

Desain dan Implementasi Kendali Umpan Balik Arus Berbasis Proporsional-Integral Digital pada Topologi *Cuk Converter*

Arifin Wibisono¹, Slamet Riyadi², Alvin Martanio³

[Submission: 06-04-2022, Accepted: 25-05-2022]

Abstract— DC-DC converters are required in industrial applications to convert a fixed DC voltage to a variable DC voltage. This article focuses on the choke converter topology which can operate in a buck-boost mode which is regulated through the duty cycle pulse width modulation setting and controlled by the dsPIC33EP512MU810 microcontroller by applying the Proportional-Integral (PI) digital closed-loop current control method. The use of the PI control method is considered to be able to increase the response time that occurs to produce more optimal performance. The frequency given by the signal generator is used as a reference signal to inject current into the inductor (L_1). The current sensor module acts as a measuring instrument for the actual current whose value appears through the inductor circuit. The difference between the reference current value and the actual current value will produce an error value which will then be used as a reference for the comparison value of the current sensor results with the PI control method. Simulation results on PSIM, modeling analysis, device implementation, and hardware testing graphs in the laboratory have been carried out as proof of design parameters and the proposed method can work as intended.

Intisari— Konverter DC-DC diperlukan dalam aplikasi industri elektronika untuk mengubah tegangan DC tetap menjadi tegangan DC variabel. Artikel ini berfokus tentang topologi *cuk converter* yang dapat beroperasi dalam mode penurun dan penaik tegangan (*buck-boost*) yang diatur melalui pengaturan modulasi lebar pulsa *duty cycle* dan dikontrol oleh mikrokontroler dsPIC33EP512MU810 dengan menerapkan metode kendali arus loop tertutup *Proportional-Integral* (PI) digital. Penggunaan metode kendali PI dianggap mampu meningkatkan respon waktu yang terjadi sehingga menghasilkan performa yang lebih optimal. Frekuensi yang diberikan oleh generator sinyal dimanfaatkan sebagai sinyal referensi untuk menginjeksi arus pada induktor (L_1). Modul sensor arus berperan sebagai alat ukur pada arus aktual yang nilainya muncul melalui rangkaian induktor. Selisih antara nilai arus referensi dan nilai arus aktual akan menghasilkan nilai *error* yang selanjutnya akan dijadikan sebagai acuan nilai perbandingan hasil sensor arus dengan metode kendali PI. Hasil simulasi pada *PSIM*, analisis pemodelan, implementasi perangkat dan grafik pengujian perangkat keras pada laboratorium telah dilakukan sebagai pembuktian

parameter desain dan metode yang diusulkan dapat bekerja sesuai tujuan.

Kata Kunci— *cuk converter*, dsPIC33EP512MU810, kendali arus, PI digital, simulasi *PSIM*

I. PENDAHULUAN

Menuju perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, konsep elektronika dan kendali elektronik sangat memegang peranan penting dalam sistem tenaga listrik tegangan searah (DC). Kebutuhan tegangan DC yang luas disebabkan oleh setiap peralatan elektronik membutuhkan tegangan DC yang berbeda sehingga diperlukan suatu sistem yang mampu mengubah suatu tegangan DC ke nilai tegangan DC yang dapat divariasikan [1][2].

Banyak macam sumber tegangan DC dapat dikonversi oleh konverter DC yang lain. Konverter DC-DC dikelompokkan menjadi tiga pemodelan berdasarkan model keluaran yang dihasilkan, yaitu sebagai penaik tegangan (*boost chopper*), sebagai penurun tegangan (*buck chopper*), dan sebagai penaik-penurun tegangan (*buck-boost chopper*) [3]. Konverter topologi *cuk* beroperasi menjadi penurun tegangan atau penaik tegangan dari tegangan *input* [4][5] yang diperoleh dari proses pengaturan modulasi lebar pulsa *duty cycle*, sama seperti tipe *buck-boost*. Penambahan induktor dan kapasitor di sisi *input* dapat membuat topologi ini menghasilkan riak arus yang kecil dibandingkan dengan topologi *buck-boost* konvensional.

