



## Investigasi *Interleaved Boost Converter* menggunakan kontroler *Linear Quadratic Regulator (LQR)*

Ade safitra<sup>1</sup>, I Ketut Wiryajati<sup>2✉</sup>, I Made Ari Nratha<sup>3</sup>

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

DOI: 10.31004/jutin.v7i4.34578

✉ Corresponding author:  
[kjiawiryajati@unram.ac.id]

Article Info	Abstrak
<p><i>Kata kunci:</i> <i>Interleaved Boost Converter;</i> <i>PID;</i> <i>Linier Quadratik Regulator(LQR);</i></p>	<p>Converter DC-DC Boost memiliki peran penting dalam aplikasi energi terbarukan dan kendaraan listrik, berfungsi untuk meningkatkan tegangan output dari sumber yang bertegangan rendah. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja Interleaved Boost Converter dengan kontrol Linear Quadratic Regulator (LQR) dibandingkan dengan kontrol open loop dan PID. Metode penelitian melibatkan desain dan simulasi converter menggunakan MATLAB/Simulink, di mana berbagai konfigurasi kontrol diuji untuk menilai kemampuan mengatur tegangan output. Hasil simulasi menunjukkan bahwa Interleaved Boost Converter dengan kontrol LQR menghasilkan tegangan keluaran stabil sebesar 28 volt dengan waktu respon tercepat (9.629 <math>\mu</math>s) dan tanpa overshoot. Sementara itu, kontrol PID menunjukkan tegangan keluaran 28.46 volt dengan overshoot maksimum 0.510% dan waktu respon lebih lambat (25.177 <math>\mu</math>s). Konfigurasi open loop, meskipun memiliki waktu respon tercepat (19.768 <math>\mu</math>s), menghasilkan ripple tegangan yang signifikan. Kesimpulan dari penelitian ini menekankan bahwa kontrol LQR lebih unggul dalam hal stabilitas dan respons cepat, direkomendasikan untuk aplikasi yang membutuhkan kinerja tinggi. Penelitian lebih lanjut diusulkan untuk optimasi parameter kontrol PID dan evaluasi performa LQR pada kondisi beban dinamis.</p>
<p><i>Keyword:</i> <i>Interleaved Boost Converter;</i> <i>PID;</i> <i>Linier Quadratik Regulator(LQR);</i></p>	<p><b>Abstract</b></p> <p>The Boost DC-DC Converter plays a significant role in renewable energy applications and electric vehicles, serving to increase the output voltage from low-voltage sources. This study aims to analyze the performance of the Interleaved Boost Converter with Linear Quadratic Regulator (LQR) control compared to open loop and PID control. The research methodology involves designing and simulating the converter using MATLAB/Simulink, where various control configurations are tested to assess their ability to regulate output voltage. Simulation results show that the Interleaved Boost Converter with LQR control produces a stable output voltage of 28 volts with the fastest response time (9.629 <math>\mu</math>s).</p>

$\mu\text{s}$ ) and no overshoot. In contrast, the PID control configuration delivers an output voltage of 28.46 volts with a maximum overshoot of 0.510% and a slower response time (25.177  $\mu\text{s}$ ). The open loop configuration, despite having the fastest response time (19.768  $\mu\text{s}$ ), results in significant voltage ripple. The conclusion of this study emphasizes that LQR control is superior in terms of stability and quick response and is recommended for applications requiring high performance. Future research is suggested to focus on optimizing PID control parameters and evaluating LQR performance under dynamic load conditions.

