



# Investigasi *Interleaved Boost Converter* menggunakan kontrol *state feedback* untuk pengisian baterai

Muh. Izzul Islam<sup>1</sup>, I Ketut Wiryajati<sup>2✉</sup>, I Nyoman Wahyu Satiawan<sup>3</sup>

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Indonesia <sup>(1,2,3)</sup>

DOI: 10.31004/jutin.v7i4.34726

✉ Corresponding author:

[[kjatiwirya@unram.ac.id](mailto:kjatiwirya@unram.ac.id)]

Article Info	Abstrak
<p><b>Kata kunci:</b>  <i>Interleaved Boost Converter (IBC)</i>;  <i>Kontrol PID</i> ;  <i>State feedback</i></p> <p><b>Keywords:</b>  <i>Interleaved boost converter (IBC)</i> ;  <i>PID control</i> ;  <i>State feedback</i></p>	<p>Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja <i>Interleaved Boost Converter</i> (IBC) dalam aplikasi pengisian baterai menggunakan tiga metode kontrol: <i>Open loop</i>, PID, dan <i>State feedback</i>. Pada tahap pendahuluan, dipaparkan pentingnya stabilitas dan efisiensi pengisian baterai untuk meningkatkan umur dan kinerja baterai. Simulasi dilakukan untuk mengevaluasi respons sistem terhadap masing-masing metode kontrol. Metode <i>Open loop</i> menghasilkan tegangan keluaran 35V dengan waktu respon cepat 24,036 ms, tetapi mengalami <i>ripple</i> yang signifikan. Penggunaan kontrol PID memperbaiki stabilitas dengan <i>overshoot</i> yang lebih rendah (0,248%), namun waktu respon menjadi lebih lambat (26,730 ms) dan <i>ripple</i> tetap terlihat. Metode <i>State feedback</i>, terutama dengan nilai matriks gain <math>K2 = [-1 \ 10 \ 15]</math>, menghasilkan kinerja terbaik dengan waktu respon tercepat 4,779 ms, <i>overshoot</i> sebesar 0,497%, dan tanpa <i>ripple</i> pada tegangan keluaran. Berdasarkan hasil ini, direkomendasikan penggunaan kontrol <i>State feedback</i> untuk aplikasi pengisian baterai yang membutuhkan tegangan stabil dan efisien. Kontrol PID dapat digunakan sebagai alternatif, namun tuning lebih lanjut diperlukan untuk mengoptimalkan hasil.</p> <p><b>Abstract</b>                      This study aims to analyze the performance of the <i>Interleaved Boost Converter</i> (IBC) in battery charging applications using three control methods: <i>Open loop</i>, PID, and <i>State feedback</i>. The introduction highlights the importance of stability and efficiency in battery charging to enhance battery life and performance. Simulations were conducted to evaluate the system's response to each control method. The <i>Open loop</i> method produced an output voltage of 35V with a fast response time of 24.036 ms but suffered from significant ripple. PID control improved stability with a lower overshoot (0.248%) but slower response time (26.730 ms), and the ripple remained visible. The <i>State feedback</i> method, especially with a matrix gain of <math>K2 = [-1 \ 10 \ 15]</math>, yielded the best performance, achieving the fastest response time of 4.779 ms, an <i>overshoot</i> of 0.497%, and no ripple in the output voltage. Based on these results, <i>State feedback</i> control is recommended for battery charging applications requiring stable and efficient</p>

voltage. PID control can be an alternative but requires further tuning for optimal performance.

## 1. INTRODUCTION

*Boost* konverter merupakan bagian dari konverter daya DC-DC yang mampu untuk menghasilkan tegangan keluaran yang lebih tinggi dari tegangan masukannya, yang dikendalikan oleh sinyal kontrol berupa sinyal PWM (Pulse Width Modulation)(Buntulayuk et al., 2018). *Device* ini banyak digunakan pada sistem fotovoltaik, kendaraan listrik dan pengisian baterai(Mahendra et al., 2022). Meskipun *boost* konverter dapat meningkatkan tegangan keluaran, konverter ini masih memiliki kelemahan seperti memiliki riak arus masukan dan keluaran yang tentunya dapat mempengaruhi kinerja *boost* konverter dalam konversi daya(Feriyanto et al., 2020). Untuk mengatasi kelemahan ini, *interleaved boost* konverter (IBC) diperkenalkan sebagai solusi yang lebih efektif dalam konversi daya karena dapat mengurangi riak dan dapat meningkatkan efisiensi(Ismail et al., 2018).

IBC merupakan pengembangan lebih lanjut dari *boost* konverter konvensional, dimana terdiri dari beberapa *boost* konverter yang dihubungkan secara paralel dengan proses *interleaving* atau pergeseran modulasi lebar pulsa sebesar 180° (Candra & Pratomo, 2020; Jati et al., 2020). Konsep ini memungkinkan arus dari beberapa *boost* konverter didistribusikan secara merata, sehingga mengurangi riak arus *input* dan *output*(Jati et al., 2020). Sehingga dalam penggunaannya untuk pengisian baterai, IBC dapat meningkatkan efisiensi pengisian karena kemampuannya yang dapat mengurangi riak arus yang diterima oleh baterai selama melakukan pengisian daya (Raharja et al., 2021). Agar dapat mengoptimalkan konversi daya untuk pengisian baterai, maka diperlukan teknik pengendalian yang tepat pada IBC. Pengendalian menggunakan kontrol PID sering digunakan pada konverter daya seperti IBC. Kontrol PID merupakan teknik pengendalian dengan mekanisme yang menggunakan umpan balik sistem(Yatipai et al., 2024). Prinsip kerja kontrol PID yaitu dengan mengatur keluaran sistem secara optimal berdasarkan *error* antara nilai *set point* dengan nilai aktual dari sistem(Nizar et al., 2021). Namun, kontrol PID masih memiliki kekurangan pada kemampuannya dalam menangani sistem yang lebih kompleks dan dinamis(Irmawan & Eko Prasetyo, 2020). Untuk mengatasi kekurangan tersebut maka digunakan teknik pengendalian menggunakan kontrol *state feedback*. Kontrol ini memiliki keunggulan dari kontrol PID, karena kontrol *state feedback* akan menggunakan informasi dari seluruh sistem yang dapat menyesuaikan parameter kontrol yang lebih akurat sehingga dapat mempertahankan kinerja pada sistem agar tetap optimal(Mangkusasmito & Nugroho, 2019; Martin, 2021). Dengan menggunakan teknik pengendalian kontrol *state feedback* dapat mengoptimalkan kinerja IBC yang lebih efisien dan stabil untuk pengisian baterai(Wiryajati et al., 2024).

