

Pengaruh Penalaan Pengontrol PID *Phase-Locked Loop* (PLL) *Grid Tie Inverter* Terhadap Transfer Daya ke Grid

Abdul Hafid¹, Andi Faharuddin², dan Zainal Abidin³

^{1,2}Program Studi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Makassar
Jl. Sultan Alauddin No. 259 Makassar 90221

³Program Studi Teknik Elektronika Politeknik Negeri Ujung Pandang Makassar
Jl. Perintis Kemerdekaan KM.10 Tamalanrea , Makassar 90245
e-mail: abdul.hafid@unismuh.ac.id

Abstrak— Makalah ini menjelaskan pengaruh tuning pengontrol *Grid Tie Inverter PID Phase-Locked Loop* (PLL) terhadap transfer daya ke jaringan. Penyetelan pengontrol menggunakan metode sensitivitas *ultimate Ziegler-Nichols*. *Grid Tie Inverter* umumnya digunakan untuk menyinkronkan PV array dengan jaringan listrik PLN/Grid. Simulasi menggunakan Simulink Matlab model 250 kW PV array yang terhubung ke jaringan listrik. Simulasi dijalankan pada Matlab R2019a menggunakan PC dengan prosesor i7 4790- Ram 4 GB. Berdasarkan hasil simulasi, jika gain pengontrol diatur dengan konstanta $K_P=100$, konstanta integral $K_I=400$ dan konstanta turunan $K_D=250$ maka daya keluaran PV array yang masuk ke Grid melalui inverter sangat berfluktuasi walaupun kondisi iradiasi matahari yang jatuh ke permukaan panel surya tetap konstan. Hal yang sama terjadi jika penguatan pengontrol PID diatur dengan nilai $K_P=100$, $K_I=300$ dan $K_D=150$. Jika gain pengontrol PID diatur pada nilai $K_P=0.5$, $K_I=2$ dan $K_D=2$, maka terlihat bahwa daya keluaran inverter stabil. Berdasarkan hasil pengujian kelima gain tuning inverter PID *Phase-Locked Loop* inverter PV dengan menggunakan metode sensitivitas *ultimate Ziegler-Nichols*, hasilnya semuanya berhasil yaitu transfer daya dari PV array ke jaringan listrik berjalan dengan baik.

Kata kunci: PID controller, Phase-Locked Loop, Ziegler-Nichols, Grid Tie Inverter

Abstract— *This paper describes the effect of tuning the PID Phase-Locked Loop (PLL) Grid Tie Inverter controller on power transfer to the grid. The controller tuning uses the Ziegler-Nichols ultimate sensitivity method. Grid Tie Inverters are generally used for synchronizing photovoltaic arrays (PV arrays) with the PLN/Grid power grid. The simulation model uses a Simulink Matlab PV array model of 250 kW-connected to the grid. The simulation was run on Matlab R2019a using a PC with an i7 4790 processor- 4 GB Ram. Based on the simulation results, if the controller gain is set with a constant $K_P=100$, an integral constant $K_I=400$ and a derivative constant $K_D=250$ then the PV array output power supplied to the grid through the inverter fluctuates greatly even though the condition of solar irradiation falling onto the surface of the solar module remains constant. The same thing happens if the gain of the PID controller is set to the values $K_P=100$, $K_I=300$ and $K_D=150$. For the case that the PID controller gain is set to the values of $K_P=0.5$, $K_I=2$ and $K_D=2$, it can be seen that the inverter output power is stable. Based on the test results of the five gain tunings of the PID Phase-Locked Loop inverter PV inverter using the Ziegler-Nichols ultimate sensitivity method, the results were all successful, namely that the transfer of power from the PV array to the grid went well. amount varies depending on the solar irradiation that falls on the surface of the solar cell.*

