

## Implementation of Voltage Control on a Multilevel DC-DC Boost Converter

Febi Ariefka Septian Putra<sup>1</sup>, Sofyan Muhammad Ilman<sup>1\*</sup>, Muhamad Amirul Muminin<sup>1</sup>, Giga Verian Pratama<sup>1</sup>, Dini Hariani Fitri Lubis<sup>1</sup>, and Annisa Izaty<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia

\*Corresponding Author email : sofyan.muhammad@polban.ac.id

### Abstract

A multilevel boost DC-DC converter is a solution for increasing DC voltage levels without requiring additional transformers, making it ideal for efficient power conversion applications and high-voltage systems. However, output voltage stability is often compromised due to load fluctuations and input voltage variations. To address this, this study aims to design and implement a control system based on the Proportional-Integral (PI) method to maintain the output voltage at a constant value of 200V from an initial input of 30V. The system was developed using an Arduino Nano microcontroller that acts as the main controller, regulating the PWM signal based on feedback from the voltage sensor. The converter circuit consists of a multilevel topology with one MOSFET, one inductor, and a cascaded array of capacitors and diodes. Tests were conducted under open-loop and closed-loop conditions, as well as with various resistive loads. The test results show that the PI method is able to provide good voltage stability and respond optimally to load changes, with minimal overshoot and fast steady-state time.

**Keywords:** Konverter DC-DC; Multilevel Boost; Kontrol PI; Mikrokontroler;

### 1. Introduction

Energi surya berbasis fotovoltaik (PV) kini menjadi teknologi energi terbarukan yang paling pesat pertumbuhannya di dunia. Hal ini mendorong lahirnya berbagai inovasi dalam pengembangan topologi konverter daya untuk memenuhi tuntutan sistem kelistrikan modern yang semakin kompleks [1]. Salah satu tantangan utama dalam sistem PV skala besar adalah fluktuasi tegangan akibat shading parsial, yang menyebabkan ketidakseimbangan daya antarmodul serta menurunkan efisiensi sistem secara keseluruhan [2]. Untuk mengatasi hal tersebut, pengembangan konverter *multilevel* menjadi fokus penting dalam desain sistem PV yang terintegrasi ke jaringan tegangan tinggi.

Desain modular *multilevel converter* (MMC) menawarkan pendekatan yang mampu meningkatkan tegangan sisi keluaran konverter DC-DC. Struktur modularnya memungkinkan fleksibilitas dalam ekspansi sistem, meskipun masih menghadapi tantangan seperti pengaturan arus sirkulasi internal dan tegangan kapasitif antarlevel [3]. Dalam sistem PV dan mikro grid DC, konfigurasi *cascaded H-bridge* memungkinkan penerapan *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) secara independen pada setiap array, sehingga efisiensi penyerapan daya dapat ditingkatkan secara signifikan [4].

MMC telah digunakan secara luas di berbagai wilayah, seperti di Tiongkok dan Eropa, untuk sistem transmisi HVDC. Selain itu, penerapannya mulai meluas ke bidang motor *drive* yang terintegrasi dengan inverter, karena kemampuan dalam menaikkan tegangan DC yang tinggi [5]. Sementara itu, pada sistem pembangkitan terdistribusi seperti mikrogrid, kestabilan tegangan menjadi hal yang krusial. Pengendali *Proportional-Integral* (PI) banyak

digunakan dalam pengaturan sisi DC untuk menjaga daya tetap sesuai kebutuhan jaringan [6].

Penggunaan pengendali PI telah terbukti efektif dalam menjaga kestabilan tegangan pada sistem inverter *grid-connected*, khususnya saat berada dalam kondisi *steady-state*. Dengan parameter yang disesuaikan, metode ini mampu mempertahankan menstabilkan dan mereduksi kesalahan *steady state* [7]. Tidak hanya pada sistem PV, pada sistem turbin angin dengan *multilevel boost*, kontrol PI juga digunakan untuk menjaga kestabilan tegangan DC sebelum dikonversi menjadi sinyal AC sinusoidal [8]. Pada aplikasi *uninterruptible power supply* (UPS), kombinasi topologi *boost converter* dan pengendali PI mampu meningkatkan tegangan dari level rendah ke tegangan tinggi dalam waktu transien yang singkat dengan *overshoot* yang minim [9].

*Boost converter* konvensional masih menjadi salah satu topologi yang banyak digunakan untuk konversi tegangan DC ke level yang lebih tinggi. Topologi ini umumnya hanya mampu meningkatkan tegangan hingga sekitar dua kali lipat dari nilai *input*, sehingga membatasi fleksibilitas penggunaannya dalam aplikasi tegangan tinggi [10]. Untuk memperoleh tegangan yang lebih besar, diperlukan *duty cycle* yang ekstrem, yang dapat menyebabkan peningkatan rugi-rugi daya, efek parasitik, serta suhu berlebih pada komponen konverter [11].