Penelitian ini bertujuan untuk menguji IBC pada rangkaian *open loop* dan *close loop* yang menggunakan kontrol PID dan *state feedback*. Pengujian akan dilakukan dengan simulasi yang menggunakan *software simulink* MATLAB. Hal ini dilakukan untuk melihat tegangan *output* yang dihasilkan oleh IBC pada kondisi rangkaian *open loop* serta pada rangkaian *close loop* yang menggunakan kontrol PID dan *state feedback*. Sehingga diharapkan tegangan *output* yang dihasilkan dapat lebih stabil untuk pengisian baterai.

## 2. METHODS

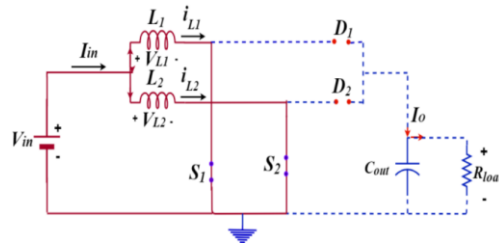
*State space* merupakan representasi matematis yang digunakan untuk memodelkan sistem dinamis dalam bentuk persamaan diferensial linier. Pada sistem IBC representasi matematis ini digunakan untuk menganalisis dinamika dari sistem IBC dalam bentuk vektor keadaan, masukan (*input*) dan keluaran (*output*). Pada pendekatan *state space* dimodelkan melalui serangkaian persamaan diferensial linier yang kemudian diubah menjadi bentuk matriks. Tabel 1 Menunjukkan secara umum model *state space* dapat membantu memahami hubungan antara variabel internal sistem dan respons sistem terhadap masukan yang diberikan untuk menghasilkan keluaran yang diinginkan. Pada IBC memiliki beberapa mode operasi, model ini mencakup berbagai kondisi pensaklaran sehingga dapat menghasilkan beberapa konfigurasi matriks yang berbeda untuk setiap mode operasinya.

Tabel 1 Mode operasi IBC

Mode Operasi	Kondisi Saklar	Kondisi Dioda
Mode operasi 1	S1 on dan S2 on	D1 off dan D2 off
Mode Operasi 2	S1 on dan S2 off	D1 off dan D2 on
Mode Operasi 3	S1 off dan S2 on	D1 on dan D2 off
Mode Operasi 4	S1 off dan S2 off	D1 on dan D2 on

### a. Mode Operasi Pertama

Gambar 1 adalah mode rangkaian mode operasi pertama pada sistem *interleaved boost converter* (IBC).



**Gambar 1 Mode operasi pertama *interleaved boost converter* (IBC) (Faraj & Hussein, 2020).**

Pada mode ini kedua dioda (D1 dan D2) akan mengalami bias mundur yang disebabkan oleh saklar yang tertutup. Sehingga kedua induktor (L1 dan L2) akan terhubung langsung dengan tegangan sumber yang menyebabkan induktor akan menyimpan energi dalam bentuk energi magnetik. Dalam kondisi ini semua arus akan mengalir melalui negatif saklar, maka beban (R) dapat diabaikan karena tidak mendapatkan suplai energi. Sehingga tegangan *output* yang dihasilkan akan bernilai nol. Berikut adalah model matematisnya :

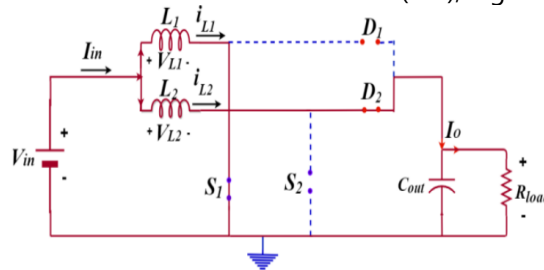
$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{V_{L1}}{L_1}, \frac{di_{L2}}{dt} = \frac{V_{L2}}{L_2} \text{ dan } \frac{dv_C}{dt} = \frac{-V_O}{RC} \quad (1)$$

Sehingga akan dihasilkan model *state space* dalam bentuk matriks seperti berikut :

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \text{ dan } B_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ \frac{1}{L_2} \\ 0 \end{bmatrix}$$

b. Mode Operasi Kedua

Pada mode operasi kedua pada sistem *interleaved boost converter* (IBC), digambarkan seperti pada gambar 2.