Keywords: PID controller, Phase-Locked Loop, Ziegler-Nichols, Grid Tie Inverter

I. PENDAHULUAN

Pesatnya pertumbuhan dan perkembangan ekonomi masyarakat berakibat konsumsi energi listrik semakin besar. Sementara ketersediaan bahan bakar fosil seperti batubara, dan BBM sebagai sumber energi penggerak turbin uap dan generator diesel semakin menipis, oleh sebab itu diperlukan eksplorasi sumber energi alternatif untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Pemenuhan kebutuhan energi listrik, khususnya di Indonesia sebagian kecil dipenuhi oleh Pusat Listrik Tenaga Air (PLTA), dan mikrohidro (PLTMH), dan sisanya dipenuhi oleh

pembangkit-pembangkit listrik dengan penggerak/turbin berbahan bakar batubara, gas alam dan BBM. Persentase turbin generator yang menggunakan BBM sebesar 7%, gas alam 29% dan batubara sebesar 50%. Sementara itu sumber energi terbarukan seperti: Air, surya, panas bumi, angin/bayu, bioenergi, arus dan gelombang laut hanya berkontribusi sebesar 14% [1]. Pada tahun 2025 berdasarkan Rencana Umum Energi Nasional (RUEN), bahwa Indonesia akan siap menggunakan 23% dari total produksi energi yang berasal dari sumber energi yang dapat diperbaharui atau disebut juga sebagai Energi Baru Terbarukan (EBT). Pada daerah Sulawesi Selatan,

khususnya pemanfaatan energi surya sebagai pembangkit energi listrik sudah banyak dilakukan. Sebagai contoh Pusat Listrik Tenaga Surya (PLTS) Pulau Kodingareng dengan daya 400 kW [2] menggunakan 6 PV array (*Photovoltaic array*), dimana setiap PV array dibangun dari 27 *string* disusun paralel, dan setiap *string* terdiri dari 13 unit fotovoltai/modul surya tersusun seri. PLTS Pulau Kodingareng dioperasikan secara paralel dengan generator PLTD melalui *Bidirectional inverter* tiga fase. Pemanfaatan energi surya di Sulawesi Selatan juga dilakukan pada daerah Tanakeke dengan PLTS Pulau Balang Lompo berkapasitas 200 kW [3], Kabupaten Kepulauan Selayar dengan 7 unit PLTS Terpusat dengan total kapasitas 750 Kilowatt, dan Kabupaten Sinjai 4 unit PLTMH dan 1 unit PLTS Terpusat dengan total kapasitas 388 Kilowatt.

Umumnya PV array pada PLTS dioperasikan secara sinkron dengan grid/jaringan listrik PLN atau dengan generator diesel. Agar PV array dapat terkoneksi dengan jaringan listrik PLN maka diperlukan inverter khusus yang biasa disebut sebagai *grid tie inverter*. Kajian tentang PV array terkoneksi ke grid telah banyak diteliti oleh para peneliti [4, 5]. Struktur inverter PV yang terkoneksi dengan jaringan terdiri dari PWM modulator yang berisi komponen IGBT (*Insulated gate Bipolar transistor*), pengontrol MPPT (*Maximum Power Point Tracker*) dengan algoritma PO (*Perturb & Observe*), konverter DC-DC (*Buck-Boost converter*) dan *Phase-locked loop* (PLL). Bagian PLL adalah bagian penting pada proses sinkronisasi PV array dengan grid. Apabila bagian PLL bekerja dengan baik maka pengalihan daya dari PV array ke grid dapat berlangsung dengan baik. PLL pada inverter PV dilengkapi pengontrol PID (Proporsional, Integral dan derivatif). Karena PLL merupakan bagian penting dari inverter PV agar transfer daya dari PV array ke grid dapat optimal maka banyak peneliti mengembangkan kajian tentang algoritma pada pengontrol PID, diantaranya adalah metode regulasi berbasis algoritma *Aquila optimizer* (AO) untuk mengurangi fluktuasi daya keluaran PV dan peningkatan kestabilan sistem [6]. Peneliti yang lain mengusulkan PLL adaptif pada inverter PV untuk sinkronisasi PV array dengan grid, keseimbangan beban dan reduksi harmonis [7].

