

Desain *Bidirectional DC-DC Converter* untuk *Solar Charge Controller* dengan Kontrol PI

Choirul Anam Iskak

PT. Hisamitsu Pharma Indonesia
Jl. HR. Moch. Mangundiprojo, Buduran, Banjarkemantren, Kec. Buduran,
Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur 61252

Received: January 2026; Accepted: April 2026; Published: May 2026

DOI: 10.30649/je.v7i2.160

Abstrak

Keterbatasan sumber energi fosil yang sembarangan nyata mendorong peningkatan pemanfaatan energi terbarukan yang bersifat tidak stabil dan intermiten. Untuk menjaga kontinuitas pasokan energi listrik, sistem penyimpanan energi seperti baterai menjadi komponen penting. Namun, tegangan keluaran dari sumber atau penyimpan energi tidak selalu sesuai dengan tegangan yang dibutuhkan oleh beban. Oleh karena itu, diperlukan rangkaian elektronika daya berupa *Bidirectional DC-DC Converter* yang mampu mengatur aliran daya dua arah, yaitu dari sumber ke baterai (*charging*) dan dari baterai ke beban (*discharging*). Pada penelitian ini, dikembangkan sistem *Bidirectional DC-DC Converter* yang dilengkapi dengan pengendali *Proportional-Integral (PI)* guna mengatur besar tegangan output agar sesuai dengan tegangan set point. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem yang dirancang mampu menjaga tegangan output tetap stabil dan sesuai dengan nilai referensi, baik dalam kondisi perubahan beban maupun fluktuasi sumber daya. Sistem ini diharapkan dapat mendukung pengembangan jaringan listrik yang efisien, adaptif, dan berkelanjutan.

Kata Kunci: *Bidirectional DC-DC Converter, Energi Terbarukan, Kontrol PI, Charging, Discharging, Penyimpanan Energi*

Abstract

The increasingly apparent limitations of fossil energy sources are driving the increased use of unstable and intermittent renewable energy. To maintain the continuity of electrical energy supply, energy storage systems such as batteries are a crucial component. However, the output voltage from the energy source or storage does not always match the voltage required by the load. Therefore, a power electronic circuit in the form of a Bidirectional DC-DC Converter is needed that is capable of regulating the power flow in both directions, namely from the source to the battery (charging) and from the battery to the load (discharging). In this study, a Bidirectional DC-DC Converter system equipped with a Proportional-Integral (PI) controller was developed to regulate the output voltage to match the reference voltage (set point). Simulation results show that the designed system is able to maintain a stable output voltage and in accordance with the reference value, both under conditions of changing loads and resource storage. This system is expected to support the development of an efficient, adaptive, and sustainable electricity network.

Key words: *Bidirectional DC-DC Converter, Renewable Energy, PI Control, Charging, Discharging, Energy Storage*

I. PENDAHULUAN

Pertumbuhan kebutuhan energi global yang sembarangan tinggi seiring meningkatnya populasi dunia masih banyak bergantung pada sumber energi fosil. Ketersediaan energi fosil yang terbatas serta dampak negatif dari pembakarannya, seperti pencemaran udara dan peningkatan efek gas rumah kaca, menimbulkan ancaman krisis energi serta permasalahan lingkungan di masa depan. Hal ini mendorong pengembangan pemanfaatan energi terbarukan yang lebih bersih dan berkelanjutan.

Salah satu sumber energi terbarukan yang banyak dikembangkan adalah energi surya melalui sistem photovoltaic (PV). Energi surya tersedia melimpah dan ramah lingkungan, namun memiliki sifat intermiten karena sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca dan intensitas radiasi matahari. Untuk menjaga kontinuitas suplai listrik dari sistem PV, diperlukan sistem penyimpanan energi seperti baterai. Baterai berfungsi menampung kelebihan energi saat produksi listrik berlebih, sekaligus menyuplai daya ketika produksi PV tidak mencukupi.