**Gambar 2 Mode operasi kedua *interleaved boost converter* (IBC) (Faraj & Hussein, 2020)**

Pada mode ini dioda D1 akan mengalami bias mundur sehingga induktor L1 akan terhubung langsung dengan tegangan sumber. Hal ini menyebabkan beban R dapat diabaikan sehingga tegangan *output* akan bernilai nol selama dioda D1 mengalami bias mundur. Sedangkan dioda D2 akan mengalami bias maju karena induktor L2 mendapatkan pasokan energi dari tegangan sumber, yang membuat induktor L2 terhubung secara seri dengan beban R sehingga terdapat peningkatan arus pada induktor L2 yang menyebabkan tegangan *output* dapat meningkat. Berikut adalah model matematisnya :

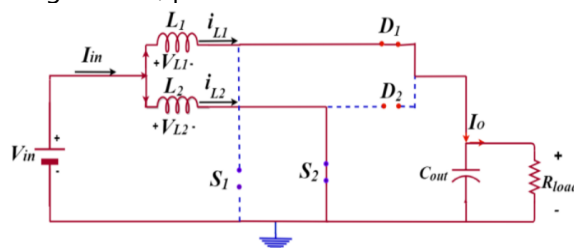
$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{V_{L1}}{L_1}, \frac{di_{L2}}{dt} = \frac{V_2}{L_2} - \frac{V_O}{L_2} \text{ dan } \frac{dv_C}{dt} = \frac{I_{L2}}{C} - \frac{V_O}{RC} \quad (2)$$

Sehingga akan dihasilkan model *state space* dalam bentuk matriks seperti berikut :

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{L_2} \\ 0 & \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \text{ dan } B_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ \frac{1}{L_2} \\ 0 \end{bmatrix}$$

c. Mode Operasi Ketiga

Pada mode operasi ini seperti pada gambar 3, pada sistem *interleaved boost converter* (IBC).



**Gambar 3 Mode operasi ketiga *interleaved boost converter* (IBC) (Faraj & Hussein, 2020).**

Pada mode ini dioda D1 akan mengalami bias maju karena induktor L1 akan mendapat pasokan energi dari tegangan sumber, yang membuat induktor L1 terhubung secara seri dengan beban R sehingga terdapat peningkatan arus pada induktor L1 yang menyebabkan tegangan *output* meningkat. Sedangkan dioda D2 akan mengalami bias mundur sehingga induktor L2 akan terhubung langsung dengan tegangan sumber. Hal ini menyebabkan beban R dapat diabaikan sehingga tegangan *output* akan bernilai nol selama dioda D2 mengalami bias mundur. Berikut adalah model matematisnya :

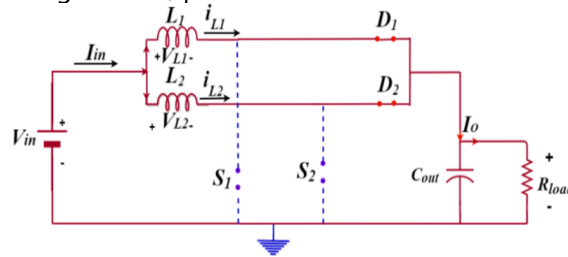
$$\frac{d_i L_1}{d_t} = \frac{V_1}{L_1} - \frac{V_O}{L_1}, \frac{d_i L_2}{d_t} = \frac{V_{L2}}{L_2} \text{ dan } \frac{dV_C}{d_t} = \frac{I_{L1}}{C} - \frac{V_O}{RC} \tag{3}$$

Sehingga akan dihasilkan model *state space* dalam bentuk matriks seperti berikut :

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-1}{L_1} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & 0 & \frac{-1}{RC} \end{bmatrix} \text{ dan } B_3 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ \frac{1}{L_2} \\ 0 \end{bmatrix}$$

d. Mode Operasi Keempat

Pada mode operasi ini seperti pada gambar 4, pada sistem *interleaved boost converter* (IBC)



Gambar 4 Mode operasi keempat *interleaved boost converter* (IBC) (Faraj & Hussein, 2020)

Pada mode ini kedua dioda (D1 dan D2) akan mengalami bias maju yang disebabkan oleh saklar yang terbuka. Pada kondisi ini tegangan sumber akan terhubung secara seri dengan kedua induktor (L1 dan L2) dan beban (R). Maka induktor (L1 dan L2) akan mendapatkan pasokan energi dari tegangan sumber, sehingga terjadi peningkatan arus pada induktor (L1 dan L2) yang menyebabkan tegangan *output* meningkat. Berikut adalah model matematisnya :

$$\frac{d_i L_1}{d_t} = \frac{V_{L1}}{L_1} - \frac{V_O}{L_1}, \frac{d_i L_2}{d_t} = \frac{V_{L2}}{L_2} - \frac{V_O}{L_2} \text{ dan } \frac{dV_C}{d_t} = \frac{I_{L1}}{C} + \frac{I_{L2}}{C} - \frac{V_O}{RC} \tag{4}$$

Sehingga akan dihasilkan model *state space* dalam bentuk matriks seperti berikut :

$$A_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-1}{L_1} \\ 0 & 0 & \frac{-1}{L_2} \\ \frac{1}{C} & \frac{1}{C} & \frac{-1}{RC} \end{bmatrix} \text{ dan } B_4 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ \frac{1}{L_2} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Setelah diketahui model *state space* dari beberapa mode operasi maka didapatkan matriks A, B, C dan D. Sehingga dari matriks tersebut dapat ditotalkan, dimana matriks  $A_{total} = \sum_1^n A_n, B_{total} = \sum_1^n B_n, C_{total} = \sum_1^n C_n$  dan  $D_{total} = \sum_1^n D_n$ .