Sebagai solusi, topologi *multilevel boost converter* (MBC) dikembangkan untuk mengatasi batasan tersebut. Topologi ini mampu meningkatkan tegangan keluaran secara bertingkat melalui elemen penyimpanan energi seperti induktor dan kapasitor yang disusun secara bertingkat, tanpa memerlukan transformator tambahan [12]. Tegangan keluaran dapat ditingkatkan secara signifikan karena distribusi tegangan antarlevel [13]. Dengan pendekatan ini, sistem tidak memerlukan *duty cycle* ekstrem, sehingga rugi-rugi daya dapat ditekan dan efisiensi sistem meningkat [14].

Struktur MBC memungkinkan peningkatan tegangan menggunakan hanya satu saklar aktif dan satu induktor, dengan tambahan beberapa dioda dan kapasitor. Konfigurasi ini memberikan fleksibilitas dalam penyesuaian tingkat tegangan dan menjaga keseimbangan tegangan secara otomatis di antara setiap level [15]. Topologi serupa mengombinasikan prinsip *boost converter* dengan konfigurasi rangkaian yang disusun secara bertingkat untuk mencapai tegangan keluaran yang lebih tinggi tanpa transformator tambahan [16]. Pendekatan ini juga mengadopsi konsep *switched-capacitor*, sehingga menghasilkan efisiensi konversi yang tinggi dengan struktur rangkaian yang tetap sederhana dan mudah diimplementasikan [17]. Pengaturan PWM yang tepat pada saklar utama memungkinkan kontrol tegangan yang lebih responsif dan stabil dibandingkan konverter konvensional [18]. MBC juga diterapkan dalam konfigurasi *switched-inductor*, yang mampu meningkatkan rasio konversi tegangan secara signifikan dengan tetap mempertahankan kesederhanaan pengendalian [19].

Untuk mempertahankan kestabilan tegangan dalam sistem konversi daya, metode pengendalian berbasis PI digunakan secara luas [20]. Kontrol PI mampu mengoreksi perbedaan antara tegangan referensi dan aktual, sehingga menghasilkan sistem yang lebih responsif dan stabil [21]. Penggunaan PI *controller* dalam *boost converter* juga telah menunjukkan performa tinggi dalam mempertahankan tegangan *output* sesuai dengan nilai setpoint [22]. Beberapa pengujian menunjukkan bahwa metode ini dapat menjaga kestabilan bahkan saat sistem mengalami gangguan pensaklaran akibat waktu mati [23].

Studi lain menunjukkan bahwa pengendalian PI pada sistem berbasis RLC nonlinier mampu meredam fluktuasi tegangan dan menghindari osilasi yang tidak diinginkan, meskipun terdapat perubahan kondisi jaringan [24]. Pengaturan *duty cycle* berbasis PI yang diterapkan pada sistem UPS mampu mengembalikan tegangan ke level referensi secara

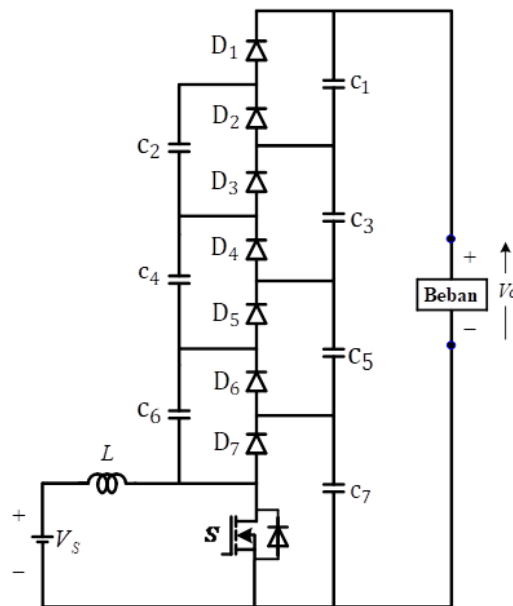
presisi dalam waktu singkat, menjadikannya salah satu pendekatan kontrol yang optimal [25] [26]. Dalam penelitian ini, sistem konversi daya yang digunakan berbasis *Multilevel Boost Converter* dengan kontrol PI agar memiliki tegangan keluaran yang stabil di 200V. Diharapkan metode kontrol PI ini mampu meningkatkan stabilitas tegangan keluaran, sehingga dapat diterapkan pada berbagai aplikasi praktis.

