaitu sebesar 25,5 kW sedangkan daya rata-rata di inverter 0 kW.



Gambar 14. Daya sesaat (kasus 1)

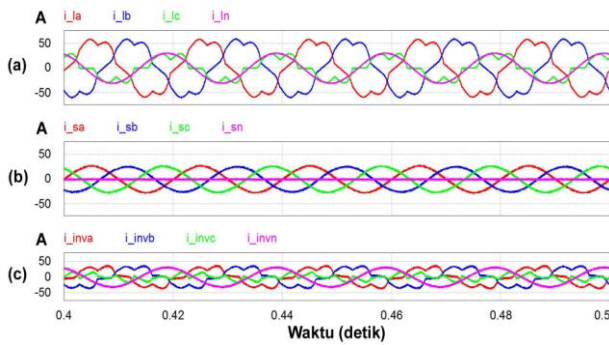
B. Kasus 2 ( $S = 250 \text{ W/m}^2$ ,  $T = 25^\circ\text{C}$ ,  $S_1 - S_5$  on)

Gambar 15 menunjukkan hasil simulasi output PV saat iradiasi ( $S$ ) =  $250 \text{ W/m}^2$  dan temperatur ( $T$ ) =  $25^\circ\text{C}$ . Gambar 15(a) menunjukkan bahwa daya maksimum PV ( $P_m$ ) adalah 9,6 kW. Terlihat juga bahwa daya output PV ( $P_{pv}$ ) akan sama dengan daya maksimum PV setelah 0,05 detik. Gambar 15(b) dan 15(c) menunjukkan bahwa tegangan dan arus saat daya output PV maksimum adalah 433 V dan 22,3 A.



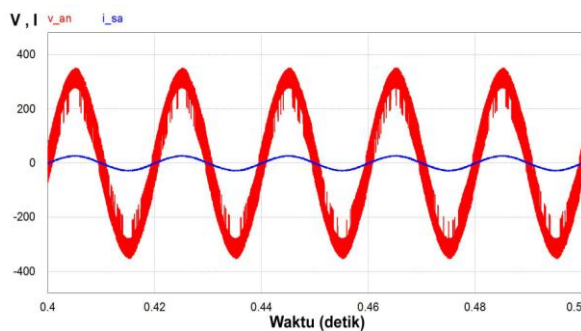
Gambar 15. Output PV (kasus 2)  
(a) Daya (b) Tegangan (c) Arus

Gambar 16 menunjukkan hasil simulasi untuk gelombang arus beban, arus jaringan distribusi, dan arus inverter pada kasus 2. Total harmonic Distortion (THD) arus beban fase a, b, dan c adalah 13,6%, 13,6% dan 30,0%. Sedangkan THD arus jaringan fase a, b, dan c adalah sama sebesar 3,8%. Dengan  $S_1 - S_5$  on dan  $S_6$  off maka terlihat pada Gambar 16(a) arus netral mengalir di beban. Sedangkan pada Gambar 16(b) terlihat bahwa arus netral tidak mengalir di jaringan. Hal ini berarti bahwa kompensasi arus netral dapat dilakukan dengan baik.



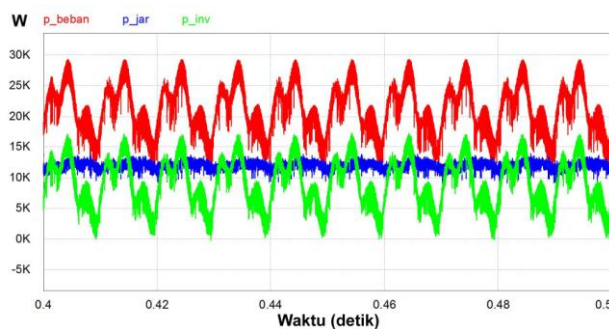
Gambar 16. Gelombang arus (kasus 2)  
(a) Beban (b) Jaringan (c) *Inverter*

Gambar 17 menunjukkan gelombang tegangan dan arus fase a yang sefase pada kasus 2. Hal ini berarti bahwa kompensasi daya reaktif dapat dilakukan dengan baik.