Dimana :

$$[A_{total}] = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 \text{ dan } [B_{total}] = B_1 + B_2 + B_3 + B_4 \tag{5}$$

Sehingga dapat dituliskan kembali sebagai berikut :

$$[A_{total}] = A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{RC} \end{bmatrix} + A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{L_2} \\ 0 & \frac{1}{C} & \frac{-1}{RC} \end{bmatrix} + A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-1}{L_1} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & 0 & \frac{-1}{RC} \end{bmatrix} + A_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-1}{L_1} \\ 0 & 0 & \frac{-1}{L_2} \\ \frac{1}{C} & \frac{1}{C} & \frac{-1}{RC} \end{bmatrix}$$

$$\text{Maka } [A_{total}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-2}{L_1} \\ 0 & 0 & \frac{-2}{L_2} \\ \frac{2}{C} & \frac{2}{C} & \frac{-4}{RC} \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$[B_{total}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ \frac{1}{L_2} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ \frac{1}{L_2} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ \frac{1}{L_2} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ \frac{1}{L_2} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{Maka } [B_{total}] = \begin{bmatrix} \frac{4}{L_1} \\ \frac{4}{L_2} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$[C_{total}] = [0 \ 0 \ 1] \tag{8}$$

$$[D_{total}] = [0 \ 0 \ 0] \tag{9}$$

Sedangkan untuk persamaan keluaran dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$y = [0 \ 0 \ 1] \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ V_0 \end{bmatrix} + 0 \tag{10}$$

Untuk memudahkan perhitungan yang digunakan pada waktu *on* dan *off*, dimana konduksi akan dipengaruhi oleh *duty cycle*. Berikut adalah persamaan *duty cycle*  $DT = (1 - D)T$ . Sehingga didapat seperti berikut :

$$[A_{total}] = A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-D}{RC} \end{bmatrix} + A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-D}{L_2} \\ 0 & \frac{D}{c} & \frac{-D}{RC} \end{bmatrix} + A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-D}{L_1} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{D}{c} & 0 & \frac{-D}{RC} \end{bmatrix} + A_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-D}{L_1} \\ 0 & 0 & \frac{-D}{L_2} \\ \frac{D}{c} & \frac{D}{c} & \frac{-D}{RC} \end{bmatrix}$$

$$\text{Maka } [A_{total}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-2D}{L_1} \\ 0 & 0 & \frac{-2D}{L_2} \\ \frac{2D}{c} & \frac{2D}{c} & \frac{-4D}{RC} \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$[B_{total}] = \begin{bmatrix} \frac{D}{L_1} \\ \frac{D}{L_2} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{D}{L_1} \\ \frac{D}{L_2} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{D}{L_1} \\ \frac{D}{L_2} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{D}{L_1} \\ \frac{D}{L_2} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{Maka } [B_{total}] = \begin{bmatrix} \frac{4D}{L_1} \\ \frac{4D}{L_2} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{12}$$

$$[C_{total}] = [0 \ 0 \ D] \tag{13}$$

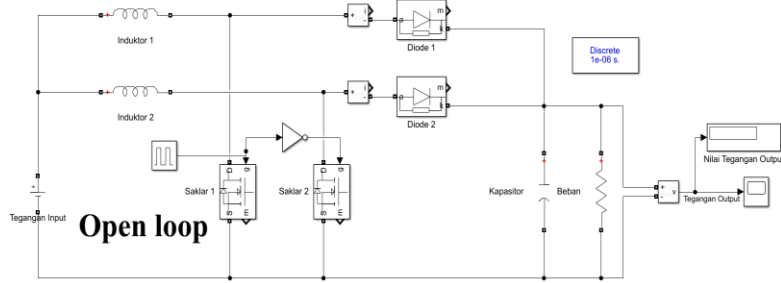
$$[D_{total}] = [0 \ 0 \ 0] \tag{14}$$

### 2.1 Perancangan sistem IBC

Pada penelitian ini sistem IBC akan dirancang dengan menggunakan *simulink* MATLAB dalam bentuk sistem *open loop*. Sebelum melakukan perancangan sistem IBC maka perlu menentukan nilai parameter penyusun yang digunakan dalam untuk simulasi IBC. Pada tabel 2 menunjukkan nilai parameter yang digunakan untuk melakukan perancangan sistem. Setelah menentukan nilai parameter yang digunakan, maka selanjutnya perancangan sistem IBC dapat dilakukan. Berikut ini adalah bentuk sistem IBC dalam kondisi *open loop* :

**Tabel 2 Nilai parameter IBC**

Parameter	Nilai
Tegangan <i>Input</i> ( <i>Vin</i> )	15 V
Tegangan <i>Output</i> ( <i>Vout</i> )	35 V
Induktor	$0,428 \times 10^{-3}$ mH
Kapasitor	$611 \times 10^{-6}$ $\mu$ F
Resistor	7 $\Omega$
Duty Cycle	60%
Frekuensi Switching ( <i>Fs</i> )	10kHz

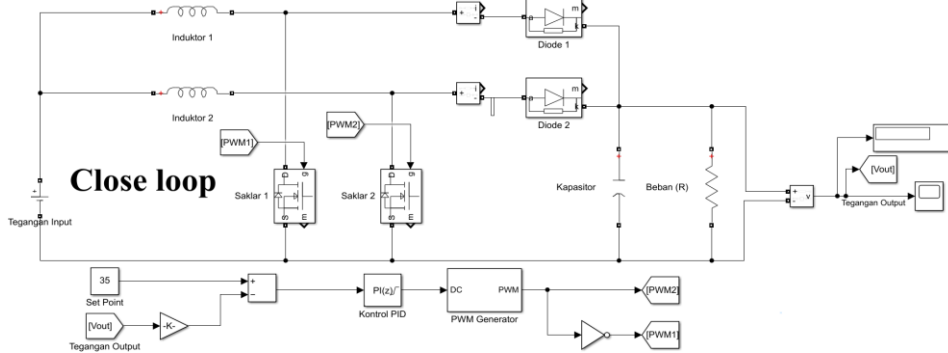


Gambar 5 Rangkaian *open loop* IBC

Pada gambar 5 menunjukkan sistem IBC yang sudah dirancang menggunakan *software simulink* MATLAB. Pada IBC terdapat beberapa komponen penyusun seperti dua buah induktor, dua buah dioda, dua buah saklar, kapasitor dan juga beban (digunakan resistor). Dimana nilai dari setiap parameternya dapat ditunjukkan pada tabel 2.2. Pada IBC menggunakan proses *interleaving* yaitu pergeseran modulasi lebar pulsa sebesar 180°, dimana menggunakan proses pensaklaran yang dihidupkan secara bergantian pada frekuensi tinggi.