Cuk converter memiliki karakteristik yang baik dalam performa [6]. Efisiensi yang tinggi, tingkat kerugian switching yang rendah, dan riak arus keluaran yang lebih kecil membuat *cuk converter* lebih menarik dan populer [7]. *Cuk converter* dirancang untuk menggunakan tegangan input DC dari *power supply* dan pengaturan tegangan *output cuk converter* membutuhkan pengendalian yang sederhana dan dapat diterapkan pada sistem, salah satunya pengendalian PI [8]. Nilai arus referensi pada modul sensor *HX-10P/SP2* diberikan dengan berbagai macam sampel sebagai batas tolak ukur perbandingan nilai kinerja mana yang lebih optimal, sehingga memperoleh tujuan untuk menganalisa sinyal kendali arus induktor (L_1) dengan tegangan *output* yang dihasilkan. Simulasi dilakukan menggunakan *software PSIM* untuk memverifikasi keseluruhan desain dan parameter sistem bekerja dengan baik sebelum masuk dalam tahap pengujian alat di laboratorium.

II. METODE

A. Topologi *Cuk Converter*

p-ISSN:1693 – 2951; e-ISSN: 2503-2372

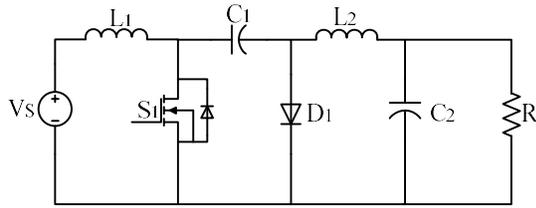
¹ Dosen, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Soegijapranata, Semarang, Indonesia; e-mail: arifin@unika.ac.id

² Dosen, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Soegijapranata, Semarang, Indonesia; e-mail: riyadi@unika.ac.id

³ Mahasiswa, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Soegijapranata, Semarang, Indonesia; e-mail: alvinmrtn22@gmail.com

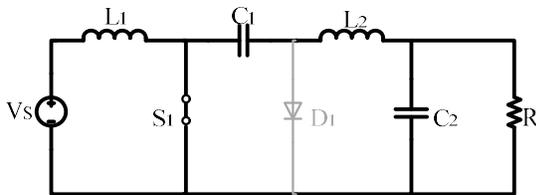


Cuk converter adalah jenis konverter DC yang dapat beroperasi sebagai penaik tegangan atau penurun tegangan dari tegangan masukan. Tegangan keluaran diatur oleh pensaklaran saklar statis yang diatur melalui modulasi lebar pulsa *duty cycle*. Rangkaian ekivalen *cuk converter* disajikan pada Gambar 1.

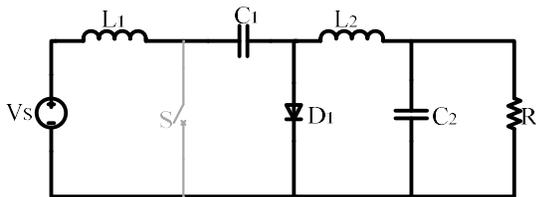


Gambar 1: Rangkaian ekivalen *cuk converter*.

Cuk converter memiliki dua mode operasi pensaklaran [9]. Rangkaian ekivalen kondisi saklar *ON state* ditunjukkan pada Gambar 2, dan rangkaian ekivalen kondisi saklar *OFF state* ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 2: Rangkaian ekivalen *cuk converter* pada kondisi *ON state*.



Gambar 3: Rangkaian ekivalen *cuk converter* pada kondisi *OFF state*.

Saat saklar kondisi *ON*, tegangan input diumpungkan ke induktor L_1 dan membangun medan magnet induktor untuk memberikan suplai tegangan pada beban, yang selanjutnya tegangan dari beban akan diterima oleh kapasitor C_1 dalam bentuk tegangan siklus negatif. Dalam hal ini C_2 akan mengalirkan arus ke L_2 dan akhirnya ke beban. Saat saklar dalam kondisi *OFF*, induktor L_1 mempertahankan arus yang mengalir dan membalikkan polaritas arus yang melalui C_1 . Dioda (D_1) akan berperan sebagai pembias sisa tegangan yang menuju ke beban yang dialirkan dari komponen L_1 dan C_1 .