## 2. Metode Penelitian

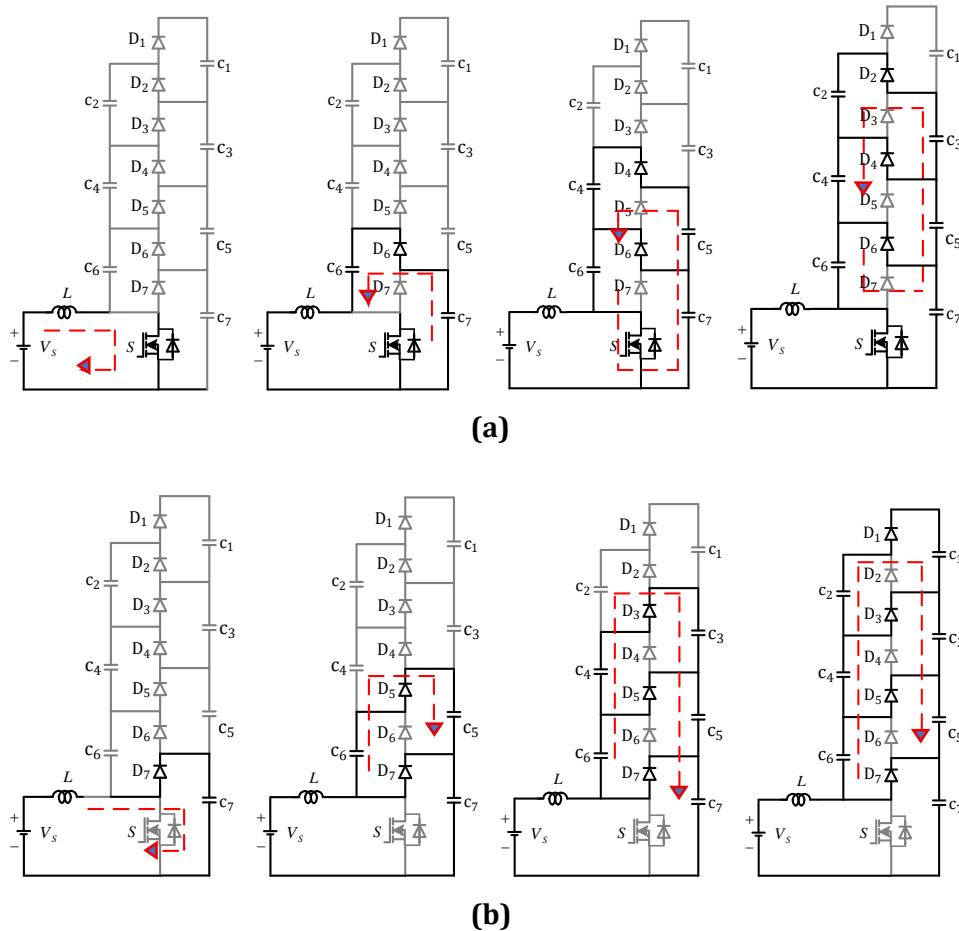
Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan yang bertujuan untuk merancang sistem kendali tegangan pada konverter DC-DC *boost multilevel* menggunakan *Proportional-Integral* (PI). Tahapan dimulai dari perhitungan konverter secara matematis, perhitungan parameter komponen pasif dan aktif, dilanjutkan dengan simulasi sistem dalam mode *open-loop* dan *closed-loop*, hingga tahap pengujian implementasi secara menyeluruh.

### 2.1 Analisa Sistem dan Topologi Konverter

Konverter yang digunakan dalam penelitian ini dirancang untuk menaikkan tegangan dari 30V menjadi 200V menggunakan metode *multilevel* pada konverter dengan sistem susunan kapasitor secara bertingkat. Topologi konverter yang digunakan mengintegrasikan satu induktor, satu MOSFET sebagai *switching device*, serta beberapa dioda dan kapasitor yang disusun secara bertingkat. Tujuan penggunaan konfigurasi ini adalah untuk memperoleh tegangan *output* yang lebih tinggi. Gambar 1 merupakan topologi *multilevel* yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 1: Topologi dasar konverter DC-DC *boost multilevel*



**Gambar 2: Operasi Kerja Konverter DC-DC *boost multilevel*: (a) kondisi ON, (b) kondisi OFF**

Gambar 2 memperlihatkan mode operasi kerja dari konverter *boost multilevel*, yang terbagi menjadi dua kondisi utama, yaitu saat saklar dalam keadaan ON dan OFF. Dari kedua kondisi tersebut, dapat dianalisis alur perpindahan energi dari sumber menuju beban melalui induktor, dioda, dan kapasitor yang disusun bertingkat. Untuk menentukan nilai komponen utama seperti induktor dan kapasitor, digunakan beberapa persamaan dasar yang mengacu pada parameter sistem, yaitu tegangan *input* 30V, tegangan keluaran 200V, dan frekuensi *switching* 10 kHz. Penentuan nilai komponen dalam sistem konverter dilakukan dengan memanfaatkan sejumlah persamaan dasar yang berkaitan dengan proses konversi daya. Langkah pertama adalah menentukan tegangan keluaran dari rangkaian *multilevel boost converter*.