Berdasarkan uraian sebelumnya bahwa pengontrol PID *Phase-locked loop* yang merupakan bagian dari kontrol inverter PV memainkan peranan penting agar transfer daya optimal dari PV array ke grid. Oleh sebab itu pada makalah ini akan diuraikan penalaan (*tuning*) pengontrol PID *Phase -locked loop* inverter PV menggunakan metode sensitivitas *ultimate* Ziegler-Nichols. Model simulasi menggunakan model Simulink Matlab PV

array 250 kW-terhubung ke grid. Simulasi dijalankan pada Matlab R2019a menggunakan PC dengan prosesor i7 4790-Ram 4 GB.

II. METODE

Pemodelan Fotovoltai Array

Fotovoltai array (*photovoltaic array*) yang digunakan pada simulasi ini dibangun dari 88 rangkaian (*string*) paralel, dimana setiap *string* terdiri dari 7 modul fotovoltai/modul surya. Modul surya yang digunakan adalah tipe SunPower SPR-415E-WHT-D.

Persamaan tegangan keluaran sel surya dinyatakan dengan persamaan (1)

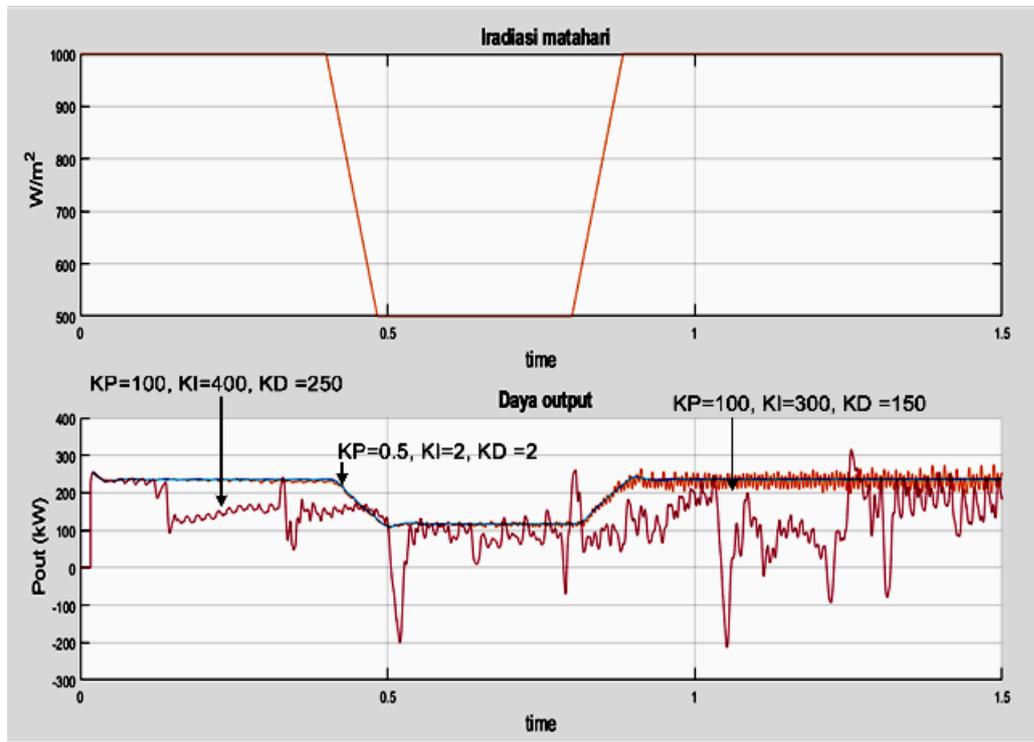
$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{(V+I R_s)/(N V_t)} - 1 \right) - I_{s2} \left(e^{(V+I R_s)/(N_2 V_t)} - 1 \right) - (V + I R_s)/R_p \quad (1)$$

dimana V adalah tegangan pada terminal sel surya. N dan N₂ masing- masing adalah faktor kualitas (koefisien emisi diode) diode pertama dan kedua. I_{ph} adalah arus induksi matahari, I_s dan I_{s2} masing- masing adalah arus saturasi diode pertama dan kedua, dan V_t adalah tegangan panas/termal.