---

## 1. PENDAHULUAN

*Converter* DC-DC diterapkan dalam berbagai bidang, termasuk sumber energi terbarukan, kendaraan listrik, catu daya, dan microgrid (View of Pemodelan Dinamis Dan Kendali Multi-Loop Converter DC-DC Boost Dengan Pengendali PI.Pdf, n.d.). Karena sebagian besar energi terbarukan menghasilkan tegangan keluaran yang rendah, diperlukan *converter* untuk meningkatkan tegangan agar mencapai nilai yang diinginkan (Mazta et al., 2016). *Converter* DC-DC memungkinkan penyesuaian sistem DC dengan menaikkan atau menurunkan tegangan keluaran terhadap tegangan masukan (Buntulayuk et al., 2018). *Converter* DC-DC terdiri dari beberapa jenis, yaitu *Boost* untuk meningkatkan tegangan, *Buck* untuk menurunkan tegangan, dan *Buck-Boost* yang berfungsi sebagai peningkat maupun penurun tegangan (Diusti Dwi Putri & Aswardi, 2020) (Nurchahyo et al., 2023) (Wahyuni et al., 2024).

*Converter* DC-DC *Boost* merupakan *Converter* ini berfungsi untuk menghasilkan tegangan keluaran yang lebih tinggi dari tegangan masukan. Namun, pada *boost converter* konvensional, terdapat *ripple* yang cukup signifikan pada arus masukan dan tegangan keluaran. *Ripple* tersebut menjadi masalah yang dapat menurunkan keandalan *converter*. (Wahyuni et al., 2024) (Elfani & Sasmoko, 2016). Untuk mengatasi masalah ini, diperlukan metode perbaikan dengan melakukan modifikasi pada rangkaian *boost converter* terhubung secara *Interleaved* untuk mengurangi *ripple* arus *input* dan *output* (Feriyanto et al., 2020).

*Converter Interleaved Boost* menunjukkan keunggulan dalam mengatasi *ripple* yang cukup besar pada konversi daya dengan cara menggabungkan dua *Boost converter* yang di hubungkan secara paralel dan dikendalikan oleh dua sinyal kontrol yang memiliki perbedaan fasa sebesar 180 derajat di antara keduanya. (Mazta et al., 2016). Kontrol pada *converter Boost* konvensional umumnya dilakukan menggunakan teknik pengendalian umpan balik sederhana seperti kontrol PI (*Proportional-Integral*). Metode ini, meskipun efektif dalam berbagai aplikasi, sering kali memiliki keterbatasan dalam hal kecepatan respon dan kemampuan untuk merespon terhadap perubahan beban dan gangguan eksternal. Kontrol PI dapat mengalami kesulitan dalam mempertahankan stabilitas sistem ketika terdapat variasi yang signifikan dalam parameter sistem atau kondisi operasi.

Penggunaan *kontroller* PI dan *State feedback* menjadikan ide dasar untuk mengembangkan *converter* berbasis matrik yang kemudian menjadikannya model yang dapat di kembangkan melalui kendali *Linier Quadratic Regulator* dengan nilai konstanta yang sangat menentukan hasil dari keluaran sistem. (Wiryajati et al., 2024), Namun demikian pengembangan model *State Space* terus dikembangkan dengan membandingkan dengan kontrol lain yang berbasis model *State Space*.

Sebagai perbandingan, kontrol *Linear Quadratic Regulator* (LQR) menawarkan pendekatan yang optimal dalam mengelola dinamika sistem konversi daya. LQR adalah metode kontrol optimal yang dirancang untuk meminimalkan fungsi biaya kuadratik, yang secara efektif menyeimbangkan antara performa dan penggunaan energi (FATHONI & UTOMO, 2019). Dalam *Interleaved Boost converter*, penerapan LQR dapat menghasilkan kinerja yang lebih baik dalam hal respons transien, stabilitas, dan efisiensi keseluruhan (Casro et al., 2017).

Desain kontrol optimal menggunakan LQR didasarkan pada pemanfaatan indeks kinerja kuadratik, yang menyederhanakan proses penentuan elemen-elemen dalam matriks  $K$ . Matriks  $K$  pada sistem kendali ini diperoleh melalui penyelesaian persamaan *Riccati*, yang melibatkan matriks pembobotan  $Q$  yang semi definit positif, matriks pembobotan  $R$  yang definit positif, serta variabel keadaan sebagai *input*. Dibandingkan dengan algoritma PID, kontrol LQR memiliki keunggulan dalam meminimalkan kesalahan dengan mengoptimalkan kinerja sistem. (Casro et al., 2017). Efektivitas kontrol LQR dalam mengatur tegangan keluaran *converter* DC-DC, termasuk *converter Boost*, telah dibuktikan pada penelitian sebelumnya (Koundi et al., 2022) Namun, penerapan kontrol LQR pada kasus spesifik *converter Boost* yang disisipkan belum dieksplorasi secara luas.