Tegangan keluaran dihitung berdasarkan tegangan *input*, jumlah level, dan *duty cycle*, melalui persamaan:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1-k} \times n \quad (1)$$

Dengan  $V_{in}$  sebagai tegangan *input*,  $k$  adalah *duty cycle*, dan  $n$  merupakan jumlah level. Jika diketahui target tegangan keluaran dan tegangan *input*, maka persamaan tersebut dapat dibalik untuk memperoleh *duty cycle* yang diperlukan, yaitu:

$$k = 1 - \frac{V_{in} \times n}{V_{out}} \quad (2)$$

Setelah mengetahui *duty cycle*, perhitungan dilanjutkan untuk menentukan arus keluaran yang dibutuhkan oleh beban. Arus keluaran ini diperoleh dari perbandingan antara daya total dengan tegangan *output*:

$$I_{out} = \frac{P}{V_{out}} \quad (3)$$

Sedangkan arus *input* diasumsikan ideal (tanpa rugi), dan diperoleh dari:

$$I_{in} = \frac{P}{V_{in}} \quad (4)$$

Selanjutnya, nilai arus *ripple* induktor menjadi acuan dalam menentukan kapasitas komponen induktif yang akan digunakan. Arus *ripple* dihitung menggunakan:

$$\Delta I_L = \frac{V_{in} \times k}{L \times f} \quad (5)$$

Dengan  $f$  sebagai frekuensi *switching* dan  $L$  adalah nilai induktansi. Berdasarkan batas arus *ripple* yang diinginkan, nilai induktansi minimum dapat dihitung untuk menjaga agar konverter tetap bekerja dalam kondisi kontinu:

$$L_{min} = \frac{10(1-k)^2 R_{out}}{2 \times n^2} \times k \times T \quad (6)$$

Untuk mengetahui apakah induktor mampu menangani arus maksimum selama proses *switching*, maka dihitung arus maksimum induktor sebagai penjumlahan arus *input* dan setengah dari arus *ripple*:

$$I_{Lmax} = I_{in} + \frac{\Delta I_L}{2} \quad (7)$$

Sedangkan untuk keperluan pengukuran dan spesifikasi komponen, nilai arus RMS induktor juga dihitung menggunakan pendekatan berikut:

$$I_{Lrms} = \sqrt{I_{in}^2 + \left(\frac{\Delta I_L/2}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad (8)$$

Perancangan fisik induktor juga memperhitungkan jumlah lilitan, yang didapat dari akar nilai induktansi dibagi dengan konstanta induksi dari inti magnetik ( $A_L$ ):

$$N = \sqrt{\frac{L \times 10^{-6}}{A_L}} \quad (9)$$

Terakhir, kapasitor dipilih untuk menjaga kestabilan tegangan *output* dan meredam *ripple* tegangan. Nilai kapasitor dihitung berdasarkan arus *output*, *duty cycle*, frekuensi *switching*, dan batas *ripple* tegangan yang diizinkan:

$$C = \frac{I_{out} \times k}{f \times \Delta V_{out}} \quad (10)$$

Dengan semua perhitungan tersebut, nilai-nilai komponen seperti induktor, kapasitor, serta *duty cycle* optimal dapat ditentukan untuk memastikan konverter bekerja sesuai spesifikasi tegangan keluaran 200V. Di bawah merupakan tabel spesifikasi sistem dan komponen dari konverter.

**Table 1: Spesifikasi sistem *multilevel boost converter***

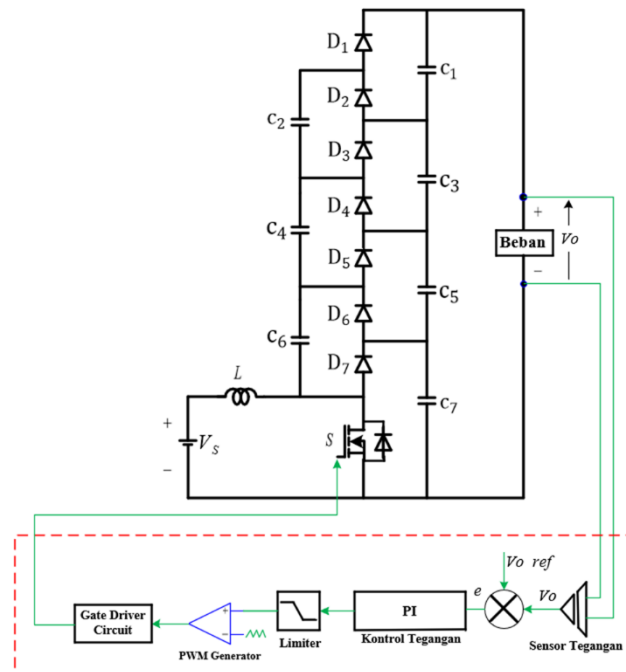
Parameter	Spesifikasi
Daya Output ( $P_{out}$ )	200 W
Tegangan Input ( $V_{in}$ )	30 V
Tegangan Output ( $V_{out}$ )	200 V
Frekuensi Switching ( $f$ )	10 kHz
Resistansi Beban ( $R_{load}$ )	200 $\Omega$