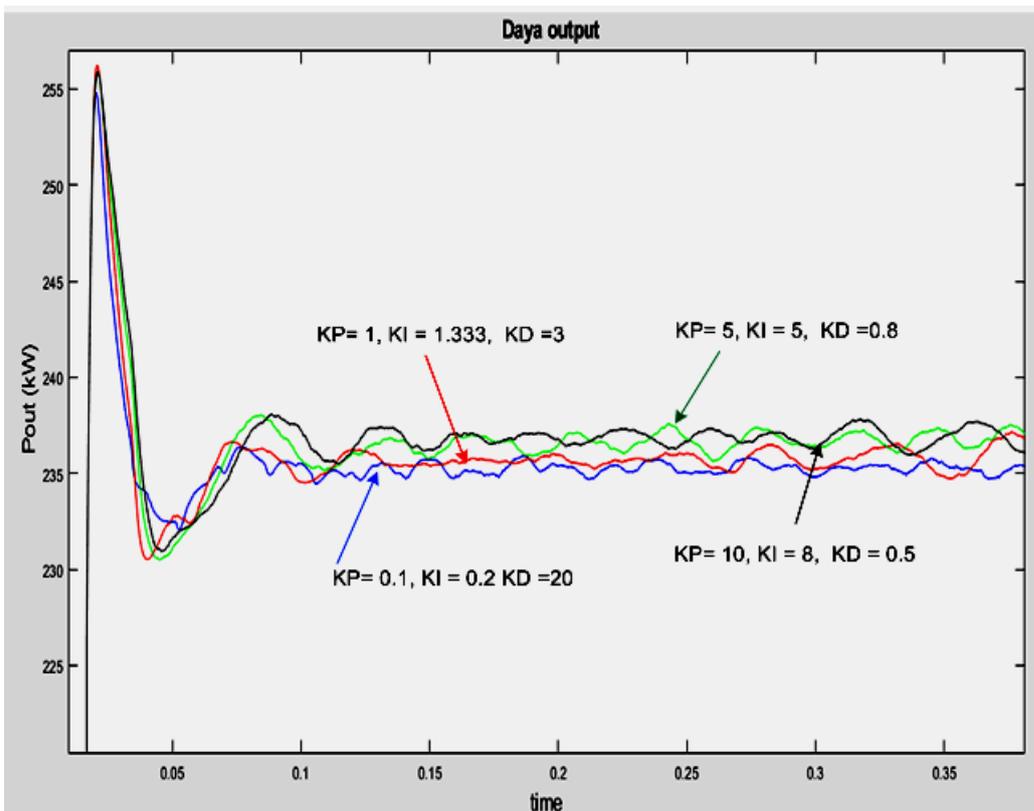
Pemodelan Grid Tie Inverter

Grid tie inverter tiga fase diterapkan untuk koneksi PV array dengan jaringan listrik. Karena umumnya inverter dilengkapi dengan pengontrol MPPT untuk mengatur tegangan operasi PV array oleh sebab itu diperlukan konverter DC-DC (*Buck-Boost Converter*), dan keluaran tegangan konverter DC-DC menjadi masukan untuk inverter. Persamaan yang menghubungkan tegangan keluaran inverter dengan tegangan grid dinyatakan dengan persamaan (2)

$$\begin{aligned} V_a &= R_a I_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_a \\ V_b &= R_b I_b + L_b \frac{di_b}{dt} + e_b \\ V_c &= R_c I_c + L_c \frac{di_c}{dt} + e_c \end{aligned} \quad (2)$$