Nilai *duty cycle* konverter dapat ditentukan dengan mengacu pada (1) berdasarkan operasi dasar. Siklus kerja saklar menunjukkan bahwa dengan mengontrol *duty cycle* maka saklar (S) dapat menjadi pengontrol tegangan keluaran menjadi lebih tinggi atau lebih rendah [10][11] dari tegangan masukan (V_s).

$$d = \frac{V_o}{V_s + V_o} \tag{1}$$

Ketika kondisi saklar dinyalakan dinotasikan sebagai (d) dan saklar dimatikan dinotasikan sebagai ($1-d$), sehingga dapat mengacu pada (2).

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{d}{(1-d)} \tag{2}$$

Persamaan (3)-(6) digunakan untuk mendapatkan penghitungan parameter desain.

$$L_1 = \frac{DV_s}{(\Delta I_{L_1})f_s} \tag{3}$$

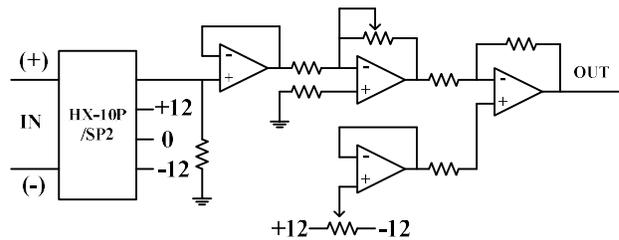
$$L_2 = \frac{(1-D)V_o}{(\Delta I_{L_2})f_s} \tag{4}$$

$$C_1 = \frac{D}{(Rf_s)\left(\frac{\Delta V_{C_1}}{V_o}\right)} \tag{5}$$

$$C_2 = \frac{(1-D)}{(8L_1f_s^2)\left(\frac{\Delta V_{C_2}}{V_o}\right)} \tag{6}$$

B. Sensor Arus

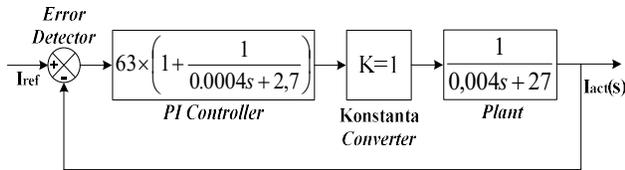
Pada prinsipnya nilai arus aktual yang melalui induktor akan diukur dan dibaca oleh sensor yang selanjutnya akan dikonversikan sehingga menjadi nilai tegangan yang optimal [12], dan sinyal yang telah dikonversi akan dibaca oleh *digital signal* pada mikrokontroler *dsPIC33EP512MU810*. Modul sensor arus *HX-10-P/SP2* dilengkapi dengan rangkaian penguat *OP-AMP* dan mampu mendeteksi arus hingga 10A. Skema rangkaian *OP-AMP* sensor arus disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4: Skematik *OP-AMP* menggunakan sensor *HX-10P/SP2*

C. Kendali Arus PI

Perubahan tegangan masukan dan atau perubahan beban keluaran tampaknya tidak mungkin dilakukan tanpa suatu bentuk pengendalian. Kendali PI merupakan gabungan sistem kontrol antara kontrol *proportional* dan *integral*. Penggunaan kontrol PI dianggap mampu mengoptimalkan respon waktu yang terjadi. Sinyal kontrol PI digunakan sebagai umpan balik pada nilai arus keluaran dari konverter dengan memberikan *gain*. *Output* respon akan menghasilkan nilai yang sebanding dengan nilai *setting point* karena memiliki kemampuan *zero offset* [13]. Gambar 5 menunjukkan diagram blok dari kontroler PI secara umum.



Gambar 5: Diagram blok sistem kendali *proportional-integral*.

Nilai *error* diperoleh melalui hasil pengurangan nilai arus aktual dengan nilai arus referensi yang diberikan [14][15][16]. Setelah nilai *error* muncul, kontroler akan menghitung nilai *error* dengan nilai penguatan untuk menghasilkan sinyal kontrol [17][18][19].

$$G(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t) dt$$

$$G(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} \right] e(s)$$

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (7)$$

Persamaan (7) merupakan persamaan kontroler PI. Dua parameter yang dibutuhkan dalam kontroler PI [20][21] yaitu K_p , untuk mendapatkan respon waktu transien yang optimal dan kestabilan yang bagus; K_i , untuk mengurangi *steady-state error* [22][23].

