



Perancangan Konverter Sepic untuk Pengisian Baterai dengan Menggunakan Panel Surya

Rachma Prilian Eviningsih¹, Arief Rahmadani², Aditya Riska Kinasih³, Rizqa Arvioneta⁴

^{1,2,3,4}Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Teknik Elektro Industri, email: rahmadaniarif354@gmail.com

Abstrak

Produksi listrik yang dihasilkan oleh panel surya tidak stabil karena adanya variasi intensitas sinar matahari yang disebabkan oleh fluktuasi kondisi cuaca yang berbeda, sehingga menyebabkan baterai tidak dalam kondisi pengisian. Untuk memastikan tegangan keluaran bernilai konstan, maka pada penelitian ini dikembangkan metode kontrol proposional-integral (PI) untuk mengatur duty cycle pada konverter sepic dari panel surya. Pemodelan pada pengontrol PI melibatkan penentuan penguatan P dan I dengan metode analitik, agar diperoleh karakteristik sistem yang optimal. Pengujian kontrol PI dihasilkan nilai K_p sebesar 4.19 dan nilai K_i sebesar 41.9. Hasil yang didapat yaitu, pada saat pengujian sistem loop tertutup dengan kondisi panel surya sebesar $1000\text{W}/\text{m}^2$ dan suhu 25°C . Nilai tegangan keluaran mencapai nilai set point 14 V dengan waktu respon 0.056 s.

Kata kunci—Konverter Sepic, Panel Surya, Pengisian Baterai, Kontrol PI

Abstract

The electricity production generated by solar panels is not stable due to variations in the intensity of sunlight caused by fluctuating weather conditions, which results in the battery not being fully charged. To ensure a constant output voltage, a proportional–integral (PI) controller method was developed in this study to regulate the duty cycle of the Sepic converter from the solar panel. The modeling of the PI controller involved determining the P and I gains using analytical methods to obtain optimal system characteristics. The PI controller testing resulted in a K_p value of 4.19 and a K_i value of 41.9. The results showed that during closed-loop system testing with solar panel conditions of $1000\text{W}/\text{m}^2$ and a temperature of 25°C , the output voltage reached the set point value of 14 V with a settling time of 0.056 s.

Keywords : Konverter Sepic , Solar Panel, Battery Charging, PI Controller

1. Pendahuluan

Kelemahan energi matahari adalah energi yang dihasilkan hanya dari radiasi matahari, sehingga pada malam hari energi matahari tidak dibangkitkan, oleh karena itu diperlukan baterai untuk menyimpan energi yang dihasilkan selama proses penyinaran [1]. Baterai digunakan sebagai sumber daya dikarenakan baterai sendiri dapat menyimpan energi listrik sesuai dengan kapasitasnya. Pada saat baterai bekerja, maka akan terjadi siklus charging dan discharging selama masa penggunaan baterai tersebut [2]. Salah satu cara untuk menghasilkan listrik adalah dengan

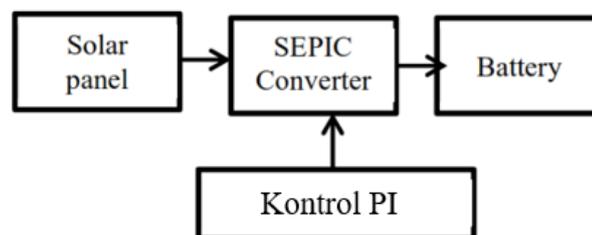
memanfaatkan energi dari sinar matahari melalui panel surya. Proses ini dilakukan dengan mengubah radiasi sinar matahari menjadi arus listrik searah (DC) dengan menggunakan bahan semikonduktor [3]. Intensitas sinar matahari yang tidak menentu akibat perubahan cuaca, seringkali membuat daya yang dihasilkan oleh panel surya menjadi tidak stabil, sehingga menyebabkan kerusakan pada baterai. Perubahan tegangan yang tidak konstan akan menghambat proses pengisian baterai untuk berjalan dengan baik. Pada saat tegangan pengisian maksimum aktif, maka proses pengisian yang optimal akan bekerja dan mencegah kerusakan pada baterai [4] [5].

Konverter DC-DC adalah salah satu perangkat elektronik umum yang digunakan untuk memberikan tegangan keluaran yang diperlukan dengan menerapkan PWM (Pulse Width Modulation) [6]. Ada banyak jenis konverter DC-DC seperti Buck [7], Boost [8], Buck-Boost [9], Zeta [10][11], Cuk [12] dan Sepic [13]. Untuk menghasilkan variasi nilai tegangan keluaran yang stabil, maka digunakan algoritma kontrol PI untuk mengatur *duty cycle* pada konverter Sepic. konverter Sepic dapat mengubah tegangan DC ke DC lebih besar atau lebih kecil dari tegangan input tanpa membalikkan polaritas [6]. Konverter Sepic dengan menggunakan kontrol PI menghilangkan rise tim, menghasilkan nilai error *steady state* berkurang menjadi 0 dan nilai waktu respon/*settling time* menjadi lebih singkat [14]. Dengan menggabungkan pengontrol P dan I menjadi pengontrol proporsional plus integral dalam mode paralel, kelebihan dan kekurangan masing-masing pengontrol dapat saling menutupi. Elemen pengontrol P dan I memiliki tujuan yang berbeda, yaitu mempercepat respon sistem dan menghilangkan offset. Pada penelitian ini dirancang suatu sistem pengisian baterai menggunakan rangkaian konverter Sepic dengan metode kontrol PI yang bertujuan untuk menghasilkan nilai tegangan keluaran secara konstan [13].