**2.2 Perancangan kontrol PID pada sistem IBC**

Pada penelitian ini, akan dilakukan perancangan sistem IBC yang menggunakan kontrol PID. Perancangan sistem ini dilakukan dalam kondisi sistem *close loop*. Pengendalian sistem *close loop* dengan menggunakan kontrol PID menggunakan umpan balik sistem yang berfungsi untuk mengkoreksi selisih nilai antara keluaran sistem yang terukur dengan nilai *set point*, sehingga dapat mencapai tegangan keluaran yang diinginkan.



Gambar 6 Rangkaian *close loop* IBC dengan menggunakan kontrol PID

Gambar 6 menunjukkan sistem IBC yang menggunakan kontrol PID dengan umpan balik sistem. Kontrol ini menggabungkan tiga kontrol utama : *proporsional* ( $K_p$ ), *integral* ( $K_i$ ) dan *derivatif* ( $K_d$ ). Masing-masing kontrol memiliki peran penting dalam mengatur sistem.  $K_p$  berfungsi untuk mempercepat respon sistem dan mengurangi *error*,  $K_i$  dapat mengurangi *overshoot* dan mempercepat *steady state*, sedangkan  $K_d$  dapat memprediksi nilai *error* yang terjadi berdasarkan nilai *error* sebelumnya untuk meningkatkan stabilitas sistem. Secara matematis kontrol PID dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$U(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \tag{15}$$

Dimana :  $K_p$  = Konstanta *proporsional*,  $K_i$  = Konstanta *integral*,  $K_d$  = Konstanta *derivatif*,  $U(t)$  = Sinyal kontrol  
 $E(t)$  = *Error*

**2.3 Perancangan kontrol state feedback pada sistem IBC**

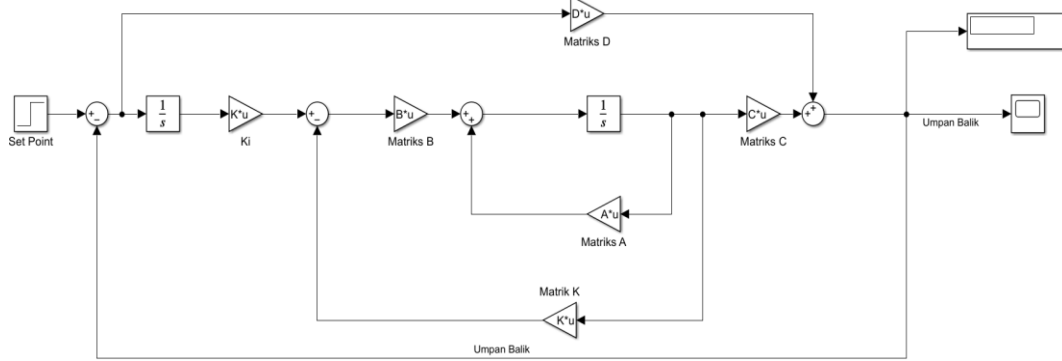
Pada penelitian ini menggunakan kontrol *state feedback*, dimana teknik pengendalian ini menggunakan model *state space* sebagai dasarnya. Pemodelan *state space* ini mengacu pada mode operasi IBC yang sudah dipaparkan. Pada kontrol *state feedback* menggunakan teknik *pole palacement* (penempatan kutub) dengan cara menetapkan *set pole* pada sistem agar mendapatkan hasil respon dinamis yang memuaskan. Untuk mendapatkan *set pole* yang digunakan, nilainya akan diasumsikan dengan menempatakannya pada masukan dan keluaran sistem dalam keadaan *close loop*. Secara matematis kontrol *state feedback* dapat dituliskan seperti berikut :

$$\dot{x} = A_x + B_u \tag{16}$$

$$y = C_x + D_u \tag{17}$$

$$u = -K_x \tag{18}$$

Dimana  $\dot{x}$  merupakan vektor *state*,  $y$  merupakan sinyal keluaran dan  $u$  merupakan sinyal kontrol. Sedangkan variabel A,B,C dan D merupakan matriks sistem dengan dimensi  $n \times n$ . K merupakan matriks *state feedback* dengan dimensi  $1 \times n$ . Sehingga dapat ditunjukkan bentuk sistem IBC dengan menggunakan kontrol *state feedback* :

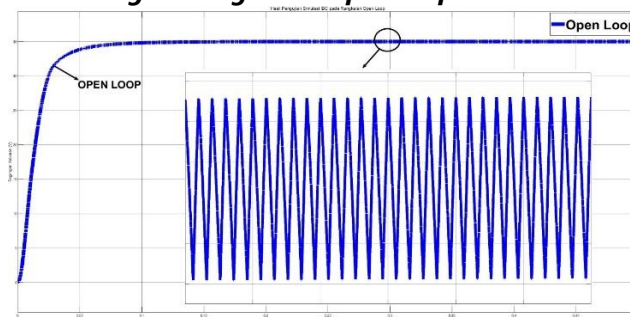


**Gambar 7 Sistem IBC dengan menggunakan kontrol State Feedback**

Pada gambar 7 menunjukkan sistem IBC yang menggunakan kontrol *state feedback*. Pada sistem tersebut matriks A,B,C dan D dapat diumpamakan sebagai sistem IBC sedangkan matriks K sebagai umpan baliknya. Pada *state feedback* setiap variabel terukur akan dijadikan sebagai variabel masukan yang digunakan untuk umpan balik. Selanjutnya keluaran yang dihasilkan oleh skema tersebut dapat mencapai nilai yang diinginkan dengan cara mengatur matriks umpan baliknya.