## 2.2 Kendali Proportional- Integral Konverter DC-DC *Boost Multilevel*

Pengendalian konverter *boost* dengan metode *Proportional-Integral* (PI) bertujuan untuk menjaga kestabilan tegangan keluaran. Tegangan *output* konverter akan disensing menggunakan sensor dan hasilnya akan dibandingkan dengan setpoint tegangan yang diinginkan. Selisih antara tegangan keluaran yang terukur dan setpoint tersebut (*error*) kemudian dijadikan *input* untuk pengendalian PI. Pengendali PI pada konverter DC-DC *boost* diimplementasikan dengan mengatur sinyal PWM untuk mengendalikan MOSFET. Sinyal PWM ini disesuaikan untuk menjaga tegangan keluaran konverter agar tetap stabil pada nilai yang telah ditetapkan. Persamaan 11. adalah rumus dasar *Proportional integral*.

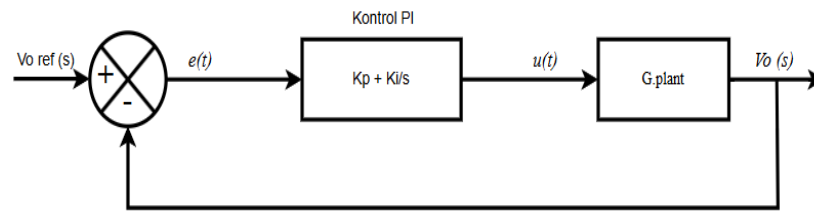
$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (11)$$

Gambar 4. adalah topologi konverter dc-dc *boost multilevel* yang sudah lengkap dengan kendali PI.



**Gambar 3: Konverter DC-DC *Boost Multilevel* dengan Kendali PI**

Gambar 3 menunjukkan pengendalian *Proportional-Integral* (PI) pada konverter DC-DC *boost multilevel* dengan nilai  $V_c = V_o$ . Pada Gambar 4. Diagram tersebut menggambarkan bagaimana pengendali PI berfungsi untuk mengatur sinyal PWM yang mengontrol MOSFET, dengan tujuan untuk mempertahankan kestabilan tegangan keluaran konverter pada nilai yang telah ditentukan.



**Gambar 4: Diagram Blok dari Kendali PI *converter* DC-DC Boost Multilevel**

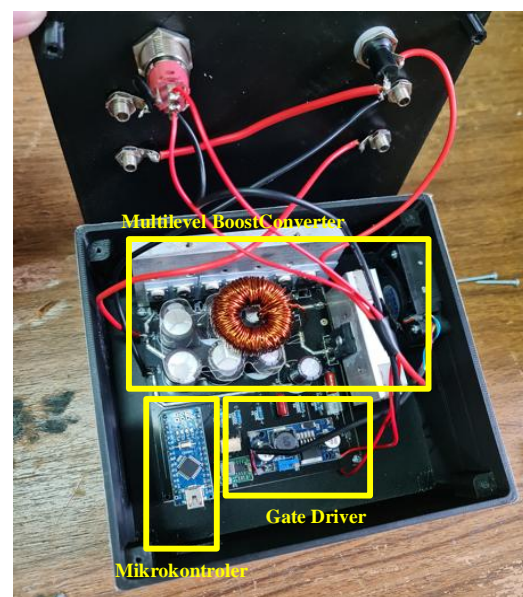
Mengacu pada Gambar 4, fungsi alih *open loop* dari pengendali arus dapat dirumuskan sebagaimana ditunjukkan pada persamaan berikut.

$$T_{OL}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \times G_{plant}(s) \quad (12)$$

Pada penentuan parameter PI seperti  $K_p$  dan  $K_i$  menggunakan metode penyetelan *Ziegler-Nichols* I, langkah awal yang dilakukan adalah memberikan masukan tangga pada sistem dalam kondisi open loop. Selanjutnya, diamati bentuk respon sistem yang menyerupai kurva S, lalu diambil dua parameter penting yaitu waktu tunda (L) dan konstanta waktu (T). Berdasarkan nilai L dan T yang diperoleh, parameter  $K_p$  dan  $K_i$  ditentukan menggunakan rumus yang telah ditetapkan dalam metode *Ziegler-Nichols* tipe pertama.