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi *PSIM* dan pengujian laboratorium telah dilakukan dengan parameter yang tersaji pada Tabel I.

TABEL I
 PARAMETER *CUK CONVERTER*

| Parameter | Nilai / Tipe |
|---------------------|--------------|
| Tegangan sumber | 12 Volt (DC) |
| Induktor L_1 | 4 mH |
| Induktor L_2 | 4mH |
| Kapasitor C_1 | 470 μ F |
| Kapasitor C_2 | 470 μ F |
| Beban <i>output</i> | 27 Ω |
| Dioda | MUR860 |
| Saklar statis | IRFP460N |

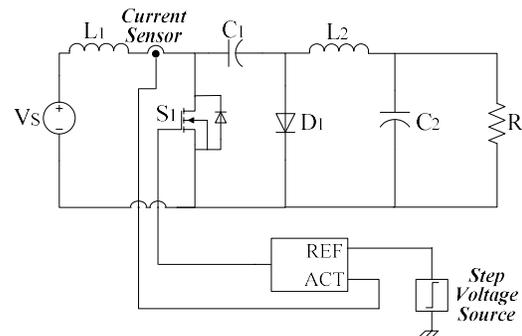
Parameter pengujian perangkat yang dilakukan sesuai pada Tabel I digunakan sebagai acuan pembuktian perangkat keras dapat memberikan hasil yang akurat dan optimal. Simulasi dan pengujian perangkat yang dilakukan dalam keadaan berbeban resistor sebesar 27 Ω . Nilai beban mempengaruhi hasil nilai tegangan pada sisi *output*.

Alvin Martanio: Desain dan Implementasi Kendali...

TABEL II
 PARAMETER KENDALI PI

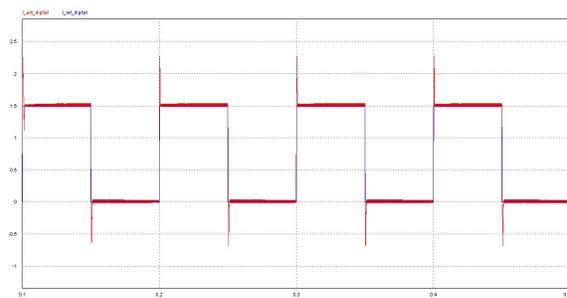
| Parameter | Nilai |
|------------------|-------|
| K_p | 63 |
| K_i | 0.7 |
| <i>Frequency</i> | 10kHz |

Penentuan parameter nilai K_p dan nilai K_i juga diperlukan untuk memastikan sistem kontrol dapat memberikan kinerja yang cukup baik, seperti yang disajikan pada Tabel II. Nilai K_p dan K_i diperoleh berdasarkan metode *trial-error*. Rangkaian simulasi kendali arus pada *cuk converter* dengan metode PI disajikan pada Gambar 6.



Gambar 6: Rangkaian kendali arus dengan metode PI pada *PSIM*.

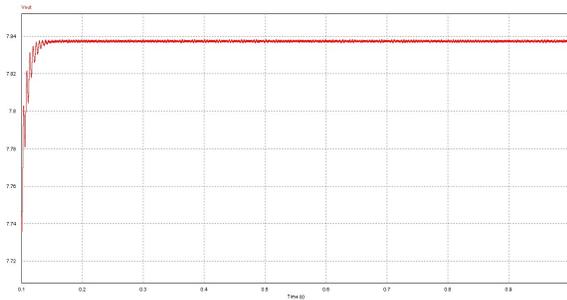
Hasil simulasi *PSIM* pada kendali arus yang ditunjukkan pada Gambar 6 dilakukan untuk mengetahui bahwa sistem kendali dengan metode PI pada *cuk converter* dapat bekerja dengan baik.



Gambar 7: Sinyal aktual dan referensi pada percobaan *PSIM*.