2. Metode Penelitian

2.1 Blok Diagram Sistem

Desain implementasi konverter Sepic untuk pengisian baterai pada penelitian ini dapat ditunjukkan pada Gambar 1.

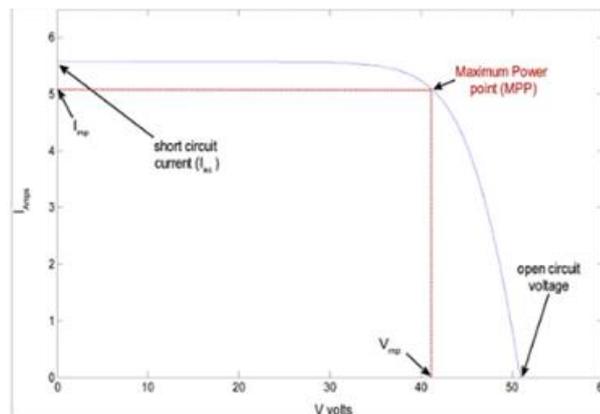


Gambar 1. Diagram Blok Sistem

Pada blok diagram sistem Gambar 1 dijelaskan bahwa konverter Sepic diberi tegangan input dari panel surya yang akan digunakan untuk pengisian baterai. konverter Sepic didesain dengan algoritma kontrol PI untuk mengatur *duty cycle* sehingga konverter Sepic akan menyesuaikan tegangan / kapasitas baterai pada saat tertentu. Nilai tegangan keluaran menjadi 14 V yang mana merupakan tegangan maksimal charging dari baterai lead acid yaitu 120 % dari 12V, 16 Ah. Selanjutnya konverter menjaga tegangan keluaran sebagai *discharging* pada baterai. Untuk metode charging baterai menggunakan metode CV (*Constant Voltage*) yaitu mengisi baterai dengan tegangan konstan sampai kapasitas baterai penuh, sedangkan untuk arusnya semakin turun [15].

2.2 Sistem Solar Panel

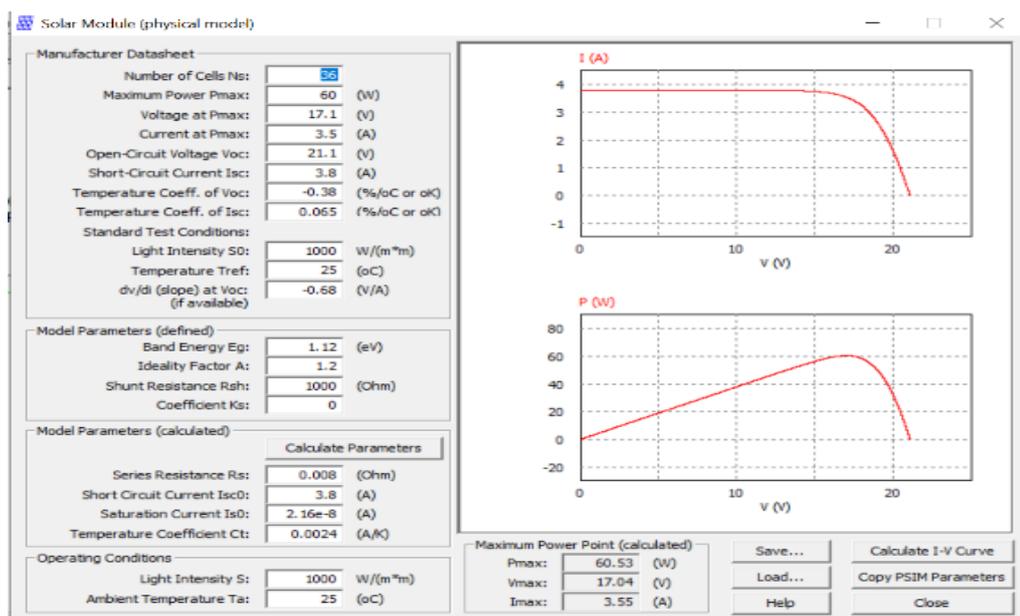
Energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya saat terkena cahaya matahari berasal dari kemampuan panel surya untuk menghasilkan tegangan saat beban diaplikasikan pada panel surya, dan arus mengalir melalui beban pada saat yang bersamaan. Kemampuan ini dijelaskan dalam kurva I-V (arus-tegangan) yang ditunjukkan pada Gambar 2 [16].



Gambar 2. Grafik Karakteristik Panel Surya

Penjelasan dari karakteristik panel surya pada kurva I-V adalah sebagai berikut :

- Titik operasi yang menghasilkan *output* maksimum dari panel surya dalam kondisi operasional dikenal sebagai *Maximum Power Point* (V_{mp} dan I_{mp}). Artinya, V_{mp} dan I_{mp} dapat diukur ketika panel surya diberi beban.
- Open Circuit Voltage* (V_{oc}) merupakan nilai tegangan maksimum yang dapat dicapai oleh panel surya ketika tidak ada arus listrik (*current*) yang mengalir.
- Short Circuit Current* (I_{sc}) merupakan nilai arus maksimum yang dapat dihasilkan oleh panel surya ketika kondisi *short circuit* terjadi, yaitu ketika tidak ada beban atau resistansi yang terhubung pada panel surya.