Dalam praktiknya, tegangan DC yang dihasilkan oleh modul PV maupun baterai sering kali tidak sesuai dengan kebutuhan beban. Oleh karena itu, dibutuhkan konverter DC-DC bidirectional yang mampu mengatur aliran daya dua arah, yaitu dari PV menuju baterai (charging) dan dari baterai menuju beban (discharging). Penelitian yang dilakukan oleh Kuei-Hsiang Chao, Ming-Chang Tseng, Chun-Hao Huang, Yang-Guang Liu, dan Liang-Chiao Huang dalam jurnal “*Design and Implementation of a Bidirectional DC-DC Converter for Stand-Alone Photovoltaic Systems*” menegaskan pentingnya peran konverter ini dalam sistem PV mandiri [1]. Konverter bidirectional tidak hanya memungkinkan proses pengisian dan pengosongan baterai secara efisien, tetapi juga mendukung

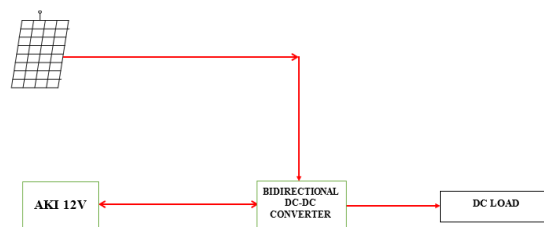
manajemen energi agar pasokan listrik tetap stabil meskipun terjadi fluktuasi sumber energi surya maupun variasi beban.

Untuk menjaga kestabilan tegangan keluaran konverter, dibutuhkan sistem pengendalian (*control*) yang andal. Salah satu metode yang banyak digunakan karena kesederhanaan dan efektivitasnya adalah kontrol Proportional-Integral (PI). Penggunaan kontrol PI terbukti mampu meningkatkan respon dinamis sistem dan menekan osilasi tegangan pada berbagai jenis konverter daya. Penelitian sebelumnya menerapkan kontrol PI untuk menstabilkan tegangan pada sistem mikrogrid [2], sementara ada penelitian yang melakukan analisis kestabilan dan tuning kontrol PI pada konverter tipe flyback [3]. Selain itu, peneliti lain menunjukkan efektivitas kontrol PI pada sistem loop kendali konverter boost DC-DC untuk mencapai kestabilan dan regulasi tegangan yang lebih baik [4]. Dengan demikian, diharapkan pengembangan dan pengendalian *Bidirectional DC-DC Converter* berbasis kontrol PI menjadi aspek yang sangat penting dalam mendukung terciptanya sistem energi terbarukan yang handal, efisien, dan berkelanjutan.

II. METODE PENELITIAN

A. Blok Diagram Sistem

Pada bab kedua terdapat contoh desain sistem konverter DC-DC dua arah yang dirancang berupa diagram blok berikut.



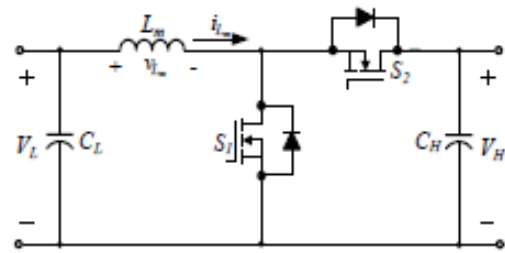
Gambar 1. Blok Diagram

Gambar 1 menyajikan diagram blok sistem konverter dua arah dengan baterai dan solar cell sebagai sumber energi. Energi dari solar cell menggunakan pengaturan konverter dua arah sebagai beban suplai dan sebagai pengisian baterai. Bidirectional DC-DC Converter diagram blok bekerja dua arah jika dalam mode boost baterai adalah sumber utama. Untuk konverter DC-DC dua arah kemudian memasok beban lampu dan jika dalam mode buck, solar cell adalah sumber utama untuk konverter DC-DC dua arah kemudian mengisi baterai.

Sistem konverter DC-DC dua arah menggunakan dua mode, manual dan otomatis. Saat diatur secara manual, sistem menggunakan throttle (ADC) sebagai pemicu perubahan siklus kerja besar pada konverter dua arah. Siklus kerja dapat diatur dari 0-100%, artinya konverter dua arah dapat memasok daya maksimum. Saat diatur dalam mode otomatis, sensor tegangan memberikan data sebagai umpan balik ke mikrokontroler. Mikrokontroler akan memberikan respons dan mode sistem konverter dua arah menjadi kontrol PI.

B. Desain Bisirectional Converter

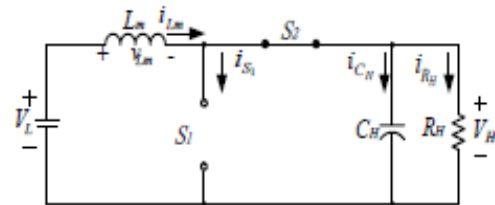
Desain Bidirectional Converter diperlukan untuk mengetahui spesifikasi baterai dan beban. Tegangan maksimum solar cell adalah 18.57 V dan baterai tegangan maksimum adalah 12 V. Ada 2 mode yaitu mode boost dan buck. untuk mode boost sumber utama adalah baterai 12 V dan kemudian konverter meningkatkan tegangan yang digunakan untuk mensuplai beban lampu 24 V. untuk mode buck, sumber utama tegangan solar cell yang digunakan untuk mengisi baterai sekitar 14.5 V. Bagian berikut memberikan uraian mendalam tentang topologi dasar dan desain komponen dari rangkaian konverter buck-boost dua arah yang diusulkan.