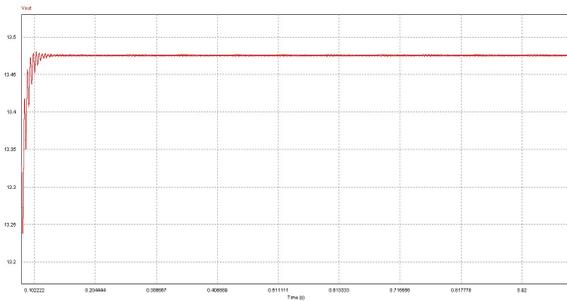
Hasil simulasi *PSIM* pada sinyal aktual dan sinyal referensi ditunjukkan pada Gambar 7. Sinyal aktual (merah) menunjukkan dapat melakukan *tracking* sinyal referensi (biru) yang diberikan sehingga dapat dibuktikan bahwa proses pensaklaran pada kontrol arus metode PI pada *cuk converter* dapat diterapkan.





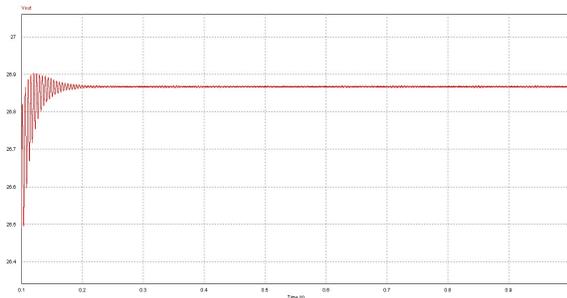
Gambar 8: Tegangan output cuk converter dengan nilai referensi 0.5A pada PSIM

Hasil simulasi PSIM yang ditunjukkan pada Gambar 8 membuktikan dengan memberikan arus referensi sebesar 0.5 A dapat menghasilkan tegangan keluaran (V_{out}) 7.83 V dengan tegangan masukan (V_{in}) sebesar 12 V sehingga terjadi proses buck.



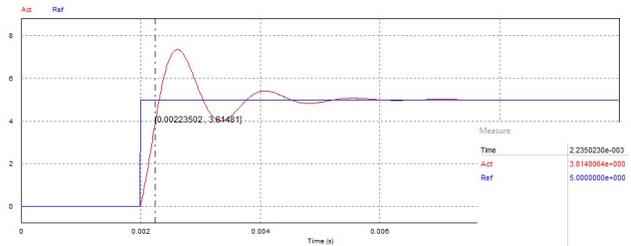
Gambar 9: Tegangan output cuk converter dengan nilai referensi 1.5A pada PSIM

Hasil simulasi PSIM yang ditunjukkan pada Gambar 9 membuktikan dengan memberikan arus referensi sebesar 1.5A dapat menghasilkan tegangan keluaran (V_{out}) 13.47 V dengan tegangan masukan (V_{in}) sebesar 12 V sehingga terjadi proses boost.



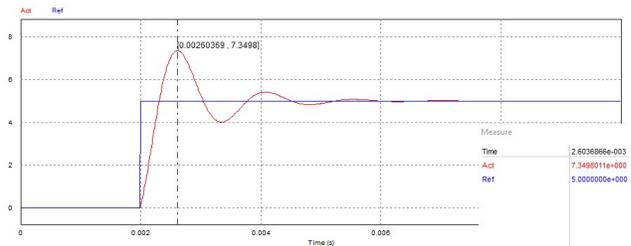
Gambar 10: Tegangan output cuk converter dengan nilai referensi 3A pada PSIM

Hasil simulasi PSIM yang ditunjukkan pada Gambar 10 membuktikan dengan memberikan arus referensi sebesar 3A dapat menghasilkan tegangan keluaran (V_{out}) 26.86 V dengan tegangan masukan (V_{in}) sebesar 12 V sehingga terjadi proses boost.



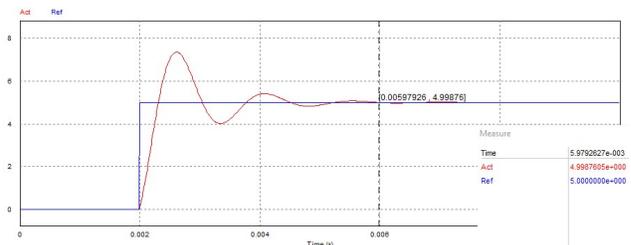
Gambar 11: Karakteristik respon rise-time pada kendali

Hasil simulasi PSIM yang ditunjukkan Gambar 11 merupakan hasil pengamatan respon kendali untuk karakteristik respon rise time. Waktu yang diperlukan oleh pengendali agar nilai aktual mencapai 90% dari nilai referensi adalah selama 2,23 ms.