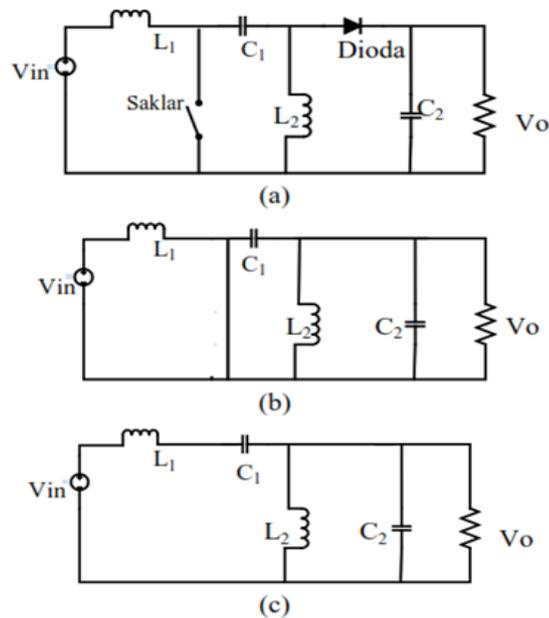


Gambar 3. Parameter Panel Surya

Tabel 1 memuat informasi mengenai parameter dari panel surya dengan daya puncak 60 W. Nilai tegangan maksimal dari panel surya mencapai 17.1 V, sehingga konverter Sepic dapat digunakan untuk menurunkan tegangan menjadi sekitar 14 V agar sesuai dengan kebutuhan pengisian baterai 12 V. Panel surya dapat bekerja secara optimal pada suhu sel panel surya normal pada 25°C dan nilai iradiasi yang mengenai permukaan panel surya sekitar 1000 W/m² akan menghasilkan daya yang maksimum.

2.3 Desain Konverter Sepic

SEPIC (*Single-Ended Primary Inductance Converter*) merupakan jenis konverter DC-DC yang mampu menaikkan dan menurunkan tegangan dari tegangan input dengan polaritas yang sama antara tegangan input dan keluaran. Konverter ini dapat bekerja baik pada kondisi *continuous* maupun *discontinuous*. Konverter ini mirip dengan konverter Buck-Boost. Keuntungan menggunakan konverter Sepic daripada menggunakan konverter Buck-Boost adalah polaritas *output* tidak terbalik, efisiensi konverter lebih tinggi, dan riak tegangan dan riak arus lebih baik dibandingkan konverter buck-boost [17]. Pada penelitian ini dirancang sistem konverter Sepic dengan tegangan keluaran 14 V. Konverter ini dapat menghasilkan tegangan keluaran yang dapat lebih besar atau lebih kecil dari tegangan input tetapi tanpa membalikkan polaritas. Pada Gambar 4 (a) merupakan rangkaian konverter Sepic.



Gambar 4. (a) Rangkaian Sepic; (b) Rangkaian Sepic saat Saklar Tertutup; (c) Rangkaian Sepic saat Saklar Terbuka

Kirchoff's Voltage Law (KVL) pada jalur V_s , V_{L1} , V_{C1} , L_1 , C_1 , dan L_2

$$-V_s + V_{L1} + V_{C1} - V_{L2} = 0 \quad (4)$$

Saat saklar tertutup, dioda akan off dan rangkaian ditunjukkan pada Gambar 4 (b) Tegangan yang melintang L_1 untuk interval DT adalah

$$-V_{L1} = V_s \quad (5)$$

Saat saklar terbuka, dioda akan on dan rangkaian ditunjukkan pada Gambar 4 (c) KVL pada jalur terluar adalah

$$-V_s + V_{L1} + V_{C1} - V_o = 0 \quad (6)$$

Untuk interval $(1-D)T$. Karena rata-rata tegangan induktor adalah nol untuk operasi periodik (*steady state operation*), maka persamaannya yaitu

$$V_{L1} = V_s \text{ dan } V_{L1} = -V_o \quad (6)$$

Dimana D adalah *duty cycle* rasio dari switch, yaitu

$$V_o = V_s \left(\frac{D}{D-1} \right) \quad (7)$$

Mencari arus rata-rata induktor yang juga merupakan arus sumber,

$$I_{L1} = I_s = \frac{V_o I_o}{V_s} = \frac{V_o^2}{V_s R} \quad (8)$$

Dari Gambar 5 (c), tegangan maximum reverse bias dioda ketika diode off yaitu juga $V_s + V_o$. Bagian keluaran yang terdiri dari diode, C_2 , dan beban resistor adalah sama seperti boost converter, sehingga tegangan *ripple* keluaran adalah

$$\Delta V_o = \Delta V_{CS2} = \frac{V_o D}{R C_2 f} \quad (9)$$

Sehingga C_2 adalah,

$$C_2 = \frac{D}{R \left(\frac{\Delta V_o}{V_o} \right) f} \quad (10)$$

Variasi tegangan di C_1 ditentukan dari bentuk sirkuit dengan switch tertutup. Kapasitor arus I_{C1} adalah kebalikan dari I_{L2} . Yang sebelumnya telah ditentukan untuk memiliki nilai rata-rata dari I_o . Dari definisi kapasitansi dan mempertimbangkan magnitude of charge,

$$\Delta V_{C1} = \frac{\Delta Q C_1}{C} = \frac{I_o \Delta t}{C} = \frac{I_o DT}{C} \quad (11)$$

Mengganti I_o dengan V_o/R ,

$$\Delta V_{C1} = \frac{V_o D}{R C_1 f} \quad (12)$$

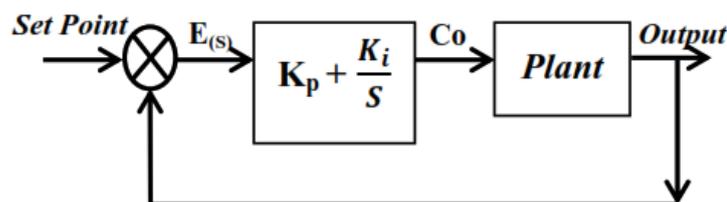
maka C_1 adalah,

$$C_1 = \frac{D}{R \left(\frac{\Delta V_{C1}}{V_o} \right) f} \quad (13)$$

Berdasarkan persamaan diatas, parameter yang dibutuhkan pada perencanaan konverter Sepic pada sistem ini yaitu, $V_{in} = 17 \text{ V}$; $I_{in} = 10 \text{ A}$; $V_{out} = 14 \text{ V}$; $I_{out} = 3.2 \text{ A}$; $f_s = 40 \text{ kHz}$; $R = 4.375 \text{ } \Omega$; $C_1 = 2117.64 \mu\text{F}$; $C_2 = 2571.42 \mu\text{F}$; $L_1 = 298.82 \mu\text{H}$ dan $L_2 = 298.82 \mu\text{H}$.