Gambar 4 Daya keluaran inverter ke grid untuk berbagai nilai K_p , K_I dan K_D



Gambar 5 Daya keluaran inverter ke grid untuk berbagai nilai K_p , K_I dan K_D dengan metode sensitivitas *ultimate* Ziegler-Nichols

Tegangan keluaran inverter (V_a, V_b, V_c) serta tegangan dan arus grid ($e_a, e_b, e_c, i_a, i_b, i_c$) yang dinyatakan dalam sistem tiga fase dalam kerangka referensi abc, selanjutnya semuanya diubah menjadi komponen sumbu langsung d (*direct*), dan sumbu kuadratur q (*qudrature*) dalam sistem dua sumbu dalam kerangka mesin yang berputar sinkron dengan transformasi Park, dan hasilnya dituliskan sesuai persamaan (3)

$$\begin{aligned} V_d &= e_d + R i_d + L \frac{di_d}{dt} + \omega_s L i_q \\ V_q &= e_q + R i_q + L \frac{di_q}{dt} - \omega_s L i_d \\ \omega_s &= 2 \pi f_s \end{aligned} \quad (3)$$

dimana V_d, V_q, e_d, e_q, i_d dan i_q masing-masing adalah tegangan inverter dan grid pada sumbu d dan q , dan arus grid pada sumbu langsung dan kuadratur. R dan L didefinisikan sebagai resistansi dan induktansi ekuivalen dari grid, dan f_s adalah frekuensi tegangan jala-jala.

Penyaluran daya dari inverter ke grid mengikuti prinsip keseimbangan daya. Dengan mengabaikan rugi daya pada sakelar, keseimbangan daya dinyatakan dengan persamaan (4)

$$V_{dc} I_{dc} = e_d i_d + e_q i_q \quad (4)$$

dimana V_{dc}, I_{dc} masing-masing adalah tegangan dan arus yang masuk ke inverter yang terhubung ke grid, dimana tegangan dan arus DC tersebut bersumber dari konverter DC-DC yang nilai tegangan keluarannya dikontrol oleh pengontrol MPPT. Terdapat sambungan kapasitor (*DC link*) antara konverter DC-DC dengan inverter. Persamaan dinamis dari *DC link* dinyatakan dengan persamaan (5)

$$C = \frac{dV_{dc}}{dt} = I_{dc0} - I_{dc} = I_{dc0} - \frac{e_d i_d + e_q i_q}{V_{dc}} \quad (5)$$

Pada simulasi nilai kapasitor yang digunakan sebesar 0.0271 F

Pemodelan PLL

Arus dan tegangan jala-jala pada sistem tiga fase memiliki perbedaan fase satu terhadap lainnya sebesar 120° atau $\frac{2\pi}{3}$ radian. Secara umum tegangan tiap fase pada sistem tiga fase dapat dituliskan sebagai

$$\begin{aligned} V_{as} &= V_{max} \sin(\omega_s t) \\ V_{bs} &= V_{max} \sin(\omega_s t - \frac{2}{3}\pi) \\ V_{cs} &= V_{max} \sin(\omega_s t + \frac{2}{3}\pi) \end{aligned} \quad (6)$$

Pada PLL, komponen pada sistem tiga fase dengan kerangka referensi abc diubah menjadi komponen $\alpha\beta 0$ dalam kerangka stasioner dengan menggunakan transformasi Clark, dan selanjutnya komponen $\alpha\beta 0$ diubah menjadi komponen $dq0$ dengan menggunakan transformasi Park.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ 0 \end{bmatrix} &= \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \\ &= V_{max} \begin{bmatrix} \sin(\omega_s t) \\ -\cos(\omega_s t) \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ 0 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos(\omega_{vco} t) & \sin(\omega_{vco} t) & 0 \\ -\sin(\omega_{vco} t) & \cos(\omega_{vco} t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= V_{max} \begin{bmatrix} \cos(\omega_s t + \omega_{vco} t) \\ \sin(\omega_s t - \omega_{vco} t) \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