Penelitian ini bertujuan untuk berkontribusi pada literatur yang ada dengan menyajikan analisis komprehensif tentang *converter Boost Interleaved* dengan kontrol LQR, termasuk pemodelan, desain pengontrol, dan evaluasi kinerja.

**2. METODE PENELITIAN**

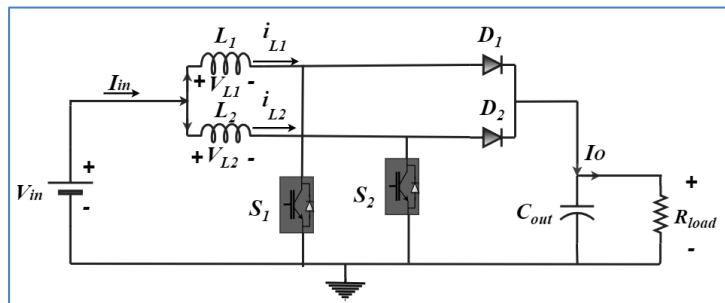
Metodologi penelitian ini melibatkan perancangan dan simulasi *Interleaved Boost Converter* menggunakan MATLAB/Simulink untuk mengevaluasi kinerja di bawah konfigurasi kontrol yang berbeda: *open-loop*, kontrol *Proportional Integral Derivative (PID)*, dan *Linear Quadratic Regulator (LQR)*. Adapun langkah-langkah yang diambil adalah sebagai berikut:

**Langkah Pertama** Perancangan sistem *interleaved boost converter*. Converter dirancang dengan spesifikasi berikut: tegangan *input* 10V, tegangan *output* 28V, induktor masing-masing 0,765 mH, kapasitor 47,5  $\mu$ F, resistor 24 Ohm, dan frekuensi *switching* 20 kHz. Secara detail ditampilkan pada Tabel 1. Model tersebut dibangun di Simulink untuk mensimulasikan berbagai kondisi operasi. Perancangan sistem *interleaved boost converter* dilakukan dengan membuat rangkaian di SIMULINK MATLAB, serta memilih parameter yang diperlukan untuk mensimulasikan *converter*(Deshpande et al., 2021).

**Tabel 1 Spesifikasi IBC**

Parameter	Nilai	unit
Tegangan <i>Input</i>	10	V
Tegangan <i>output</i>	28	V
Induktor1	0.765	mH
Induktor2	0.765	mH
Resistor	24	Ohm
Capasitor	47.5	$\mu$ F
Frekuensi	20	kHz

*Interleaved Boost Converter* dapat beroperasi dalam empat mode yang berbeda. Pada mode pertama, *switch* S1 dan S2 dalam kondisi tertutup. Pada mode kedua, *switch* S1 tertutup sementara S2 terbuka. Pada mode ketiga, *switch* S1 terbuka sedangkan S2 tertutup. Pada mode keempat, kedua *switch* S1 dan S2 berada dalam kondisi tertutup, ditunjukkan pada tabel (2)(Deshpande et al., 2021).