2.4 Kontrol PI Metode Analitik

Kontrol PI pada penelitian ini digunakan untuk menjaga kestabilan tegangan keluaran konverter Sepic saat charging sehingga tegangan pengisian stabil pada *setpoint* yang telah ditentukan. Untuk menghasilkan tegangan keluaran yang sesuai dengan *setpoint* maka nilai K_p dan K_i dengan cara mengamati keluaran respon tegangan konverter Sepic. Diagram kontrol PI ditunjukkan pada Gambar 5 berupa kontrol PI yang dapat digunakan untuk mempermudah memahami prinsip kerja diperlukannya kontrol dalam suatu sistem, sekaligus untuk mengetahui formula untuk mengetahui formula untuk merencanakan kontrol proposional-integral.



Gambar 5. Diagram Kontrol PI

Pemodelan pada pengontrol PI melibatkan penentuan penguatan P dan I agar diperoleh karakteristik sistem yang optimal. Terdapat beberapa metode untuk menentukan kontrol PI, antara lain umpan balik Ziegler-Nichols, manual (*handtuning / trial error*), metode analitik dengan optimasi, penempatan pole (*pole placement*), atau swatala (*autotuning*) [18]. Kontrol PI dengan pendekatan analitik direncanakan karena mampu menetapkan spesifikasi respon kinerja yang diharapkan. Dimana penentuan nilai K_p (konstanta proporsional) dan K_i (konstanta integral) bergantung pada nilai *time konstan* dan T_s (*settling time*). Untuk menghasilkan tegangan keluaran yang sesuai dengan *setpoint* maka nilai K_p dan K_i dengan cara mengamati keluaran respon tegangan konverter pada pengujian loop terbuka. Penentuan parameter kontrol yang sesuai dapat dilakukan dengan menetapkan spesifikasi desain yang diinginkan, seperti yang terlihat pada persamaan berikut :

$$T_s = 5\tau \quad (14)$$

$$\tau^* = \frac{\tau}{5} \quad (15)$$

$$K = \frac{Y_{ss}}{X_{ss}} \quad (16)$$

$$K_p = \frac{\tau i}{\tau^* K} \quad (17)$$

$$K_i = \frac{K_p}{\tau} \quad (18)$$

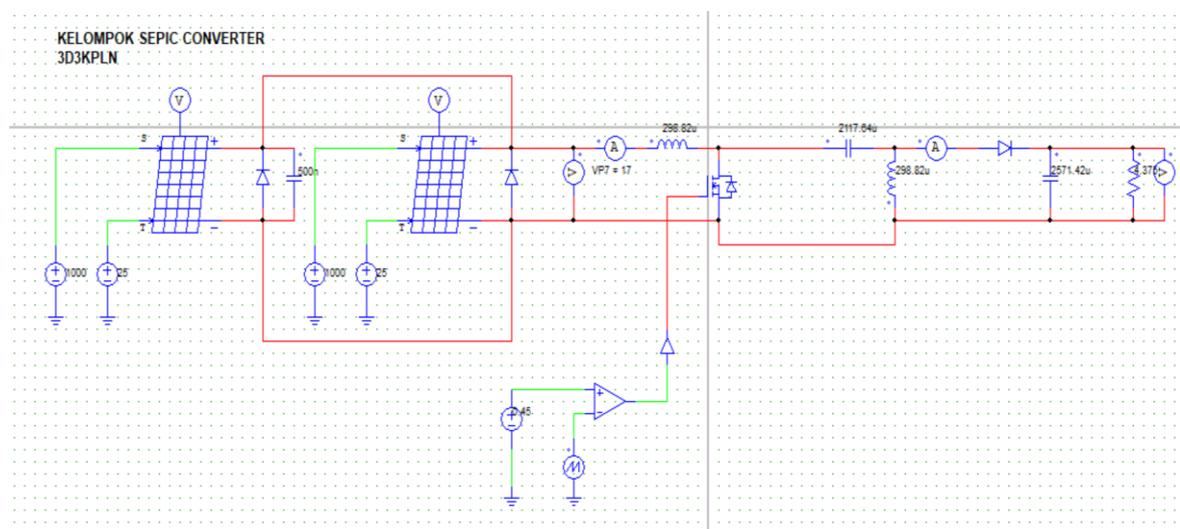
Pada sistem rangkaian konverter Sepic dengan kontrol PI ini, ditentukan spesifikasi desain *zero offset* dengan *settling time* yang bisa diubah-ubah dalam waktu *steady state* (T_s) = 0.05 s ; tegangan *steady state* (Y_{ss}) = 14.32 V dan tegangan masukan (X_{ss}) = 20.38 V, sehingga dihasilkan nilai *time konstan* (τ) = 0,1s ; *new time konstan* τ^* = 0.02 s dan nilai $K = 1.17$. Maka parameter konstanta proporsional dan integral didapatkan K_p sebesar 4.19 dan nilai K_i sebesar 41.9.