dimana ω_s, ω_{vco} adalah frekuensi sudut grid dan VCO (*Voltage-Controlled Oscillator*). Komponen α, β adalah komponen sistem dua fase pada sumbu alfa dan beta dalam kerangka referensi stasioner, dan 0 adalah komponen 0 dalam kerangka referensi stasioner. Komponen a, b dan c adalah komponen sistem tiga fase dalam kerangka referensi abc, dan d, q adalah komponen sumbu langsung (*direct*) dan sumbu kuadratur (*qudrature*) dalam sistem dua sumbu dalam kerangka yang berputar.

Apabila ω_s sama dengan ω_{vco} maka berdasarkan persamaan (8), tegangan V_q sama dengan nol dan hal ini berarti masukan untuk pengontrol juga sama dengan nol. Dalam kondisi ω_s sama dengan ω_{vco} maka PLL mulai mengunci frekuensi untuk sinkronisasi tegangan inverter dengan grid.

Penalaan Pengontrol PID

Secara matematis keluaran pengontrol PID dinyatakan dengan persamaan berikut

$$\begin{aligned} y_{PID} &= K_p e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{d(e(t))}{dt} \\ &= K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{d(e(t))}{dt} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

dimana K_p, K_I dan K_D masing-masing adalah elemen gain proporsional, integral dan derivatif. T_I, T_D dan $e(t)$ masing-masing adalah waktu aksi integral (s), waktu aksi derivatif (s) dan sinyal kesalahan. Terdapat beberapa metode untuk penyesetan elemen gain pengontrol, metode tersebut antara lain adalah penalaan dengan rasio peluruhan 0.25 dan metode sensitivitas *ultimate* [10]. Kedua metode yang baru disebutkan dikemukakan oleh Ziegler dan Nichols. Pada metode sensitivitas *ultimate*, hal pertama kali ditentukan adalah gain *ultimate* (K_u) dan periode *ultimate* (P_u). Apabila kedua parameter yang disebutkan diketahui maka elemen gain lainnya dapat ditentukan.

Berdasarkan persamaan (9) dan tabel 1, diperoleh hubungan antar elemen gain pada pengontrol PID, yaitu

$$\begin{aligned} T_I &= \frac{T_D}{4} \\ K_I &= K_p / T_I \\ K_D &= T_D / K_p \end{aligned} \quad (10)$$

Diagram Simulasi

Diagram simulasi diperlihatkan pada gambar 3.

Tabel 1 Penalaan pengontrol PID dengan metode sensitivitas *ultimate*

Tipe Pengontrol	Optimum Gain
P	$K_p = 0.5 K_u$
PI	$K_p = 0.45 K_u$
PID	$T_i = \frac{P_u}{1.2}$
	$K_p = 1.6 K_u$
	$T_i = 0.5 P_u$
	$T_D = 0.125 P_u$

Tabel 2 Nilai lonjakan (*overshoot*), maksimum dan minimum daya keluaran inverter untuk berbagai nilai gain pengontrol PID pada PLL

Lonjakan (kW) $t = 0 - 0.1$ s	$t \geq 0.1$ s			Gain [$K_p K_i K_D$]
	Maksimum (kW)	Minimum (kW)	Tengah (kW)	
256.11	236.8	234.35	235.58	0.5, 2, 2
254.8	235.9	234.46	235.18	0.1, 0.2, 20
256.23	237.16	234.47	235.81	1, 1.3333, 3
255.91	237.57	235.13	236.35	5, 5, 0.8
255.83	237.81	235.49	236.65	10, 8, 0.5

Sebagaimana yang diuraikan pada bagian terdahulu, dalam simulai digunakan modul surya tipe SunPower SPR-415E-WHT-D dimana setiap rangkaian (*string*) terdiri dari 7 modul tersusun seri. PV array dibentuk dari 88 *string* yang tersusun paralel. Daya total PV array pada kondisi iradiasi matahari 1000 W/m² pada temperatur 25°C adalah \cong 256 kW. Dalam simulasi digunakan temperatur kerja modul surya 45°C sehingga daya keluaran PV array terkoreksi menjadi dibawah 256 kW.