Gambar 17. Gelombang tegangan dan arus fase a (kasus 2)

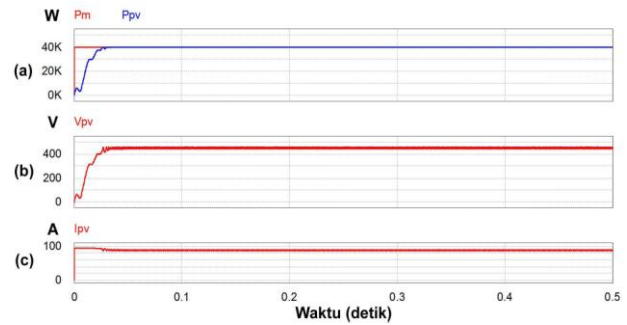
Gambar 18 menunjukkan hasil simulasi untuk daya sesaat di beban, jaringan, dan *inverter* pada kasus 2. Total Daya sesaat rata-rata di beban, jaringan, dan *inverter* adalah 21,3 kW, 12,1 kW, dan 9,2 kW.



Gambar 18. Daya sesaat (kasus 2)

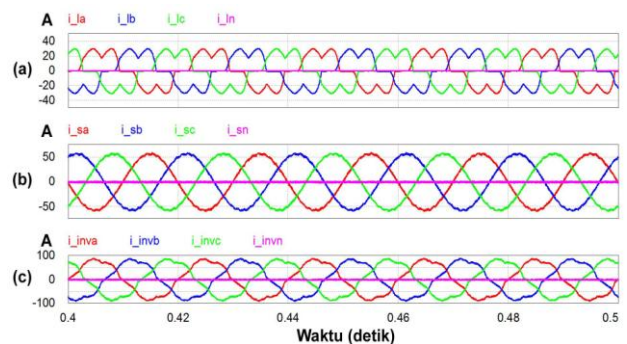
### C. Kasus 3 ( $S = 1000 \text{ W/m}^2$ , $T = 25^\circ\text{C}$ , $S_1 - S_3 \text{ on}$ )

Gambar 19 menunjukkan hasil simulasi output PV saat iradiasi ( $S = 1000 \text{ W/m}^2$  dan temperatur ( $T = 25^\circ\text{C}$ ). Gambar 19(a) menunjukkan bahwa daya maksimum PV ( $P_m$ ) adalah 40,3 kW. Terlihat juga bahwa daya output PV ( $P_{pv}$ ) akan sama dengan daya maksimum PV setelah 0,04 detik. Gambar 19(b) dan 19(c) menunjukkan bahwa tegangan dan arus saat daya output PV maksimum adalah 453 V dan 89,1 A.



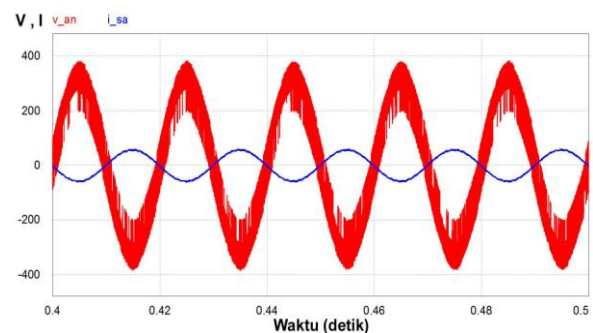
Gambar 19. Output PV (kasus 3)  
(a) Daya (b) Tegangan (c) Arus

Gambar 20 menunjukkan hasil simulasi untuk gelombang arus beban, arus jaringan distribusi, dan arus *inverter* pada kasus 3. Total harmonic Distortion (THD) arus beban adalah 28,9% dan arus jaringan adalah 2,4%. Dengan  $S_1 - S_3 \text{ on}$  dan  $S_4 - S_6 \text{ off}$  maka beban hanya berupa beban penyearah tiga fase dengan beban RL. Oleh karena itu arus netral tidak mengalir di beban. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 20(a).



Gambar 20. Gelombang arus (kasus 3)  
(a) Beban (b) Jaringan (c) *Inverter*

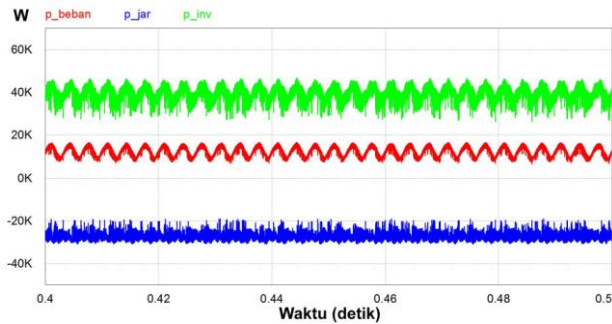
Gambar 21 menunjukkan gelombang tegangan dan arus fase a yang berbeda fase  $180^\circ$  pada kasus 3. Hal ini berarti bahwa jaringan distribusi menerima daya yang dihasilkan oleh PV.