3. Hasil dan Pembahasan

Pada sub bab ini akan dijelaskan terkait hasil simulasi rangkaian konverter Sepic dan proses pengisian baterai secara sistem kontrol loop terbuka (*Open Loop Transfer Function*) dan kontrol loop tertutup (*Close Loop Transfer Function*) melalui software PSIM.

3.1 Pengujian Konverter Sepic Open Loop Transfer Function

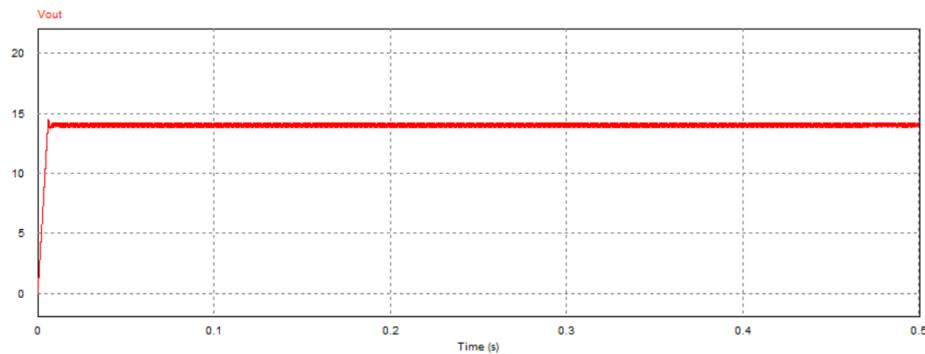
Pengujian *Open Loop Transfer Function* merupakan pengujian sistem loop terbuka tanpa menggunakan metode kontrol PI. Pada Gambar 6 merupakan rangkaian loop terbuka pada konverter Sepic.



Gambar 6. Rangkaian Simulasi Open Loop Konverter Sepic

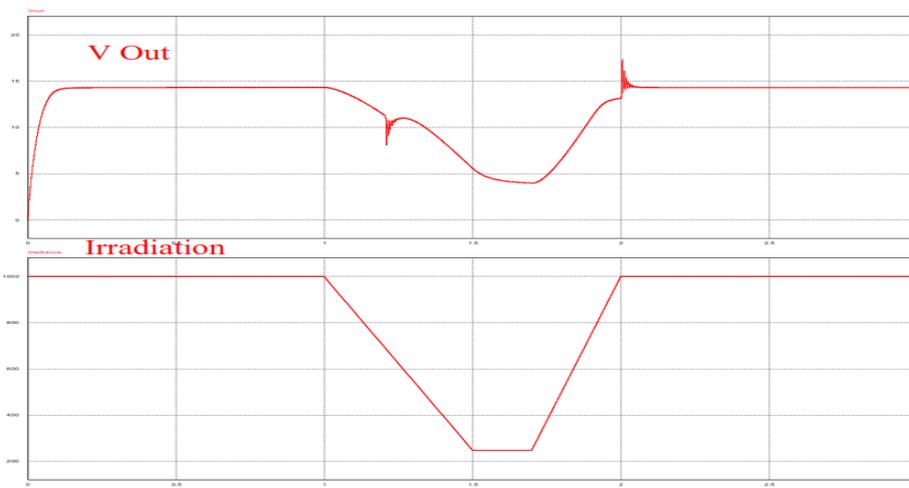
Setelah dilakukan simulasi rangkaian, hasil data simulasi dapat dilihat pada Tabel 1 dibawah :

Duty cycle (%)	Tegangan Masukan (V)	Arus Masukan (A)	Tegangan Keluaran (V)	Arus Keluaran (A)
20.00	21.11	1.22	5.29	1.46
25.00	21.60	1.32	7.02	2.03
30.00	20.97	1.52	8.90	2.5
35.00	20.85	1.89	11.2	3.39
40.00	20.66	2.51	13.77	4.12
45.00	20.38	3.42	14.32	5.43
50.00	19.96	4.89	19.99	6.54
55.00	19.31	6.89	23.59	8.57
60.00	18.14	9.65	27.21	9.93



Gambar 7. Gelombang Simulasi Open Loop Konverter Sepic

Pada Gambar 7 diatas merupakan bentuk gelombang simulasi konverter Sepic dengan sistem loop terbuka dan tegangan keluaran 14.32 V dengan pada saat *duty cycle* adalah 45%. Namun konverter dengan sistem loop terbuka belum bernilai sesuai dengan set point yaitu 14 V, terdapat ripple dan overshoot sebesar 14.88 V. Pada pengujian kedua dilakukan simulasi konverter Sepic dengan interferensi nilai Iradiasi pada panel surya. Gambar 9 dibawah menunjukkan grafik hasil simulasi Konverter Sepic dengan memberikan nilai iradiasi panel surya dalam sistem loop terbuka.