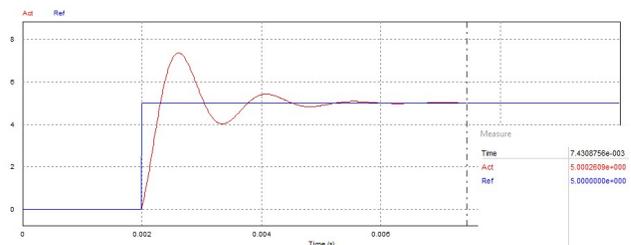
Gambar 12: Karakteristik respon over shoot pada kendali

Hasil simulasi PSIM yang ditunjukkan Gambar 12 merupakan hasil pengamatan respon kendali untuk karakteristik respon over shoot. Nilai puncak dari sinyal aktual dibandingkan dengan nilai saat kondisi steady state adalah sebesar 7,35 A (over shoot 2,35A dari sinyal aktual steady state sebesar 5A)



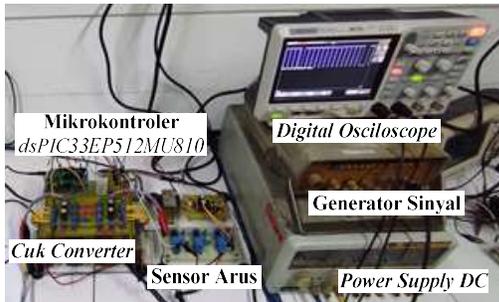
Gambar 13: Karakteristik respon settling time pada kendali

Hasil simulasi PSIM yang ditunjukkan Gambar 13 merupakan hasil pengamatan respon kendali untuk karakteristik respon settling time. Waktu yang diperlukan oleh pengendali agar nilai aktual mencapai nilai referensi untuk kondisi tunak (prosentase +/-2%) adalah 5,98 ms.



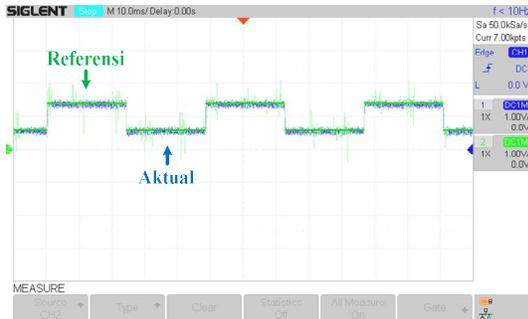
Gambar 14: Karakteristik respon steady state error pada kendali

Hasil simulasi *PSIM* yang ditunjukkan Gambar 14 merupakan hasil pengamatan respon kendali untuk karakteristik respon *steady state*. Diperoleh selisih antara nilai aktual dan referensi pada kondisi tunak adalah 0 A. Dari seluruh nilai parameter karakteristik kendali sistem yang telah didapatkan, kendali arus menggunakan metode PI pada *cuk converter* telah berjalan dengan baik seperti yang diharapkan.



Gambar 15: Implementasi sistem kendali *digital proportional-integral cuk converter*

Hasil implementasi perangkat keras ditunjukkan pada Gambar 15. *Power supply DC* digunakan sebagai tegangan masukan *cuk converter* dan pensaklaran dikontrol oleh *digital signal* dari mikrokontroler *dsPIC33EP512MU810*. Sinyal *output* dari *cuk converter* dideteksi oleh sensor arus *HX-10P/SP2* dan dikonversi menjadi hasil sinyal aktual. Pengaturan sinyal referensi variabel menggunakan perangkat modul generator sinyal.



Gambar 16: Hasil referensi dan aktual implementasi perangkat *cuk converter* dengan metode PI.

Hasil implementasi pengujian sinyal aktual dan sinyal referensi ditunjukkan pada Gambar 16. Nilai sinyal referensi pada perangkat keras dihasilkan dari modul generator sinyal yang dapat diatur secara variabel dengan frekuensi 10Hz.



Gambar 17: Tegangan keluaran pada implementasi perangkat keras *cuk converter* dengan metode PI referensi 0.5 A.