Gambar 2. Rangkaian Bidirectional Converter

1. Bidirectional Converter Mode Buck

Pada mode Buck sumber utama tegangan menggunakan solar cell yang digunakan untuk mengisi baterai 12 V dengan tegangan charging 14.5 V.



Gambar 3. Rangkaian Mode Buck

$$D = \frac{V_o}{V_{in}} \tag{1}$$

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta V_o} = \frac{\Delta I_L \times T}{8 \Delta V_o} = \frac{\Delta I_L}{8 \times f \times \Delta V_o} \tag{2}$$

Note :

- V_{in} = Input Voltage
- V_{out} = Output Voltage
- C = Capacitor

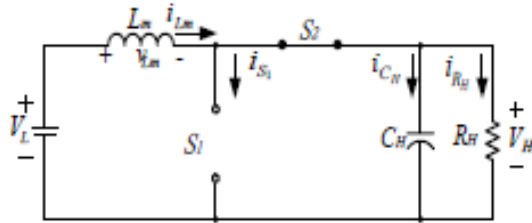
Persamaan 4 (Tegangan output desain konverter buck) dan 5 (desain kapasitor) diperlukan untuk merancang mode buckkonverter DC-DC dua arah.

Tabel 1. Parameter Bidirectional Converter Mode Buck

V _{in}	V _o	C
18.57	14.5	86,2 uF

2. Boost Mode

Pada mode Boost sumber utama adalah baterai 12 V kemudian masuk ke konverter dan kemudian mensuplai beban lampu 24V.



Gambar 4. Rangkaian Mode Boost

$$D = 1 - \frac{V_{in(min)}}{V_{out}} \tag{3}$$

$$L_{min} \geq \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \tag{4}$$

$$C = \frac{V_o \times D}{R_x \Delta V_{oxf}} \tag{5}$$

Note :

- V_{in} = Input Voltage
- V_{out} = Output Voltage
- L = Inductor
- C = Capacitor

Persamaan 3 (Tegangan output desain konverter boost), 4 (desain Induktor) dan 5 (desain kapasitor) diperlukan untuk merancang mode boost konverter dc-dc dua arah.

Tabel 2. Parameter Bidirectional Converter Mode Boost

V _{in}	V _o	L	C
12	24	416,4	520,83 uF

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian Karakteristik Solar Cell

Data pengujian parsial solar cell dapat dilihat pada Tabel 3 di bawah ini. Dari data ini dapat dilihat bahwa daya output maksimum dari solar cell adalah 9.594, yang merupakan data yang diperoleh pada pukul 12:00 dengan nilai tegangan 18.45 Volt dan arus 0.52 Ampere.

Tabel 3. Pengujian Karakteristik Solar Cell

Waktu	V (Volt)	I (Arus)	Pmax (Watt)
10.00	17.8	0.46	8.188
10.30	18.1	0.48	8.688
11.00	18.2	0.5	9.1
11.30	18.4	0.51	9.384
12.00	18.45	0.52	9.594
12.30	18.1	0.49	8.869
13.00	17.7	0.47	8.319
13.30	17.3	0.45	7.785
14.00	16.8	0.43	7.224
14.30	16.4	0.4	6.56

B. Pengujian Integrasi Mode Buck

Pengujian integrasi sistem tanpa kontrol pada mode buck bertujuan untuk mengetahui karakteristik dasar buck converter dalam menurunkan tegangan dari sisi solar cell menuju sisi baterai tanpa adanya pengaturan umpan balik. Jika tegangan charging telah mencapai batas maksimum sehingga pada kondisi ini diperlukan penurunan duty cycle dengan memutar potensio secara manual agar tidak terjadi over voltage pada proses charging.