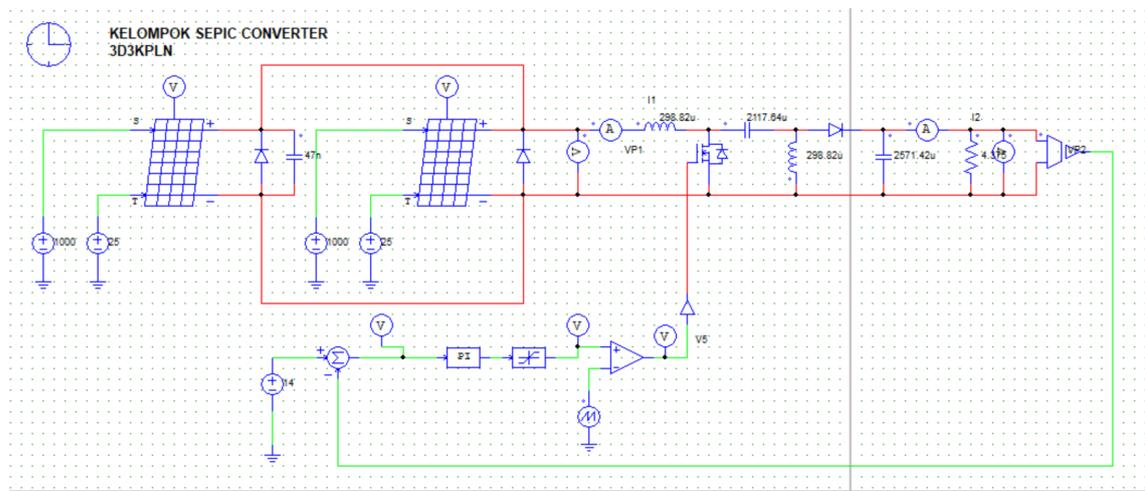


Gambar 8. Hasil Simulasi Interferensi Iradiasi Open Loop Konverter Sepic

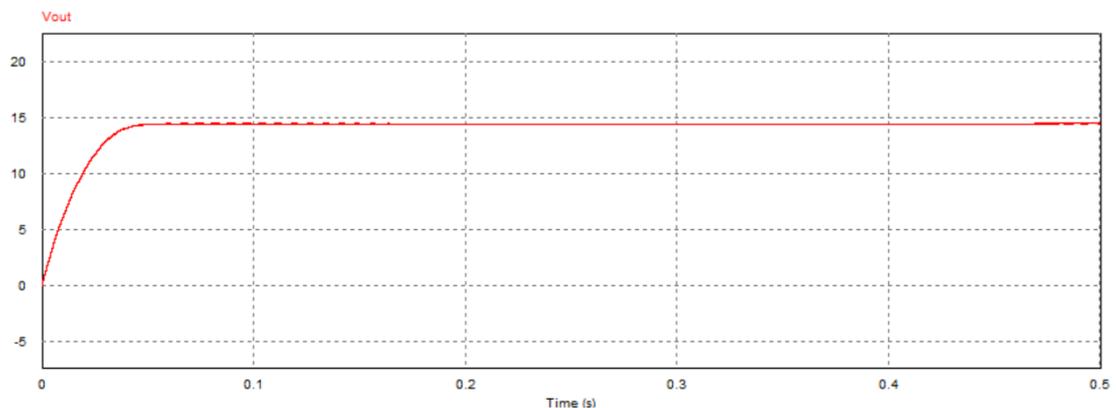
Hasil dari Gambar 8 diatas dapat dilihat tegangan keluaran sebesar 14,32 V namun mengalami penurunan sesaat dan terdapat *ripple*. Hal itu terjadi karena panel surya diberikan interferensi Iradiasi dengan nilai 250 W/m^2 .

3.2 Pengujian Konverter Sepic Close Loop Transfer Function

Setelah melakukan pengujian secara sistem loop terbuka, selanjutnya disimulasikan secara *Close Loop Transfer Function* dengan metode kontrol PI yang ditunjukkan pada Gambar 9. Pada sistem loop tertutup ini terdapat dua jenis pengujian yaitu *Standard Test Condition* (STC), yaitu pengujian kondisi pada saat panel surya 1000 W/m^2 dan 25° . dan pengujian panel surya dengan memberikan gangguan pada nilai penyinaran. Pada desain Konverter Sepic dengan sistem loop tertutup menggunakan dengan nilai K_p sebesar 4,19 dan K_i sebesar 41,9. Nilai set point yang diinginkan adalah 14 V.



Gambar 9. Rangkaian Simulasi Close Loop Konverter Sepic



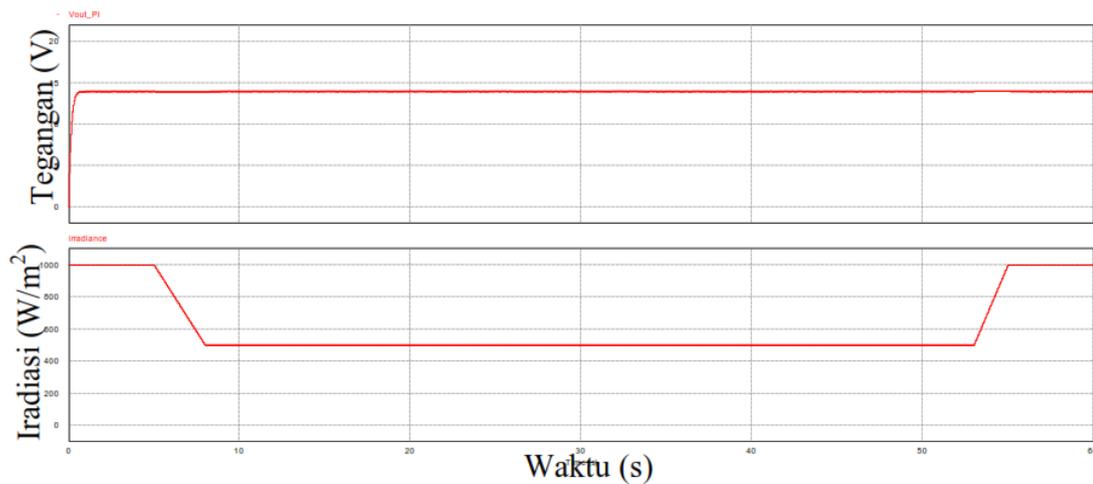
Gambar 10. Gelombang Simulasi Close Loop Konverter Sepic

Pada Gambar 10 menunjukkan bahwa hasil dari pengujian sistem loop tertutup yaitu nilai tegangan keluaran mencapai nilai *setpoint* dan *steady state* 14 V dengan *settling time* 0.056 s, tidak ada *ripple* serta tegangan keluaran stabil. Pada simulasi ini menggunakan 2 panel surya dengan nilai 100 WP. Bentuk gelombang tegangan keluaran (V_{out}) pada Gambar 10 diatas menunjukkan bahwa gelombang memiliki bentuk yang sempurna karena panel surya berada di kondisi STC (1000 W/m^2 dan 25°).