### 3. Hasil dan Pembahasan

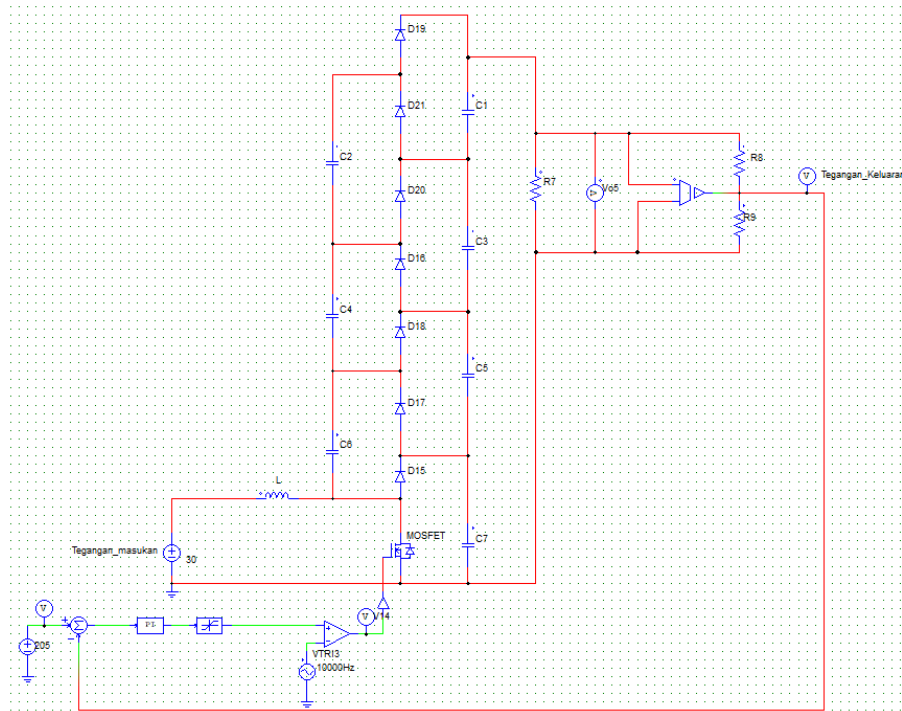
Pada bagian ini hasil dari simulasi dan pengujian langsung yang dilakukan pada sistem *multilevel boost converter* menggunakan pengendali Proportional Integral (PI). Hasil-hasil ini digunakan untuk mengevaluasi performa sistem, khususnya dalam menjaga kestabilan tegangan keluaran pada nilai setpoint yang diinginkan. Pembahasan dilakukan dalam tiga bagian utama: penentuan parameter kendali PI, pengujian dengan berbagai kondisi, serta analisis performa sistem berdasarkan parameter waktu seperti *rise time*, *settling time*, *overshoot*, dan *steady-state error*. Berikut merupakan dokumentasi dari implementasi dari *multilevel boost converter*.



**Gambar 5: Implementasi *multilevel boost converter***

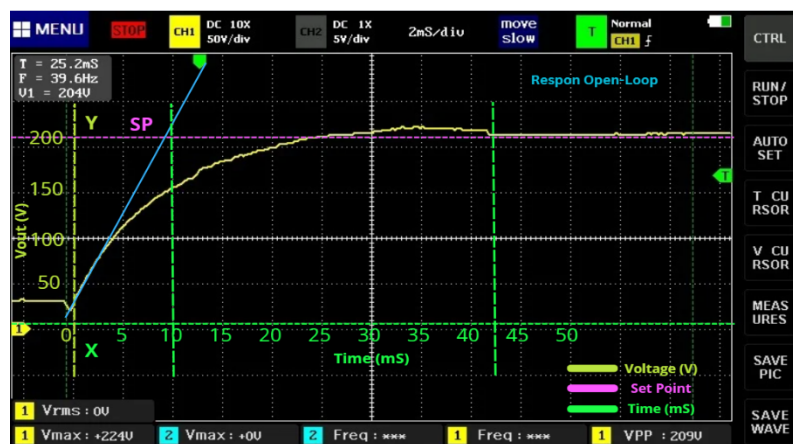
### 3.1 Penentuan Parameter Kendali Proportional- Integral

Penentuan parameter pengendali PI dilakukan dengan menggunakan metode *Ziegler-Nichols 1*. Metode ini diterapkan dengan memberikan gangguan berupa sinyal langkah (*step input*) pada sistem dalam kondisi *open loop*, lalu diamati bentuk kurva respon tegangan keluarannya.



**Gambar 6: Konverter dengan Kendali PI via PSIM software**

Berdasarkan hasil pengujian sistem dalam kondisi *open loop*, diperoleh nilai konstanta waktu  $L$  sebesar 0,001039 s dan  $T$  sebesar 0,002309 s. Nilai gain statik sistem  $K_s$  sebesar 0,837 diperoleh dari rasio antara nilai setpoint terhadap puncak respons sistem. Berdasarkan parameter-parameter tersebut, maka dilakukan perhitungan nilai pengendali PI menggunakan rumus *Ziegler-Nichols I*. Gambar 7 merupakan grafik respon *open loop* konverter.