Hasil implementasi pengujian perangkat yang ditunjukkan pada Gambar 17 membuktikan dengan memberikan arus referensi 0.5 A dapat menghasilkan tegangan keluaran (V_{out}) 10.53 V dengan tegangan masukan (V_{in}) 12 V sehingga terjadi proses *buck*.



Gambar 18: Tegangan keluaran pada implementasi perangkat keras *cuk converter* dengan metode PI referensi 1.5 A.

Hasil implementasi pengujian perangkat yang ditunjukkan pada Gambar 18 membuktikan dengan memberikan arus referensi 1.5 A dapat menghasilkan tegangan keluaran (V_{out}) 13.50 V dengan tegangan masukan (V_{in}) 12 V sehingga terjadi proses *boost*.



Gambar 19: Tegangan keluaran pada implementasi perangkat keras *cuk converter* dengan metode PI referensi 3 A.



Hasil implementasi pengujian perangkat yang ditunjukkan pada Gambar 19 membuktikan dengan memberikan arus referensi 3 A dapat menghasilkan tegangan keluaran (V_{out}) 15.61 V dengan penggunaan tegangan masukan (V_{in}) 12 V dengan tegangan masukan (V_{in}) 12 V sehingga terjadi proses *boost*.

Berdasarkan hasil yang telah diperoleh, disajikan Tabel III sebagai perbandingan hasil antara simulasi dan implementasi.

TABEL III
PERBANDINGAN SIMULASI DAN IMPLEMENTASI CUK CONVERTER

| Referensi Arus | Nilai Tegangan Keluaran (V_{out}) | |
|----------------|---------------------------------------|--------------|
| | Simulasi <i>PSIM</i> | Implementasi |
| 0.5 A | 7.83 V | 10.53 V |
| 1.5 A | 13.47 V | 13.50 V |
| 3 A | 26.86 V | 15.61 V |

Tabel III digunakan sebagai acuan perbandingan hasil antara simulasi dan implementasi pada sistem kendali PI digital menggunakan *cuk converter*. Hasil pengujian alat membuktikan nilai implementasi dapat mendekati nilai pengujian pada simulasi. Tegangan keluaran mengalami perbedaan karena diakibatkan oleh elemen *parasitic*.

IV. KESIMPULAN

Cuk converter dengan metode kendali arus *loop* tertutup PI memberikan hasil bahwa arus aktual dapat mengalami perubahan sesuai dengan arus referensi yang diinginkan. Implementasi metode kendali PI menggunakan *digital signal* oleh mikrokontroler *dsPIC* memberikan kemudahan dalam menentukan algoritma. Kendali PI dapat memberikan perubahan dalam respon waktu yang cukup cepat, hal ini terbukti pada grafik percobaan yang telah dilakukan. Oleh karena itu, parameter desain pada simulasi dapat tervalidasi oleh implementasi dan pengujian perangkat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh skema Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi (PTUPT) tahun 2022.

REFERENSI

- [1] Hermansyah, Soedibyo, and M. Ashari, "Simulasi Double Buck Boost Converter DC-DC Bidirectional Menggunakan PID Controller B-1 B-2," *Pros. SENTIA*, vol. 7, pp. 1–6, 2015.
- [2] S. A. Lopa, S. Hossain, M. K. Hasan, and T. K. Chakraborty, "Design and Simulation of DC-DC Converters Design and Simulation of DC-DC Converters," no. January, 2016.
- [3] P. S. Nasional *et al.*, "DESAIN DAN IMPLEMENTASI KENDALI DIGITAL HISTERESIS PADA TOPOLOGI SEPIC BUCK-BOOST KONVERTER," pp. 1–10, 2021.
- [4] A. Musyafa, I. R. Gustawan, M. K. Asy, A. Rahmadiansyah, and R. D. Noriyati, "Development of Power Electronics Buck Boost Converter, Based PI-PID Control On Horizontal Wind Turbine Generation, For Low Rate Wind speed," *Aust. J. Basic Appl. Sci.*, vol. 11, no. August, pp. 79–87, 2017.
- [5] P. Manisankar, N. S. Kumar, N. V. Bharathi, and G. Balasubramanian, "Design and Implementation of CUK Converter," vol. 2, pp. 43–46, 2017.
- [6] B. K. Kushwaha and A. Narain, "Controller design for Cuk converter