Sebagaimana diperlihatkan pada diagram simulasi, tegangan keluaran PV array dihubungkan ke inverter tiga fase melalui *dc link* kapasitor, selanjutnya keluaran inverter dihubungkan dengan filter (R, L, C), dan keluaran filter terhubung ke sisi tegangan rendah transformator tiga fase Y-Δ. Sisi Y transformator terhubung ke inverter dengan tegangan \cong 250 V(fase ke netral) sementara sisi Δ transformator terhubung ke penyulang 25 kV. Agar penyaluran daya PV array ke jaringan dapat berlangsung maka diperlukan proses sinkronisasi antara tegangan keluaran inverter dengan tegangan jala-jala/grid. Proses sinkronisasi tegangan inverter dengan tegangan jala-jala dilakukan oleh bagian yang disebut PLL (*Phase-Locked Loop*), PLL adalah bagian dari kontrol inverter. Dalam PLL terdapat pengontrol PID, dan gain pengontrol akan mempengaruhi transfer daya dari PV array ke grid.

Pada gambar 4 diperlihatkan hasil simulasi pengaruh gain pengontrol PID (Proporsional, Integral dan derivatif) pada PLL terhadap keluaran daya PV array ke jaringan/grid

untuk kondisi penyinaran matahari pada modul surya bervariasi dari 1000 W/m² selama waktu 0 sampai 0,4 detik, 500 W/m² dari waktu 0,4 sampai 0,8 detik dan 1000 W/m² untuk waktu sesudahnya. Apabila gain pengontrol di set dengan konstanta $K_p = 100$, konstanta integral $K_i = 400$ dan konstanta derivatif $K_D = 250$ maka terlihat pada gambar 4, bahwa daya keluaran PV array yang disalurkan ke grid melalui inverter sangat berfluktuasi meskipun iradiasi matahari tetap. Untuk kasus gain pengontrol PID di set pada nilai $K_p = 100$, $K_i = 300$ dan $K_D = 150$, berdasarkan gambar 4, daya keluaran inverter masih berfluktuasi untuk waktu 0,8 detik dan seterusnya. Untuk kasus gain pengontrol PID di set pada nilai $K_p = 0.5$, $K_i = 2$ dan $K_D = 2$, berdasarkan gambar 4, terlihat bahwa daya keluaran inverter mulai stabil.

Pada tabel 2, dicantumkan nilai penalaan (*tuning*) gain pengontrol PID pada PLL yang mengadopsi metode sensitivitas *ultimate* Ziegler-Nichols

Pada gambar 5, diperlihatkan transfer daya PV array ke grid pada kondisi iradiasi matahari sebesar 1000 W/m² untuk nilai gain proporsional, integral dan derivatif pengontrol PID yang tercantum dalam tabel 2. Terlihat pada gambar 5, dengan pemilihan gain pengontrol yang tepat maka transfer daya PV array ke grid stabil.

III. KESIMPULAN

Pada makalah ini telah dipresentasikan pengaruh nilai gain pengontrol PID *Phase-Locked Loop* inverter PV. Berdasarkan hasil simulasi, Apabila gain pengontrol di set dengan konstanta $K_p = 100$, konstanta integral $K_i = 400$ dan konstanta derivatif $K_D = 250$ maka daya keluaran PV array yang disalurkan ke grid melalui inverter sangat berfluktuasi meskipun kondisi iradiasi matahari yang jatuh ke permukaan modul surya tetap. Hal yang sama terjadi jika gain pengontrol PID di set pada nilai $K_p = 100$, $K_i = 300$ dan $K_D = 150$. Untuk kasus gain pengontrol PID di set pada nilai $K_p = 0.5$, $K_i = 2$ dan $K_D = 2$, terlihat bahwa daya keluaran inverter stabil. Berdasarkan hasil pengujian lima penalaan gain pengontrol PID *Phase-Locked Loop* inverter PV menggunakan metode sensitivitas *ultimate* Ziegler-Nichols, hasilnya semuanya sukses, yaitu bahwa transfer daya dari PV array ke grid berlangsung dengan baik.