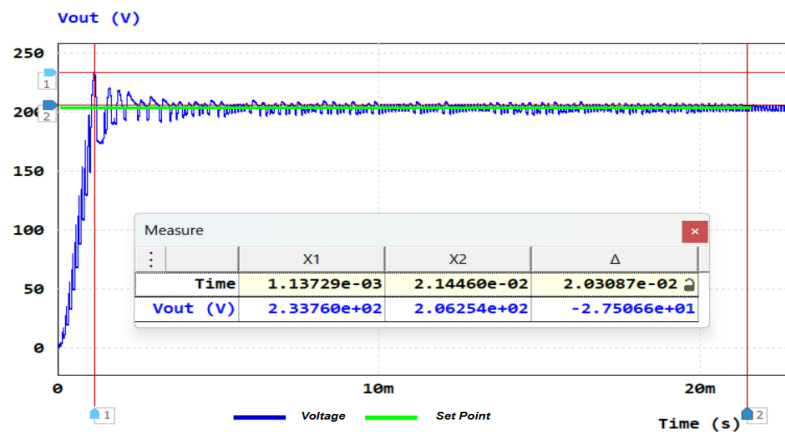


**Gambar 7: Respon *Open-Loop* Konverter**

Gambar 7 menunjukkan respon *open loop* dari konverter sebelum diintegrasikan dengan algoritma PI. menunjukkan karakteristik transien yang cukup cepat namun tanpa kendali umpan balik. Dari grafik osiloskop, rise time ( $T_r$ ) tercatat sekitar 20 ms, dengan peak time ( $T_p$ ) sebesar 25,2 ms saat tegangan mencapai puncaknya di 224 V. Nilai ini menghasilkan overshoot sebesar 12% terhadap setpoint. Tegangan mulai stabil pada 43 ms, yang menandai settling time ( $T_s$ ) sistem. Dengan grafik tersebut didapatkan nilai  $K_p$  sebesar 0,47, nilai  $T_i$  sebesar 3,615 dan  $K_i$  sebesar 0,13.

### 3.2 Implementasi Kendali PI Pada Simulasi

Setelah parameter pengendali PI diperoleh melalui metode *Ziegler-Nichols I*, langkah selanjutnya adalah mengimplementasikan kendali tersebut dalam model simulasi sistem *multilevel boost converter* menggunakan *software* PSIM. Gambar 8 merupakan respon hasil simulasi dengan kendali PI.



**Gambar 8: Respon tegangan keluaran dengan optimasi parameter kendali PI**

Parameter PI yang telah disesuaikan ditunjukkan pada Gambar 8, memperlihatkan bahwa performa sistem kendali PI mampu meningkatkan respons *multilevel boost converter* menjadi lebih cepat dan stabil terhadap perubahan tegangan referensi. Tegangan keluaran dapat mengikuti nilai setpoint dengan presisi yang cukup baik. Nilai *overshoot*, waktu naik (*rise time*), waktu tunak (*settling time*), serta kesalahan keadaan tunak (*steady state error*) yang diperoleh dari hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel II sebagai representasi kuantitatif dari unjuk kerja sistem.

**Table 2: Respon Sinyal Keluaran Kendali Tegangan PI Pada Simulasi**

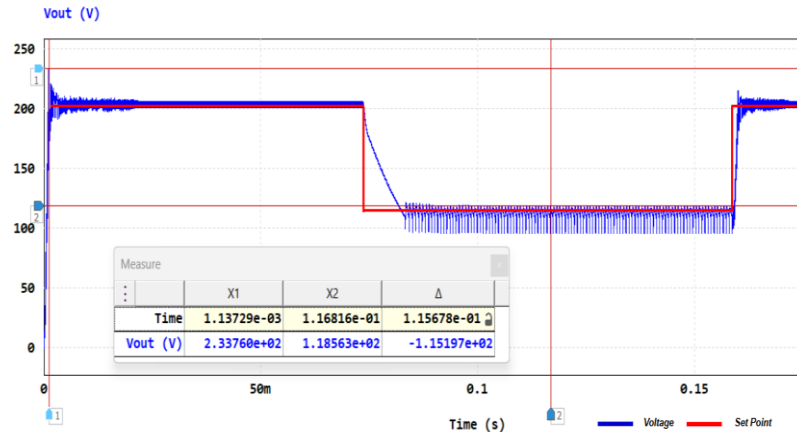
Parameter	Nilai
Rise time ( $t_r$ )	1 ms
Settling time ( $t_s$ )	21,44 ms
Maximum overshoot ( $M_p$ )	16,88 %
Steady state error ( $SS_e$ )	0,54%

Pada Tabel 2 ditunjukkan hasil respon sinyal keluaran dari sistem *multilevel boost converter* yang dikendalikan oleh pengendali kaskade PI. Nilai-nilai parameter performa seperti *rise time*, *settling time*, *Maximum overshoot*, dan *steady-state error* menggambarkan bahwa sistem mampu merespons perubahan referensi secara cepat dan akurat. Sebagai

kelanjutan dari pengujian awal ini, dilakukan pengujian tambahan dalam beberapa kondisi skenario, yakni ketika nilai setpoint berubah dan saat terjadi variasi beban.