- using model order reduction," *ICPCES 2012 - 2012 2nd Int. Conf. Power, Control Embed. Syst.*, vol. 2, pp. 0–4, 2012.
- [7] Abdelhakim Belkaid, Ilhami Colak, Korhan Kayisli, and Ramazan Bayindir, "Design and Implementation of a Cuk Converter Controlled by a Direct Duty Cycle INC-MPPT in PV Battery System | Belkaid | International Journal of Smart Grid - ijSmartGrid," *Int. J. Smart Grid*, vol. 3, no. 1, pp. 19–25, 2019.
- [8] A. Jayadi, T. Susanto, and F. D. Adhinata, "Sistem Kendali Proporsional pada Robot Penghindar Halangan (Aavoider) Pioneer P3-DX," *Maj. Ilm. Teknol. Elektro*, vol. 20, no. 1, p. 47, 2021.
- [9] H. N. Shoumi, I. Sudiharto, and E. Sunarno, "Design of the CUK converter with PI controller for battery charging," *Proc. - 2020 Int. Semin. Appl. Technol. Inf. Commun. IT Challenges Sustain. Scalability, Secur. Age Digit. Disruption, iSemantic 2020*, pp. 403–407, 2020.
- [10] M. Bildirici and A. Karaarslan, "Analysis of Cuk Converter Using Pi and Occ Control Method," vol. 2, no. September, pp. 1–5, 2017.
- [11] C. Rachman and F. N. Budiman, "Rancang Bangun Konverter Buck Boost dengan Sistem Monitoring Berbasis Labview," 2018.
- [12] M. I. Pradana, M. Agus, and I. Setiawan, "Menggunakan Dspic30F4011 Dengan Metode Kontrol Proportional Integral," *Dep. Tek. Elektro*, vol. 7, 2018.
- [13] I. Ferdiansyah, Irianto, and E. Sunarno, "Penerapan Kontrol PI Pada Alat Pengaduk dan Pengukus Adonan Padak untuk Meningkatkan Hasil Produksi Industri Rumah Tangga di Gresik," *J. Teknol. Terpadu*, vol. 2, no. 8, pp. 134–143, 2020.
- [14] C. Buku Asli, *KONTROL PID UNTUK PROSES INDUSTRI Beragam Struktur dan Metode Tuning PID praktis (Iwan Setiawan)*. 2008.
- [15] F. A. Sandjojo and I. Setiawan, "Menggunakan Dspic30F4011 Dengan Metode Kontrol Hysteresis."
- [16] M. N. Riandana, I. N. Budiastira, and C. G. I. Partha, "Aplikasi Sensor Cahaya Sebagai Sensor Garis Pada Robot Berbasis Kontrol PID Dengan Pengaturan Kepekaan Cahaya Otomatis," *Maj. Ilm. Teknol. Elektro*, vol. 16, no. 3, p. 56, 2017.
- [17] E. W. Saputra, H. Hermawan, and I. Setiawan, "Sistem Kontrol Injeksi Arus pada Inverter Berbasis Metode Proportional Integral," *Teknik*, vol. 41, no. 2, pp. 186–191, 2020.
- [18] F. Arifin, "PID Controller," *Electronics\Project\Focus*, no. Mv, pp. 1–9, 2019.
- [19] L. Wang, "Chapter 1 Basics of PID Control," no. March, 2020.
- [20] A. Karaarslan, "the Implementation of One Cycle Control Method To Inverting Buck-Boost Converter," no. June, 2018.
- [21] P. V. G. K. Rao, M. V. Subramanyam, and K. Satyaprasad, "Study on PID controller design and performance based on tuning techniques," *2014 Int. Conf. Control. Instrumentation, Commun. Comput. Technol. ICCICCT 2014*, pp. 1411–1417, 2014.
- [22] A. Ahmady, "Pengembangan Algoritma Sistem Kendali Cerdas dengan Metode Adaptive Fuzzy untuk Inverted Pendulum," pp. 1–15.
- [23] A. Laksana, I. Setiawan, and Sumardi, "BALANCING ROBOT BERODA DUA MENGGUNAKAN METODE KENDALI PROPORSIONAL INTEGRAL Andra," pp. 2–9.