REFERENSI

- [1] Tim Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional, "Indonesia Energy Outlook 2019," 2019, [Daring]. Tersedia pada: <https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-outlookenergi-indonesia-2019-bahasa-indonesia.pdf>.
- [2] Hafid, Abdul. "Estimasi Parameter Modul Surya 190 Wp Menggunakan Metode Newton Raphson." CYCLOTRON 4.2 (2021).
- [3] Hafid, A. Abidin, Z. et al. (2017). Analisa Pembangkit Listrik Tenaga Surya Pulau Balang Lompo. *Jurnal Litek*, 14(1): 6-12.
- [4] http://ebtke.esdm.go.id/post/2018/05/09/1956/hadirnya_pembangkit_energi_terbarukan_di_sulsel_hasil_nyata_untuk_masyarakat (unduh 02-03-2021).
- [5] Cen, Zhaohui. "Modeling and simulation for an 8 kW three-phase grid-connected photo-voltaic power system." *Open Physics* 15.1 (2017): 603-612.
- [6] Sari, P.D. Kurniasi, N. & Yogiarto, A. (2018). Kajian Perencanaan PLTS Terhubung Ke Grid Untuk Melayani Suplai Daya Listrik Di Menara STT – PLN. *Jurnal Sutet*, 8(1): 13-20.

- [7] Guo, Zhengxun, et al. "Optimal PID Turning of PLL for PV Inverter based on Aquila Optimizer." *Frontiers in Energy Research* (2022): 852.
- [8] Chittora, Prakash, Alka Singh, and Madhusudan Singh. "Adaptive EPLL for improving power quality in three-phase three-wire grid-connected photovoltaic system." *IET Renewable Power Generation* 13.9 (2019): 1595-1602.
- [9] Joseph, Stephen Bassi, et al. "Metaheuristic algorithms for PID controller parameters tuning: Review, approaches and open problems." *Heliyon* (2022): e09399.
- [10] Franklin, Gene F., et al. *Feedback control of dynamic systems*. Vol. 4. Upper Saddle River: Prentice hall, 2002.
- [11] Omar, Moien A., and Marwan M. Mahmoud. "Grid connected PV-home systems in Palestine: A review on technical performance, effects and economic feasibility." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82 (2018): 2490-2497.
- [12] Pushpa, K. R., and R. S. Geetha. "Mathematical model and analysis of PV Converter-Inverter System." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 1187. No. 1. IOP Publishing, 2021.
- [13] Haq, Irsyad Nashirul, et al. "Simulasi Energi dan Keekonomian Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) untuk Fungsi Peak Load Shaving pada Bangunan di Lingkungan Kampus ITB." *Journal of Science and Applicative Technology* 5.1 (2021): 179-186.
- [14] Omar, Moien A., and Marwan M. Mahmoud. "Improvement Approach for Matching PV-array and Inverter of Grid Connected PV Systems Verified by a Case Study." *International Journal of Renewable Energy Development* 10.4 (2021).
- [15] Chaturvedi, Devendra K. *Modeling and simulation of systems using MATLAB® and Simulink®*. CRC press, 2017.
- [16] Rahim, Nasrudin Abd, Hew Wooi Ping, and Jeyraj Selvaraj. "Photovoltaic module modeling using Simulink/Matlab." *Procedia Environmental Sciences* 17 (2013): 537-546.
- [17] Golnaraghi, Farid, and Benjamin C. Kuo. *Automatic control systems*. McGraw-Hill Education, 2017.