Pada pengujian kedua dilakukan simulasi konverter Sepic dengan interferensi nilai Iradiasi pada panel surya untuk menguji kontrol PI pada sistem. Nilai Iradiasi pada panel surya dalam sistem loop tertutup di atur dari nilai 300 W/m^2 hingga 550 W/m^2 dengan suhu tetap 25° . Setelah dilakukan simulasi, hasil data simulasi dapat dilihat pada Tabel 2:

Tabel 2. Hasil Pengujian Close Loop Konverter Sepic

Iradiasi	Tegangan		Arus	
	Masukan (V)	Masukan (A)	Tegangan Keluaran (V)	Arus Keluaran (A)
300	16.54	3.16	14	3.12
350	17.77	3.20	14	3.14
400	18.48	3.21	14	3.15
450	18.89	3.21	14	3.16
500	19.24	3.21	14	3.16
550	19.48	3.22	14	3.17

Gambar 11. Gelombang Simulasi Open Loop Konverter Sepic dengan Gangguan Nilai Iradiasi 550 W/m²

Pada Gambar 11 menunjukkan bahwa kontrol PI dengan metode analitik dapat menghasilkan tegangan keluaran sesuai dengan *setpoint* dan mencapai *steady state* pada waktu respon 0.056 s. Pada saat Iradiasi menurun menjadi 550 W/m² pada detik ke 5 s sampai 55 s. Tegangan keluaran tetap stabil sebesar 14 V. Ketika nilai Iradiasi menjadi 1000 W/m², nilai tegangan keluaran bernilai stabil sebesar 14 V. Selanjutnya nilai pengujian waktu respon/*settling time* menuju keadaan *steady state* pada penelitian ini, dibandingkan dengan penelitian sebelumnya berkaitan tentang kontrol PI dengan metode analitik dan *trial/error* pada rangkaian konverter Buck-Boost [9], serta kontrol PI dengan metode Ziegler-Nichols pada rangkaian konverter Sepic [14]. Hasil perbandingan nilai pengujian ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Close Loop Konverter Sepic

Konverter	Metode Kontrol PI	Nilai <i>Setpoint</i> (V)	<i>Settling Time</i> (s)
Konverter Sepic	Analitik	14	0.056
	Ziegler-Nichols	17.77	0.152
Konverter Buck-Boost	Analitik	57.6	1.138
	<i>Trial/Error</i>	57.6	0.399

Dari Tabel 3 dapat dilihat bahwa, rangkaian konverter Sepic dengan menggunakan metode analitik sebagai penentu nilai konstanta proposional-integral (PI), memiliki nilai *settling time* sebesar 0.056 s, yang mana lebih cepat untuk menuju kondisi *steady state* dibandingkan penelitian yang lain.

4. Kesimpulan

Setelah dilakukan simulasi pengujian konverter Sepic dengan sistem loop terbuka dan loop tertutup, menghasilkan bentuk gelombang tegangan keluaran yang berbeda. Pada sistem loop

terbuka dengan mengubah nilai *duty cycle*, ditunjukkan bahwa rangkaian konverter Sepic dapat menaik-turunkan nilai tegangan. Hasil simulasi tegangan keluaran pada *duty cycle* = 45 % tercapai nilai yang diinginkan yaitu sebesar 14.32 V, namun bentuk gelombang terdapat *ripple*, tidak stabil serta *overshoot*. Pada pengujian kedua yaitu memberi gangguan pada panel surya. Pada saat nilai Iradiasi turun, bentuk gelombang tegangan *output* tidak sempurna, karena muncul *ripple* serta tegangan turun sesaat hingga 5 V, namun pada dua detik berikutnya bentuk gelombang kembali ke bentuk normal. Selanjutnya pada saat pengujian sistem loop tertutup, pengujian pertama adalah panel surya dalam kondisi STC dengan nilai penyinaran 1000W/m^2 dan suhu 25° . Hasil dari pengujian sistem loop tertutup yaitu nilai tegangan keluaran mencapai nilai *setpoint* 14 V dengan *settling time* sebesar 0,056 s, tidak ada *ripple* dan tegangan keluaran stabil. Pada pengujian kedua memberikan gangguan pada panel surya, hingga nilai penyinaran turun. Hasil dari simulasi adalah tegangan keluaran bernilai sesuai dengan nilai *setpoint* yaitu 14 V. Rangkaian konverter Sepic dengan metode analitik memiliki nilai waktu respon/*settling time* lebih singkat dari pada penelitian sebelumnya.