**Gambar 1 Openloop interleaved boost converter** (Faraj & Farhood, 2020)

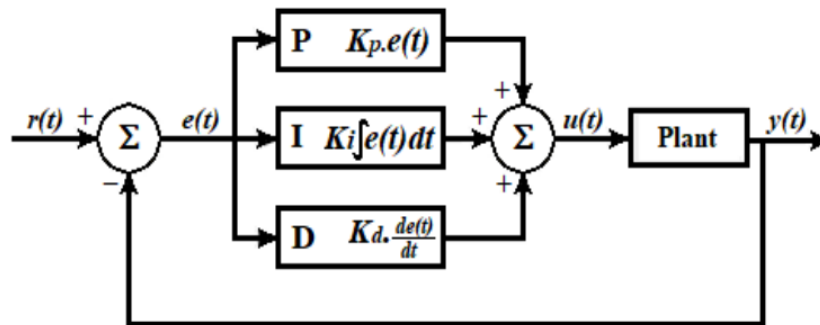
**Tabel 2 Mode Operasi DC-DC IBC**

Mode operasi	Kondisi dioda IBC
Mode 1: S1 On&S2 On	D1, D2 Off
Mode 2: S1 On&S2 Off	D1 Off, D2 On
Mode 3: S1 Off&S2 On	D1 On, D2 Off
Mode 4: S1 Off&S2 Off	D1, D2 On

**Langkah Kedua** Pada tahap ini, akan dirancang sebuah pengendali loop tertutup (*Closetloop*) untuk *Interleaved boost converter* menggunakan pengontrol PID. Mekanisme pengendalian pada pengontrol PID mencakup siklus umpan balik yang berfungsi untuk mengoreksi selisih nilai antara keluaran sistem yang diukur dan nilai *set point* yang telah ditentukan sebelumnya. Perbedaan nilai tersebut dihitung untuk memberikan aksi pengendalian guna mencapai nilai *set point* yang diinginkan.

Pengontrol PID terdiri dari tiga parameter utama, yaitu *gain proporsional* ( $K_p$ ), *gain integral* ( $K_i$ ), dan *gain derivatif* ( $K_d$ ). Desain dan rancangan secara rinci ditujukan pada Gambar 6 (Samosir et al., 2023).

$$U(s) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \tag{1}$$



Gambar 6 PID Controller blok diagram (Samosir et al., 2023)

Tabel 3 Parameter PID

PID	Nilai
Gain Proporsional ( $K_p$ )	1
Gain Intergral ( $K_i$ )	0.01
Gain derivatif ( $K_d$ )	0.05

**Langkh Ketiga** Desain kontrol LQR. *Linear Quadratic Regulator* (LQR) diterapkan untuk meminimalkan variabel keadaan *converter*. Representasi *State-Space* sistem diturunkan untuk menyelesaikan persamaan *Riccati* dan memperoleh matriks gain optimal  $K$ . Strategi kontrol berbasis LQR kemudian diintegrasikan ke dalam sistem *converter*, dan kinerjanya diukur bawah kondisi yang sama dengan konfigurasi PID dan *open-loop*. Persamaan ini melibatkan variabel *input*, *output*, dan *State variable* (Siva Kumar & Mallikarjuna Rao, 2020) (Reis et al., 2011):

$$\dot{X} = Ax + Bu \text{ dan } y = Cx + Du \tag{2}$$

Di mana:  $A$  merepresentasikan matriks keadaan,  $B$  merupakan matriks input,  $C$  adalah matriks *output*,  $D$  adalah matriks transmisi langsung,  $x$  adalah vektor keadaan,  $u$  adalah vektor input, dan  $y$  merupakan vektor *output*.

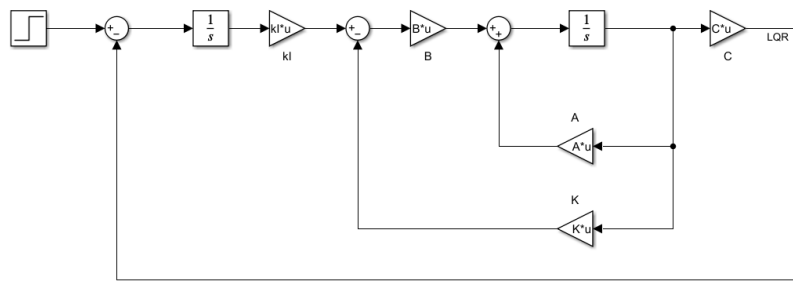
Tujuan dari metode LQR (*Linear Quadratic Regulator*) adalah untuk mengatur keluaran  $y$  menjadi nol sambil meminimalkan penggunaan input. Hal ini di capai dengan merancang *feedback* gain  $K$  yang bertujuan meminimalkan fungsi biaya (*Cost Function*). Fungsi biaya ini berupa interal terhadap waktu dari bentuk kuadratis pada vektor keadaan  $x$  dan vektor masukan  $u$ , seperti yang di jelaskan dalam persamaan indeks performansi berikut (Casro et al., 2017):

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \tag{3}$$

Dimana:  $Q$  merupakan matriks simetris yang bersifat semi-definit positif dan  $R$  adalah matriks simetris.