### 3. RESULT AND DISCUSSION

#### 3.1 Hasil Pengujian Simulasi IBC dengan Rangkaian Open loop



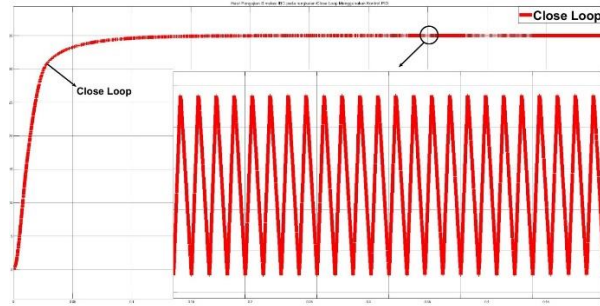
**Gambar 3.1 Hasil Pengujian IBC pada rangkaian open loop**

Berdasarkan hasil pengujian IBC pada rangkaian *open loop* dapat dianalisa bahwa tegangan keluaran yang dihasilkan sebesar 35V. Hal ini menunjukkan bahwa hasil pengujian IBC pada rangkaian *open loop* dapat mencapai tegangan keluaran yang diinginkan, dengan waktu respon yang cepat sebesar 24,036 ms dan laju perubahan tegangan *output* sebesar 1,153 V/ms, serta memiliki *overshoot* sebesar 0,310%. Namun terdapat *ripple* yang besar pada *output* yang mengindikasikan adanya fluktuasi yang tidak diinginkan. *Ripple* ini dapat mempengaruhi kualitas serta stabilitas tegangan *output* yang digunakan untuk melakukan pengisian baterai.

**Tabel 3.1 Hasil Pengujian IBC pada rangkaian openloop**

Performa	Nilai
Rise Time (s)	24,036 ms
Slew Rate (V/s)	1,153 V/ms
Overshoot (%)	0,310%

#### 3.2 Hasil Pengujian Simulasi IBC dengan Rangkaian Close loop Menggunakan Kontrol PID



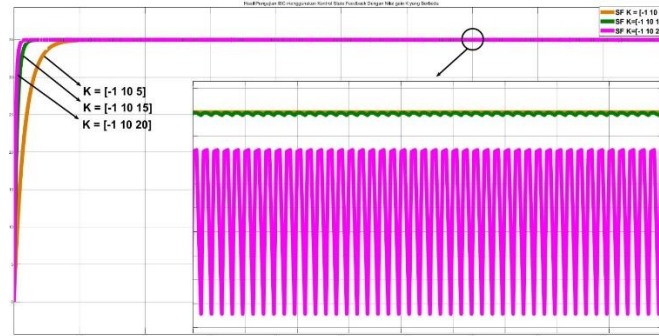
**Gambar 3.2 Hasil Pengujian IBC pada rangkaian *close loop* menggunakan kontrol PID**

Berdasarkan hasil pengujian IBC menggunakan kontrol PID pada rangkaian *close loop* dapat dianalisa bahwa tegangan keluaran yang dihasilkan sebesar 35V. Hal ini menunjukkan bahwa pengujian rangkaian *close loop* menggunakan kontrol PID dapat mencapai tegangan keluaran yang diinginkan, namun dengan waktu respon yang lebih lama dari *open loop* yaitu sebesar 26,730 ms, selain itu terdapat laju perubahan tegangan *ouput* sebesar 1,037 V/ms, serta nilai *overshoot* sebesar 0,248%. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan kontrol PID pada rangkaian *close loop* membutuhkan waktu respon yang lebih lama dibandingkan dengan rangkaian *open loop* namun dapat mengurangi besarnya *overshoot* pada IBC. Jika diperhatikan, masih terdapat *ripple* pada tegangan keluaran IBC yang menggunakan kontrol PID. Sehingga dengan menggunakan kontrol PID pada IBC masih kurang maksimal untuk mengurangi *ripple* yang dapat mempengaruhi efisiensi dan stabilitas pada pengaplikasiannya untuk pengisian baterai.

**Tabel 3.2 Hasil Pengujian IBC pada rangkaian *close loop* menggunakan kontrol PID**

Performa	Nilai
Rise Time (s)	26,730ms
Slew Rate (V/s)	1,037 V/ms
Overshoot (%)	0,248%