Tabel 4. Pengujian Integrasi Mode Buck

Duty (%)	V _{in}	V _{out}	I _{in} (A)	I _{out} (A)	P _{in} (W)	P _{out} (W)	η (%)
78,3	18,42	14,31	0,54	0,60	9,95	8,68	87,23
77,8	18,25	14,36	0,52	0,58	9,49	8,31	87,56
77,2	18,07	14,41	0,50	0,56	9,04	7,89	87,28

Duty (%)	V _{in}	V _{out}	I _{in} (A)	I _{out} (A)	P _{in} (W)	P _{out} (W)	η (%)
76,4	17,76	14,44	0,47	0,52	8,35	7,27	87,07
75,7	17,43	14,46	0,44	0,48	7,67	6,66	86,86
74,9	17,14	14,48	0,41	0,46	7,03	6,28	89,33
73,8	16,83	14,50	0,38	0,42	6,39	5,52	86,38
73,1	16,41	14,52	0,34	0,37	5,58	4,83	86,59

C. Pengujian Integrasi *Mode Boost*

Pengujian integrasi sistem tanpa kontrol pada mode boost bertujuan untuk menganalisis kemampuan dasar konverter dalam menaikkan tegangan dari sisi baterai menuju sisi beban tanpa mekanisme

pengaturan tegangan. Pada pengujian ini diamati perilaku tegangan keluaran saat kondisi start-up dan saat mencapai keadaan *steady-state*.

Tabel 5. Pengujian Integrasi *Mode Boost*

Duty (%)	V _{in}	V _{out}	I _{in} (A)	I _{out} (A)	P _{in} (W)	P _{out} (W)	η (%)
50,3	12,53	24,72	0,78	0,31	9,77	8,66	88,63
50,3	12,50	24,68	0,75	0,30	9,38	8,40	89,55
50,3	12,48	24,66	0,73	0,28	9,11	8,05	88,35
50,3	12,40	24,56	0,69	0,25	8,56	6,94	81,07
50,3	12,35	24,50	0,66	0,23	8,15	6,53	80,12
50,3	12,28	24,41	0,64	0,23	7,86	6,38	81,17
50,3	12,16	24,26	0,60	0,22	7,30	6,03	82,60
50,3	12,00	24,05	0,58	0,21	6,96	5,74	82,47

D. Pengujian Integrasi *Mode Buck* Dengan Kontrol PI

Pengujian ini dilakukan pada siang hari dengan kontrol PI, diatur agar tegangan output dari boost sebesar 14.5 V. Berikut ini adalah gambarnya.

mode buck dengan kontrol PI dilakukan untuk melihat bagaimana kinerja sistem konverter dalam menjaga kestabilan tegangan keluaran ketika terjadi perubahan tegangan masukan dari solar cell. Berikut ini adalah hasil pengujiannya.



Gambar 5. Pengujian Integrasi *Mode Buck* Dengan Kontrol PI

Pada pengujian integrasi yang ditunjukkan Gambar 5, Pengujian integrasi

Tabel 6. Pengujian Integrasi *Mode Buck* Dengan Kontrol PI

Duty (%)	V _{in}	I _{in} (A)	V _{out}	I _{out} (A)
78,6	18,43	0,53	14,5	0,60
78,1	18,36	0,52	14,5	0,59
77,5	18,22	0,50	14,51	0,57
76,9	18,05	0,49	14,49	0,55
76,3	17,90	0,48	14,5	0,54
75,7	17,74	0,46	14,52	0,52
75,1	17,56	0,45	14,5	0,50
74,5	17,31	0,43	14,49	0,48
73,9	17,02	0,41	14,5	0,46
73,4	16,79	0,39	14,5	0,43
72,8	16,52	0,36	14,49	0,40
72,2	16,28	0,34	14,5	0,38

Berdasarkan data hasil pengujian, terlihat bahwa tegangan masukan mengalami penurunan secara bertahap dari 18,43V hingga 16,28V. Meskipun demikian, tegangan keluaran tetap berada di sekitar 14,5V dengan selisih yang sangat kecil. Hal ini menunjukkan bahwa kontrol PI mampu bekerja dengan baik dalam menyesuaikan *duty cycle* sehingga tegangan keluaran tetap mendekati nilai referensi yang telah ditetapkan.

E. Pengujian Integrasi *Mode Boost* Dengan Kontrol PI

Pengujian ini dilakukan pada malam hari dengan kontrol PI, diatur agar tegangan output dari boost sebesar 24V. Berikut ini gambar hardwarenya. Pada pengujian integrasi yang ditunjukkan Gambar 6, Pengujian integrasi mode boost dengan kontrol PI dilakukan

untuk mengetahui kemampuan sistem konverter dalam menaikkan dan mempertahankan tegangan keluaran pada nilai yang telah ditentukan meskipun terjadi perubahan pada tegangan masukan.