LQR mengontrol *plant* atau proses dengan memanfaatkan kombinasi linier dari variabel-variabel keadaan *plant* tersebut. Oleh karena itu, LQR memerlukan akses ke seluruh variabel keadaan dalam *plant* agar kontrol dapat dilakukan dengan baik (baik melalui pengukuran langsung maupun akses data). Jika tidak semua variabel keadaan tersebut tersedia, LQR dapat dilengkapi dengan observer atau estimator untuk memperkirakan variabel yang tidak dapat diukur secara langsung, berdasarkan model *plant* dan keluaran yang dapat diukur. Desain model LQR secara rinci ditunjukkan pada Gambar 7

$$u = -Kx \tag{4}$$



**Gambar 7 Closeloop Linier Quadratic Regulator**

Berdasarkan persamaan keadaan sistem dan indeks performa yang digunakan, diperoleh nilai matriks  $K$  yang optimal sesuai dengan indeks performa yang telah dipilih.

$$k = R^{-1}B^T P \tag{5}$$

Matriks umpan balik  $K$  dihitung melalui penyelesaian persamaan aljabar *Riccati*. Berdasarkan persamaan (4), matriks  $K$  dapat diperoleh dengan menyelesaikan persamaan *Riccati* tersebut.

$$A^T * P + PA - PBR^{-1}B^T * P + Q = 0 \tag{6}$$

**Tahap Keempat** Kinerja konverter pada ketiga konfigurasi dievaluasi berdasarkan metrik utama: waktu naik (*rise time*), *overshoot* maksimum, *error steady state*, dan *ripple* tegangan *output*. Hasil simulasi untuk setiap konfigurasi dicatat dan dibandingkan dalam hal kemampuannya mengatur tegangan *output* di bawah kondisi *input* konstan. Selanjutnya Hasil dari konfigurasi *open-loop*, PID, dan LQR ditabulasikan untuk dibandingkan. Kinerja konfigurasi LQR, terutama dalam hal stabilitas dan meminimalkan *overshoot*, dianalisis secara kritis untuk menentukan kelayakannya dalam aplikasi praktis

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

*Interleaved boost converter* memiliki 4 mode operasi yang dapat dimodelkan menggunakan persamaan *State Space* di antaranya ;

Kondisi pertama di mulai saat switch S1 tertutup dan switch S2 tertutup kondisi pertama seperti pada:

$$X = A_1x + B_1u \tag{7}$$

$$x = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ V_c \end{bmatrix} \tag{8}$$

Sehingga dihasilkan matrix 3x3 seperti berikut ini:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{RC} \end{bmatrix} \text{ dan } B_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ \frac{1}{L_2} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{9}$$

Pada kondisi kedua, kedua *switch* S1 tertutup dan S2 terbuka:

$$X = A_2x + B_2u \tag{10}$$

Sehingga didapatkan matrix 3x3 seperti berikut ini:

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{L_2} \\ 0 & \frac{1}{C} & \frac{-1}{RC} \end{bmatrix} \text{ dan } B_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ \frac{1}{L_2} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{11}$$

Pada kondisi ketiga, switch S1 terbuka sedangkan switch S2 tertutup:

$$X = A_3x + B_3u \tag{12}$$

Sehingga didapatkan matrix 3x3 seperti berikut:

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-1}{L_1} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & 0 & \frac{-1}{RC} \end{bmatrix} \text{ dan } B_3 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ \frac{1}{L_2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Kondisi keempat sama seperti pada kondisi kedua. Pada kondisi keempat, kedua switch S1 dan S2 dalam keadaan terbuka:

$$X = A_4x + B_4u \quad (14)$$

Sehingga didapatkan matrix 3x3 seperti berikut:

$$A_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-1}{L_1} \\ 0 & 0 & \frac{-1}{L_2} \\ \frac{1}{C} & \frac{1}{C} & \frac{-1}{RC} \end{bmatrix} \text{ dan } B_4 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ \frac{1}{L_2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Dari 4 mode di atas, diperoleh matriks A, B, C, dan D. Matriks-matriks tersebut kemudian dijumlahkan, sehingga didapatkan.  $A_{total} = \sum_1^n A_n$ , matriks  $B_{total} = \sum_1^n B_n$ ,  $C_{total} = \sum_1^n C_n$  dan  $D_{total} = \sum_1^n D_n$ .

Dimana :

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

Sehingga dapat dituliskan kembali sebagai berikut :

$$[A_{total}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{RC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{L_2} \\ 0 & \frac{1}{C} & \frac{-1}{RC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-1}{L_1} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & 0 & \frac{-1}{RC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-1}{L_1} \\ 0 & 0 & \frac{-1}{L_2} \\ \frac{1}{C} & \frac{1}{C} & \frac{-1}{RC} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\text{Maka } [A_{total}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{2}{L_1} \\ 0 & 0 & \frac{-2}{L_2} \\ \frac{2}{C} & \frac{2}{C} & \frac{-4}{RC} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$[B_{total}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ \frac{1}{L_2} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ \frac{1}{L_2} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ \frac{1}{L_2} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ \frac{1}{L_2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\text{Maka } [B_{total}] = \begin{bmatrix} \frac{4}{L_1} \\ \frac{4}{L_2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$[C_{total}] = [0 \ 0 \ 1] \quad (20)$$

$$[D_{total}] = [0 \ 0 \ 0] \quad (21)$$

Sedangkan untuk persamaan keluaran dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$y = [0 \ 0 \ 1] \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ V_o \end{bmatrix} + 0 \quad (22)$$

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 dapat ditulis sebagai berikut:

$$[A_{total}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-D}{RC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-D}{L_2} \\ 0 & \frac{D}{C} & \frac{-D}{RC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-D}{L_1} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{D}{C} & 0 & \frac{-D}{RC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-D}{L_1} \\ 0 & 0 & \frac{-D}{L_2} \\ \frac{D}{C} & \frac{D}{C} & \frac{-D}{RC} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\text{Maka } [A_{total}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{2D}{L_1} \\ 0 & 0 & \frac{-2D}{L_2} \\ \frac{2D}{c} & \frac{2D}{c} & \frac{-4D}{RC} \end{bmatrix} \tag{24}$$

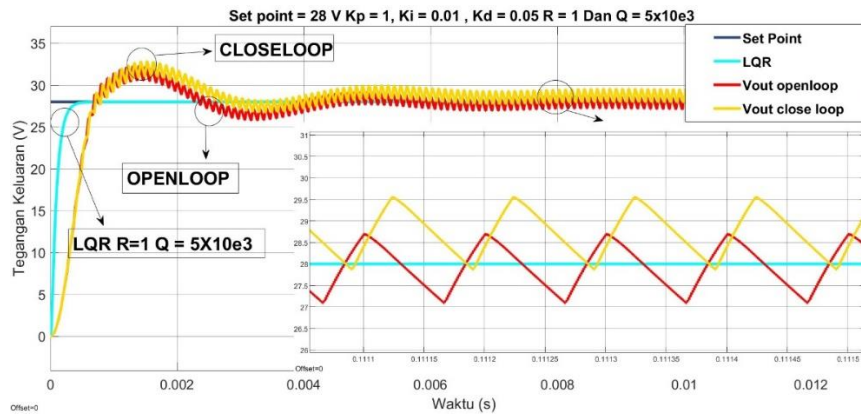
$$[B_{total}] = \begin{bmatrix} \frac{D}{L_1} \\ \frac{D}{L_2} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{D}{L_1} \\ \frac{D}{L_2} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{D}{L_1} \\ \frac{D}{L_2} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{D}{L_1} \\ \frac{D}{L_2} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{25}$$