Daftar Pustaka

- [1] S. Paul Ayeng'o, T. Schirmer, K.-P. Kairies, H. Axelsen, and D. Uwe Sauer, "Comparison of off-grid power supply systems using lead-acid and lithium-ion batteries," *Sol. Energy*, vol. 162, pp. 140–152, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.solener.2017.12.049.
- [2] A. Afandi, N. A. Windarko, B. Sumantri, and H. H. Fakhruddin, "Estimasi State of Charge (SoC) Ultrakapasitor menggunakan Extended Kalman Filter Berbasis Ladder Equivalent Circuit Model," *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 10, no. 1, p. 61, Jan. 2022, doi: 10.26760/elkomika.v10i1.61.
- [3] M. P. Paranthaman, W. Wong-Ng, and R. N. Bhattacharya, Eds., *Semiconductor Materials for Solar Photovoltaic Cells*, vol. 218. Cham: Springer International Publishing, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-20331-7.
- [4] A. Makkulau, S. Samsurizal, M. Fikri, and C. Christiono, "Pengaruh Intensitas Matahari Terhadap Karakteristik Sel Surya Jenis Polycrystalline Menggunakan Regresi Linear," *KILAT*, vol. 10, no. 1, pp. 69–76, Apr. 2021, doi: 10.33322/kilat.v10i1.994.
- [5] M. Z. Efendi, F. D. Murdianto, N. A. Windarko, R. E. Setiawan, R. H. Mubarok, and M. A. Dirmawan, "Performance Evaluation of MPPT using Modified PSO Algorithm for Battery Charge Application," in *2018 International Electronics Symposium on Engineering Technology and Applications (IES-ETA)*, Oct. 2018, pp. 1–5. doi: 10.1109/ELECSYM.2018.8615574.
- [6] A. T. Nugraha and R. P. Eviningsih, *Konsep Dasar Elektronika Daya*. Yogyakarta: Deepublish, 2022.
- [7] I. Sudiharto, M. I. Rahadyan, and O. A. Qudsi, "Design and Implementation of Buck Converter for Fast Charging with Fuzzy Logic," *JAREE (Journal Adv. Res. Electr. Eng.)*, vol. 5, no. 1, Apr. 2021, doi: 10.12962/jaree.v5i1.146.
- [8] V. Yusiana, "Perancangan Boost Konverter Sebagai Penguat Umpan Balik Charger Control Baterai Pada Panel Surya," *J. Civronlit Unbari*, vol. 3, no. 2, p. 98, Oct. 2018, doi: 10.33087/civronlit.v3i2.39.
- [9] Y. R. Payung, E. Purwanto, and F. D. Murdianto, "Rancang Bangun Buck-Boost Converter Pada Sistem Charging Baterai dengan Sumber Solar Cell Menggunakan Kontrol PI pada Uninterruptible Power Supply (UPS) Offline untuk Aplikasi Beban Rumah Tangga," *PoliGrid*, vol. 1, no. 2, p. 49, Nov. 2020, doi: 10.46964/poligrid.v1i2.435.

- [10] M. Z. Abdullah, I. Sudiharto, and R. P. Eviningsih, "Photovoltaic System MPPT using Fuzzy Logic Controller," in *2020 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication (iSemantic)*, Sep. 2020, pp. 378–383. doi: 10.1109/iSemantic50169.2020.9234200.
- [11] Mahmudatul Ula and Arief Rahmadani, "Rancang Bangun Maximum Power Point Tracking pada Panel Surya dengan Metode Incremental Conductance Menggunakan Zeta Konverter," *Techné J. Ilm. Elektrotek.*, vol. 22, no. 1, pp. 1–20, Apr. 2023, doi: 10.31358/techne.v22i1.334.
- [12] H. N. Shoumi, I. Sudiharto, and E. Sunarno, "Design of the CUK Converter with PI Controller for Battery Charging," in *2020 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication (iSemantic)*, Sep. 2020, pp. 403–407. doi: 10.1109/iSemantic50169.2020.9234294.
- [13] B. R. Putri, I. Sudiharto, I. Ferdiansyah, A. B. Karso, and D. S. Yanaratri, "Design SEPIC Converter for Battery Charging Using Solar Panel," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1844, no. 1, p. 012015, Mar. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1844/1/012015.
- [14] S. A. Zerlina *et al.*, "Pengembangan Kontroler PI Pada SEPIC Berbasis PSIM," *J. INOVTEK SERI ELEKTRO*, vol. 2, no. 3, pp. 168–174, 2020, doi: 10.35314/ise.v2i3.1445.
- [15] I. Irianto, R. P. Eviningsih, F. D. Murdianto, and A. Muhyidin, "Optimization Improvement Using Pi Controller to Reach CCCV Method in Lead Acid Battery Load," *Kinet. Game Technol. Inf. Syst. Comput. Network, Comput. Electron. Control*, Nov. 2022, doi: 10.22219/kinetik.v7i4.1496.
- [16] P. T. D. P. Putu, M. F. Zambak, Suwarno, and P. Harahap, "Analisa Radiasi Sinar Matahari Terhadap Panel Surya 50 WP," *RELE (Rekayasa Elektr. dan Energi) J. Tek. Elektro*, vol. 4, no. 1, pp. 48–54, 2021, [Online]. Available: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>
- [17] P. K. Maroti, S. Padmanaban, J. B. Holm-Nielsen, M. Sagar Bhaskar, M. Meraj, and A. Iqbal, "A New Structure of High Voltage Gain SEPIC Converter for Renewable Energy Applications," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 89857–89868, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2925564.
- [18] I. Irianto, S. Suhariningsih, and V. R. Dewanti, "Rancang Bangun Alat Pengereng Pelepah Pisang(Menggunakan Metode Controller Chien Regulator I dan Chien Servo I Sebagai Tuning Kontrol PI)," *JEEE-U (Journal Electr. Electron. Eng.)*, vol. 2, no. 1, pp. 1–7, Apr. 2018, doi: 10.21070/jeee-u.v2i1.1091.