Gambar 6. Pengujian Integrasi *Mode Boost* Dengan Kontrol PI

Tabel 7. Pengujian Integrasi *Mode Boost* Dengan Kontrol PI

V _{pv}	Duty (%)	V _{in} (V)	I _{in} (A)	V _{out} (V)	I _{out} (A)
0	47,7	12,55	0,61	23,99	0,35
	47,9	12,52	0,58	24	0,33
	48,3	12,51	0,56	24,02	0,32
	48,6	12,47	0,53	24	0,31
	49,0	12,41	0,55	24	0,29
	49,2	12,36	0,50	24	0,28
	49,6	12,27	0,47	23,99	0,26
	50,0	12,25	0,44	23,98	0,25
	50,3	12,21	0,46	24	0,23
	50,4	12,18	0,42	24	0,22
	50,8	12,15	0,40	24	0,21
51,0	12,00	0,38	24	0,20	

Berdasarkan hasil pengujian, tegangan masukan berada pada kisaran 12V hingga 12,55V dengan variasi *duty cycle* antara 47,7% hingga 51,0%. Meskipun terjadi perubahan pada tegangan masukan dan *duty cycle*, tegangan keluaran tetap terjaga di sekitar 24V. Hal ini menunjukkan bahwa kontrol PI mampu bekerja secara efektif dalam menyesuaikan *duty*

cycle agar tegangan keluaran tetap sesuai dengan nilai referensi.

IV. SIMPULAN

Pada penelitian ini telah berhasil dirancang dan diuji sebuah sistem *bidirectional DC-DC converter* berbasis *solar cell* dengan penerapan kontrol

Proportional–Integral (PI). Sistem dirancang untuk bekerja pada dua mode operasi, yaitu mode buck untuk proses pengisian baterai 12V dan *mode boost* untuk penyaluran energi dari baterai ke beban 24V.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa *solar cell* 10 Wp mampu menghasilkan daya maksimum mendekati spesifikasi nominalnya dengan performa terbaik terjadi pada kondisi intensitas cahaya optimal. Pengujian parsial pada komponen utama, seperti induktor dan sensor tegangan, menunjukkan bahwa seluruh komponen bekerja sesuai dengan perancangan dan dapat digunakan sebagai bagian dari sistem kontrol.

Pada pengujian integrasi, sistem tanpa kontrol masih menunjukkan fluktuasi tegangan keluaran baterai akibat perubahan kondisi masukan dan beban. Namun, setelah diterapkan kontrol PI, tegangan keluaran pada *mode buck* dapat dipertahankan stabil di sekitar 14,5V, sedangkan pada *mode boost* stabil di sekitar 24V, meskipun terjadi variasi tegangan masukan. Hal ini menunjukkan bahwa kontrol PI mampu meningkatkan kestabilan sistem secara signifikan.

Dari sisi kinerja daya, sistem menunjukkan efisiensi yang tinggi dengan efisiensi rata-rata mencapai sekitar 93% pada mode buck dengan kontrol PI, yang menandakan bahwa rugi-rugi daya pada sistem relatif kecil. Dengan demikian, sistem *bidirectional DC–DC converter* yang diusulkan terbukti bekerja secara andal, efisien, dan stabil, sehingga layak diterapkan pada aplikasi sistem penyimpanan dan manajemen energi berbasis *solar cell* skala kecil.

V. RUJUKAN

- [1] K. H. Chao, M. C. Tseng, C. H. Huang, Y. G. Liu, and L. C. Huang. “Design and Implementation of a Bidirectional DC-DC Converter for Stand-Alone Photovoltaic Systems,” *Journal of Power Electronics*, Vol. 20, No. 5, pp. 5927-5938, 2012.
- [2] A. Elnady. “PI Controller Based Operational Scheme to Stabilize Voltage in Microgrid,” in *Proceedings of the 2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, IEEE, 2019.
- [3] T. Halder. “PI Controller Tuning & Stability Analysis of the Flyback SMPS,” in *Proceedings of the 6th India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, IEEE, 2014.
- [4] O. Rabiaa, R. Ounis, and S. Bouallègue, “Cascade Control Loop of DC-DC Boost Converter Using PI Controller,” in *Proceedings of the International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies (ISAECT)*, IEEE, 2018.
- [5] B. Mahendra, “Rancang Bangun Bidirectional DC-DC Converter pada Sistem Penyimpanan Energi,” Tugas Akhir, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia, 2020.
- [6] A. F. Utama, “Rancang Bangun Three Phase Interleaved Bidirectional DC-DC Converter dengan Fuzzy Logic Controller,” Tugas Akhir, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia, 2021.