$$\text{Maka } [B_{total}] = \begin{bmatrix} \frac{4D}{L_1} \\ \frac{4D}{L_2} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{26}$$

$$[C_{total}] = [0 \quad 0 \quad D] \tag{27}$$

$$[D_{total}] = [0 \quad 0 \quad 0] \tag{28}$$

*Interleaved Boost converter* dirancang dan dianalisis menggunakan simulasi MATLAB/Simulink. Fokus utama penelitian ini adalah menciptakan pengontrol yang dapat berfungsi secara optimal dengan membandingkan *Interleaved Boost Converter* pada konfigurasi *Openloop*, PID, dan *Linier Quadratik Regulator*. Parameter-parameter *converter* yang dipertimbangkan meliputi *rise time*, maksimum *peak overshoot*, dan *steady State error*.



**Gambar 8 Hasil Simulasi Tegangan Keluaran Konfigurasi Open loop, PID, dan LQR**

Berdasarkan hasil simulasi tegangan keluaran *Interleaved Boost converter* pada konfigurasi open loop, PID dan *Linier Quadratik Regulator* dengan *vinput* 10 volt menghasilkan *Vout* 28.69 volt, 28.46 volt dan 28 volt. *Interleaved Boost converter* pada konfigurasi *open-loop* menghasilkan *Vout* 28.69 volt dengan maksimum *peak overshoot* 0.704% dengan waktu yang sangat cepat tapi menghasilkan *ripple* tegangan yang besar. Sedangkan *Interleaved Boost Converter* yang di kendalikan menggunakan PID dengan *setpoint* yang telah di tentukan sebelumnya serta nilai  $K_p = 1$ ,  $K_i = 0.1$  dan  $K_d = 0.05$  di dapatkan *Vout* 28.46 volt dengan maksimum *peak overshoot* yang lebih kecil dari konfigurasi *open loop* yaitu 0.510% dengan waktu yang lebih lambat di bandingkan dengan konfigurasi *Open-loop*. Sementara itu *Interleaved Boost converter* dengan kontrol *Linear Quadratic Regulator* menghasilkan *Vout* 28 volt dengan  $R = 1$  dan  $Q = 5 \times 10^3$  dengan waktu yang sangat cepat dan tidak menghasilkan maksimum *peak overshoot* sehingga tidak memiliki *ripple* tegangan di bandingkan dengan konfigurasi *open-loop* dan kontrol PID pada tabel 4:

**Tabel 4 Komparasi Kontrol**

Performa	Open loop	PID	LQR
<i>Rise time</i> (s)	19.768 us	25.177 us	9.629 us
<i>Overshoot</i> (V/ms)	0.704%	0.510%	0.047%
<i>Slew Rate</i> (V/ms)	44.01 ms	52.100 ms	23.459 ms

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi *Interleaved Boost Converter*, dapat disimpulkan bahwa kontrol LQR memberikan performa terbaik, dengan tegangan *output* stabil dan tanpa *maximum peak overshoot*, dibandingkan dengan konfigurasi *open-loop* dan PID. PID menghasilkan *overshoot* yang lebih rendah dibandingkan *open-loop*, namun dengan waktu respon yang lebih lambat. *Open-loop*, meskipun memiliki waktu respon tercepat, menghasilkan *ripple* tegangan yang signifikan.