### 3.3 Hasil Pengujian Simulasi IBC dengan Menggunakan Kontrol *State feedback*



**Gambar 3.2 Hasil Pengujian IBC menggunakan kontrol *state feedback***

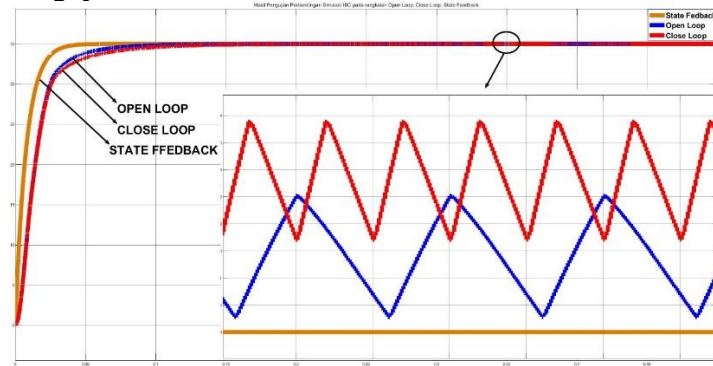
Berdasarkan hasil pengujian IBC menggunakan kontrol *state feedback* yang dilakukan dengan variasi nilai K, dapat dianalisa bahwa tegangan keluaran yang dihasilkan sebesar 35V. Hal ini membuktikan bahwa pengendalian IBC menggunakan kontrol *state feedback* dapat mencapai tegangan keluaran yang diinginkan. Pada penelitian ini digunakan nilai matriks gain K yang berbeda yaitu  $K_1 = [-1 \ 10 \ 5]$ ,  $K_2 = [-1 \ 10 \ 15]$  dan  $K_3 = [-1 \ 10 \ 20]$ . Pada  $K_1$  dapat menghasilkan tegangan yang diinginkan dengan waktu respon sebesar 16,529 ms dan laju perubahan tegangan *output* sebesar 8,469 V/ms, serta nilai *overshoot* sebesar 0,994%. Pada  $K_2$  memiliki waktu respon sebesar 4,779 ms dan laju perubahan tegangan *output* sebesar 5,8 V/ms, serta *overshoot* sebesar 0,497%. Sedangkan  $K_3$  memiliki nilai waktu respon sebesar 2,485 ms dengan laju perubahan tegangan *output* sebesar 11,152 V/ms dan *overshoot* sebesar 0,501%. Dengan variasi nilai matriks *gain* K didapatkan bahwa semakin besar nilai matriks *gain* K yang digunakan maka nilai waktu respon sistem akan semakin besar namun memiliki fluktuasi tegangan *output* yang besar, sedangkan semakin kecil nilai matriks *gain* K yang digunakan maka nilai tegangan *output* yang dihasilkan akan lebih stabil walaupun membutuhkan waktu respon yang lebih lama. Dari simulasi yang dilakukan menggunakan kontrol *state feedback* tidak memiliki *ripple* pada tegangan keluarannya, sehingga terbukti bahwa kontrol ini dapat meningkatkan efisiensi dan stabilitas pada pengisian baterai namun dengan menggunakan nilai K yang tepat.



**Tabel 3.3 Hasil Pengujian IBC menggunakan kontrol *state feedback***

Performa	Nilai		
	SF K = [-1 10 5]	SF K = [-1 10 15]	SF K = [-1 10 20]
Rise Time (s)	16,529 ms	4,779 ms	2,485 ms
Slew Rate (V/ms)	8,469 V/ms	5,8 V/ms	11,152 V/ms
Overshoot (%)	0,994%	0,497%	0,501%

**3.4 Perbandingan Hasil Pengujian Simulasi**



**Gambar 3.2 Perbandingan hasil pengujian simulasi IBC**

Berdasarkan hasil simulasi mengenai perbandingan pengujian IBC pada beberapa rangkaian dapat dianalisa bahwa tegangan keluaran yang dihasilkan dari rangkaian *open loop*, kontrol PID dan *state feedback* bernilai sama yaitu 35V. Namun pada ketiga rangkaian tersebut memiliki karakteristik tegangan keluaran yang berbeda. Pada pengujian IBC menggunakan rangkaian *open loop* tidak menggunakan umpan balik sehingga pengendalian hanya mengandalkan *input* yang tetap dan nilai *duty cycle* saja, sehingga menghasilkan waktu respon yang cepat namun memiliki *ripple* pada tegangan keluarannya karena tidak ada pengendalian untuk mengatur keluaran pada IBC. Sedangkan pada pengujian yang menggunakan kontrol PID pada rangkaian *close loop* menggunakan umpan balik dari *output* sistem sehingga memungkinkan sistem untuk menyesuaikan keluarannya dengan waktu respon yang lebih lama dibandingkan dengan *open loop* dan masih memiliki *ripple* pada keluarannya. Hal ini disebabkan karena *tuning* kontrol PID yang kurang maksimal sehingga keluaran yang dihasilkan memiliki waktu respon yang lebih lama. Namun, pada pengujian yang menggunakan kontrol *state feedback* memberikan respon yang paling cepat dan sangat stabil tanpa adanya *ripple* pada keluarannya. Hal ini disebabkan karena kontrol ini memanfaatkan vektor umpan balik dari seluruh variabel terukur pada sistem, sehingga menjadikannya metode paling efisien dan stabil untuk pengisian baterai.

**Tabel 3.4 Perbandingan hasil pengujian simulasi IBC**

Performa	Nilai		
	<i>Open loop</i>	PID	<i>State feedback</i>
Rise Time (s)	24,036 ms	26,730 ms	16,529 ms
Slew Rate (V/ms)	1,153 V/ms	1,037 V/ms	8,469 V/ms
Overshoot (%)	0,310%	0,248%	0,994%
Max	$35 \times 10^1$	$35 \times 10^1$	$35 \times 10^1$
Min	$1,247 \times 10^{-7}$	$1,247 \times 10^{-7}$	0
Peak to peak	$35 \times 10^1$	$35 \times 10^1$	$35 \times 10^1$
Mean	$3,388 \times 10^1$	$3,379 \times 10^1$	$3,455 \times 10^1$
Median	$35 \times 10^1$	$35 \times 10^1$	$35 \times 10^1$
RMS	$3,420 \times 10^1$	$3,411 \times 10^1$	$3,459 \times 10^1$