Gambar 21. Gelombang tegangan dan arus fase a (kasus 3)

Gambar 22 menunjukkan hasil simulasi untuk daya sesaat di beban, jaringan, dan *inverter* pada kasus 3. Total Daya sesaat rata-rata di beban, jaringan, dan *inverter* adalah 12,6 kW, -27,4 kW, dan 40,0 kW. Pada kasus 3 ini, daya sesaat rata-rata jaringan adalah -27,4 kW yang berarti jaringan menyerap daya yang dihasilkan oleh PV. Hal ini disebabkan karena daya yang dibutuhkan beban lebih kecil daripada daya yang dihasilkan oleh PV.





Gambar 22. Daya sesaat ( kasus 3)

## V. KESIMPULAN

Penelitian ini membahas kendali *inverter* dua tingkat untuk mengintegrasikan PV dan jaringan distribusi listrik tiga fase empat kawat. *Inverter* berfungsi untuk mengirimkan daya yang dihasilkan PV dan untuk meningkatkan kualitas daya di jaringan.

*DC-DC converter* yang dikendalikan dengan algoritma *perturb & observe* dapat mengoperasikan *photovoltaic* pada titik daya maksimumnya. Kendali *inverter* dapat mengendalikan *inverter* sehingga semua daya yang dihasilkan PV dikirimkan ke PCC. Jika daya beban lebih kecil daripada daya yang dihasilkan PV maka kelebihan daya akan dikirimkan ke jaringan. Selain mengirimkan semua daya yang dihasilkan PV, kendali *inverter* dapat memberikan kompensasi harmonik, daya reaktif dan ketidakseimbangan arus. Pada ketiga kasus yang dibahas, nilai harmonik arus jaringan sudah dibawah 5%.

## REFERENSI

- [1] Trishan Esum, and Patrick L. Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques" IEEE Transactions on Energy Conversions, Vol. 22, no. 2, June 2007.
- [2] Zhang Yang, Lin Heyun, Yan Jianhu, Feng Yi, Guo Yujing and Lu Xiaoquan, "Photovoltaic non-linear model solution and

improved P&O method for MPPT," 2nd IET Renewable Power Generation Conference (RPG), 2013, pp.1-4.

- [3] D. Casadei, G. Grandi and C. Rossi, "Single-phase single-stage photovoltaic generation system based on a ripple correlation control maximum power point tracking," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol.21, no.2, pp.562-568, June 2006.
- [4] A.O. Zue and A. Chandra, "Grid Connected Photovoltaic Interface with VAR Compensation and Active Filtering Functions", in Proc. Of International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, 2006. PEDES '06, vol., no., pp.1-6, 12-15 Dec. 2006.
- [5] S.Y. Mosazadeh, S.H. Fathi, M. Hajizadeh, A.R. Sheykholeslami, "Adaptive Hysteresis Band Controlled Grid connected PV System with Active Filter Function", International Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE), July 3-5, 2012, pp. 1-8.
- [6] V. Ilavarasi, C.C.A. Rajan, "Power Quality Improvement in Grid connected System using Four Leg VSI", International Conference on Advances in Engineering, Science and Management, March 30-31, 2012, pp. 540-546.
- [7] B. Singh, D.T. Shahani, A.K. Verma, "Power Balance Theory Based Control of Grid Interfaced Solar Photovoltaic Power Generating System with Improved Power Quality", IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), December 18-19, 2012, pp. 1-7.
- [8] P.G Barbosa, L.G Rolim, E.H Watanabe and R. Hamish, "Control Strategy for grid connected DC-AC Converter with load power factor correction", IEE Proc. Gen. Trans. Distri. vol.145, no.5, Sept. 1998.
- [9] J. P. Pinto, R. Pregitzer, L. F. C. Monteiro, and J. L. Afonso, "3-phase 4-wire shunt active power filter with renewable energy interface", presented at the IEEE Conference on Renewable Energy & Power Quality, Seville, Spain, 2007.
- [10] M. Singh, V. Khadkikar, A. Chandra, R.K. Varma, "Grid Interconnection of Renewable Energy Sources at the Distribution Level with Power-Quality Improvement Features", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, No. 1, 2011, pp. 307-315.
- [11] C. Picardi, D. Sgrò and G. Gioffré, "A new active filtering technique for grid-connected inverters", International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2012, pp. 900 - 905