Untuk aplikasi yang memerlukan kestabilan tinggi dan respons cepat, penggunaan kontrol LQR lebih direkomendasikan. Penelitian lanjutan dapat fokus pada optimasi parameter PID dan analisis performa LQR pada beban dinamis

#### 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>
- Casro, A., Gaol, L., Setyawan, G. E., & Kurniawan, W. (2017). Pendaratan Otomatis Quadcopter AR Drone Menggunakan Metode Linear Quadratic Regulator (LQR). *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi Dan Ilmu Komputer*, 1(10), 1028–1035. <http://j-ptiik.ub.ac.id>
- Deshpande, A. V., Patil, B. K., Magadum, R. B., & Chitragar, N. R. (2021). Design and Simulation of Interleaved Boost Converter. *2021 International Conference on System, Computation, Automation and Networking, ICSCAN 2021, January*. <https://doi.org/10.1109/ICSCAN53069.2021.9526469>
- Diusti Dwi Putri, S., & Aswardi. (2020). Rancang Bangun Buck-Boost Converter menggunakan Kendali PID. *Jurnal Teknik Elektro Dan Vokasional*, 6(02), 1–15. <http://ejournal.unp.ac.id/index.php/jtev/index>
- Elfani, N. Z., & Sasmoko, P. (2016). Power Bank Portable Solar Charger Menggunakan Sistem Buck-Boost Converter Berbasis Mikrokontroler Atmega 32. *Gema Teknologi*, 18(4), 15. <https://doi.org/10.14710/gt.v18i4.21911>
- Faraj, K. S., & Farhood, J. (2020). *State-Space Derivation of Two Phase DC-DC Interleaved Boost Converter*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24080.35842>
- FATHONI, K., & UTOMO, A. B. (2019). Perancangan Kendali Optimal pada Motor Arus Searah Tanpa Sikat melalui Metode LQRI. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 7(2), 377. <https://doi.org/10.26760/elkomika.v7i2.377>
- 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>
- Koundi, M., El Idrissi, Z., El Fadil, H., Belhaj, F. Z., Lassioui, A., Gaouzi, K., Rachid, A., & Giri, F. (2022). State-Feedback Control of Interleaved Buck-Boost DC-DC Power Converter with Continuous Input Current for Fuel Cell Energy Sources: Theoretical Design and Experimental Validation. In *World Electric Vehicle Journal* (Vol. 13, Issue 7). <https://doi.org/10.3390/wevj13070124>
- Mazta, M. A., Samosir, A. S., & Haris, A. (2016). Rancang Bangun Interleaved Boost Converter Berbasis Arduino. *Jurnal Rekayasa Dan Teknologi Elektro*, 10(1), 22–29.
- Nurchahyo, A., Nisworo, S., Novianto, D., & Kurniawan, R. Y. (2023). *Perancangan Interleaved Boost Converter Dari 8-12 ke 24V Dengan Umpan Balik Tegangan*. 4(1), 202–213. <https://doi.org/https://doi.org/10.24036/jtein.v4i1.365>
- Reis, F. E. U., Torrico-Bascopé, R. P., & Costa, M. V. S. (2011). LQR control with integral action applied to a high gain step-Up DC-DC converter. *COBEP 2011 - 11th Brazilian Power Electronics Conference, September*, 256–261. <https://doi.org/10.1109/COBEP.2011.6085262>
- Samosir, A. S., Sutikno, T., & Mardiyah, L. (2023). Simple formula for designing the PID controller of a DC-DC buck converter. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 14(1), 327–336. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v14.i1.pp327-336>
- Siva Kumar, J. S. V., & Mallikarjuna Rao, P. (2020). Performance evaluation of sliding mode and linear quadratic regulator (Lqr) control in interleaved double dual boost converter for electric vehicle applications. *ICIC Express Letters, Part B: Applications*, 11(8), 781–790. <https://doi.org/10.24507/iciclb.11.08.781>
- View of Pemodelan dinamis dan kendali multi-loop konverter DC-DC boost dengan pengendali PI.pdf*. (2023). 3(1), 47–56. <https://doi.org/10.35313/jitel.v3.il.2023.47-56>
- Wahyuni, M., Wiryajati, I. K., & Wahyu Satiawan, I. N. (2024). Analisis Dan Simulasi Boost Converter Berbasis



Kontroler Konvensional Dengan Metode Persamaan Garis. *Action Research Literate*, 8(5).  
<https://doi.org/10.46799/arl.v8i5.332>

Wiryajati, 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>