**4. CONCLUSION**

Dari penelitian mengenai *interleaved boost converter* (IBC) dengan kontrol *state feedback* untuk pengisian baterai, dapat disimpulkan bahwa pengujian pada rangkaian *open loop* dan *close loop* dengan kontrol PID dan *state feedback* menunjukkan perbedaan yang signifikan dalam karakteristik keluaran. Semua konfigurasi rangkaian

berhasil menghasilkan tegangan keluaran sebesar 35 V sesuai dengan target. Namun, rangkaian *open loop*, meskipun memiliki waktu respon yang cepat, menunjukkan adanya *ripple* pada tegangan keluaran karena tidak menggunakan umpan balik, sehingga hanya mengandalkan nilai *duty cycle* dan *input*. Sementara itu, rangkaian *close loop* dengan kontrol PID memberikan waktu respon yang lebih lama dan *overshoot* yang lebih kecil dibandingkan *open loop*, tetapi masih mengalami *ripple* karena tuning PID yang belum optimal. Sebaliknya, pengujian dengan kontrol *state feedback* menghasilkan tegangan keluaran yang lebih stabil dengan respon sistem yang lebih cepat, yaitu 16,529 ms, dan *overshoot* sebesar 0,994%. Kontrol *state feedback* juga berhasil menghilangkan *ripple* pada tegangan keluaran berkat penggunaan umpan balik dari seluruh variabel sistem, menjadikannya metode yang lebih efektif dalam mencapai stabilitas tegangan keluaran.

## 5. DAFTAR PUSTAKA

- Buntulayuk, H., Samman, F. A., & Yusran, Y. (2018). Rancangan DC-DC Converter untuk Penguatan Tegangan. *Jurnal Penelitian Enjiniring*, 21(2), 78–82. <https://doi.org/10.25042/jpe.112017.12>
- Candra, K., & Pratomo, L. H. (2020). Pengendalian Tegangan Keluaran DC-DC Boost Converter Tipe Voltage Doubler Menggunakan Mikrokontroler STM32F1038CT. *Jurnal Teknik Elektro*, 12(2), 40–46. <https://doi.org/10.15294/jte.v12i2.25662>
- Faraj, K. S., & Hussein, J. F. (n.d.). *State-Space Derivation of Two Phase DC-DC Interleaved Boost Converter*.
- Feriyanto, D., Ubaidah, & Fauzan, A. (2020). Desain Dan Simulasi Cascade Interleaved Boost Converter Menggunakan Kendali Dynamic Evolution Control. *Aisyah Journal Of Informatics and Electrical Engineering (A.J.I.E.E)*, 2(1), 75–82. <https://doi.org/10.30604/jti.v2i1.30>
- Irmawan, E., & Eko Prasetyo, E. (2020). Kendali Adaptif Neuro Fuzzy PID untuk Kestabilan Terbang Fixed Wing UAV (Adaptive Control of Neuro Fuzzy PID for Fixed Wing UAV Flight Stability). *Jurnal Nasional Teknik Elektro Dan Teknologi Informasi*, 9(1), 73–78. <https://doi.org/10.22146/jnteti.v9i1.142>
- Ismail, F., Warmi, Y., & M Nur Putra, A. (2018). Perbaikan Performa DC-Link Inverter Satu Fasa Menggunakan Interleaved DC-DC Boost Konverter pada Aplikasi Photovoltaics. *Jurnal Teknik Elektro ITP*, 7(1), 74–78. <https://doi.org/10.21063/jte.2018.3133711>
- Jati, M. P., Basuki, G., & Hasnira, H. (2020). Kendali Fuzzy Logic - Interleaved Boost Converter pada Aplikasi Motor DC. *Elinvo (Electronics, Informatics, and Vocational Education)*, 5(2), 102–111. <https://doi.org/10.21831/elinvo.v5i2.40698>
- Mahendra, M. R., Kurdianto, A. A., & Jauhari, M. (2022). Rancang Bangun Boost Converter Untuk Charging Station Kursi Roda Listrik Dengan Sumber Solar Panel. *Jurnal Techno Bahari*, 9(2), 7–14.
- Mangkusamito, F., & Nugroho, T. H. (2019). Desain Sistem Kendali Umpan Balik State Pada Kasus Kontinyu Untuk Meja Kerja Cnc. *Gema Teknologi*, 20(2), 32. <https://doi.org/10.14710/gt.v20i2.22641>
- Martin, M. (2021). Sistem kendali posisi motor DC menggunakan state feedback controller dan real-time operating system. *JITEL (Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Elektronika, Dan Listrik Tenaga)*, 1(1), 69–78. <https://doi.org/10.35313/jitel.v1.i1.2021.69-78>
- Nizar, T. N., Jatmiko, D. A., Hartono, R., & Pratama, A. I. G. (2021). Implementasi dan Uji Kinerja Kontrol PID untuk kestabilan Pesawat Tanpa Awak Tailsitter pada Keadaan Mengambang. *Komputika: Jurnal Sistem Komputer*, 10(1), 53–59. <https://doi.org/10.34010/komputika.v10i1.3808>
- Raharja, L. P. S., Eviningsih, R. P., Ferdiansyah, I., & Yanaratri, D. S. (2021). Penggunaan Daya Panel Surya Dengan MPPT Bisection Pada Proses Charging Baterai. *JTT (Jurnal Teknologi Terpadu)*, 9(1), 24–33. <https://doi.org/10.32487/jtt.v9i1.957>
- Wirayajati, I. K., Satiawan, I. N. W., Citarsa, I. B. F., Budi, I. M., Suksmadana, S., & Supriono, S. (2024). Simulasi Dan Analisis Model Matematika Three State Buck-Boost Converter (Tbbc) Dengan Kendali State Feedback. *Prosiding SAINTEK*, 6(November 2023), 83–91. <https://doi.org/10.29303/saintek.v6i1.922>
- Yatipai, M., Subairi, S., & Dirgantara, W. (2024). Pengaturan Motor DC Menggunakan Tuning PID Zigler Nichols Sebagai Media Pembelajaran Interaktif; *Energy: Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Teknik*, 14(1), 66–74. <https://doi.org/10.51747/energy.v14i1.1961>