### 3.2.1 Pengujian Set Point Berubah

Pada skenario ini, set point konverter awalnya diset pada 200 V, kemudian diubah menjadi 100 V selama 3 detik, dan dikembalikan lagi ke 200 V.

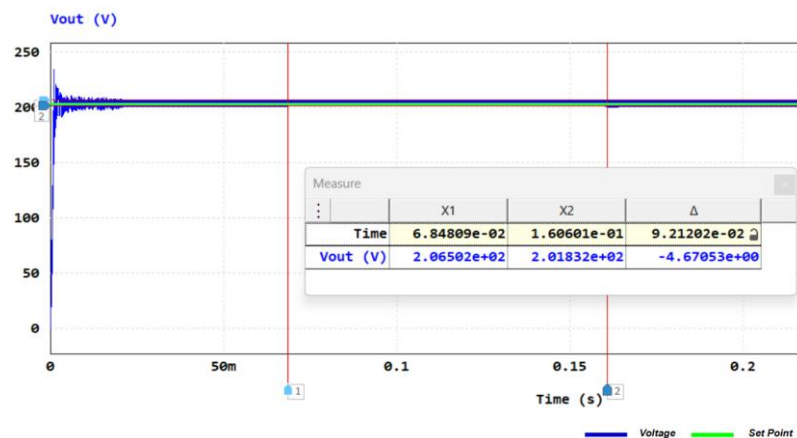


**Gambar 9: Hasil simulasi kendali tegangan keluaran dengan set point berubah**

Gambar 9 menunjukkan bahwa kendali PI pada sistem mampu memberikan respon yang baik, di mana ketika set point diubah dari 200 V menjadi 100 V, dan kemudian dikembalikan ke 200 V, sinyal tegangan keluaran dapat mengikuti perubahan tersebut dengan stabil tanpa menunjukkan osilasi yang berlebihan.

### 3.2.2 Pengujian Beban Berubah

Pada skenario ini, beban konverter diubah dari 200 Ω menjadi 300 Ω secara tiba-tiba untuk menguji kemampuan kendali PI dalam menjaga kestabilan tegangan keluaran.



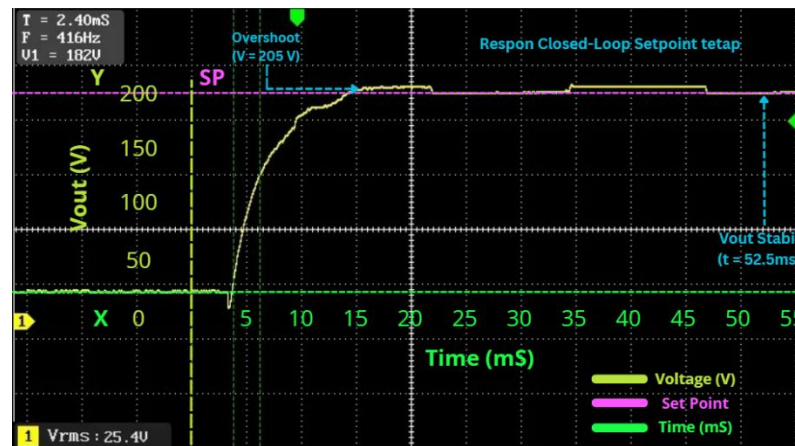
**Gambar 10: Hasil simulasi kendali tegangan keluaran dengan beban berubah**

Gambar 10 menunjukkan respon sistem saat terjadi perubahan beban dari 200 Ω menjadi 300 Ω. Perubahan ini menyebabkan gangguan sesaat pada tegangan keluaran, namun

sistem segera melakukan koreksi dan kembali stabil pada nilai referensi 200 V dalam waktu yang singkat. Hal ini menunjukkan bahwa pengendali PI mampu mengompensasi perubahan beban secara efektif tanpa menghasilkan osilasi yang signifikan, serta mempertahankan kestabilan tegangan keluaran pada kondisi dinamis.

### 3.3 Implementasi Kendali PI Pada Hardware

Setelah diuji pada simulasi, pengendali PI diimplementasikan pada perangkat keras menggunakan Arduino Nano. Tegangan keluaran diukur melalui pembagi tegangan dan dibandingkan dengan referensi 200 V.



**Gambar 11: Hasil respon kendali tegangan keluaran pada hardware dengan kendali PI**

Gambar 11 menunjukkan hasil respon sistem saat implementasi kendali PI pada perangkat keras. Tegangan keluaran mampu mencapai nilai referensi sebesar 200 V dengan overshoot minimal dan waktu pemulihan yang relatif cepat.

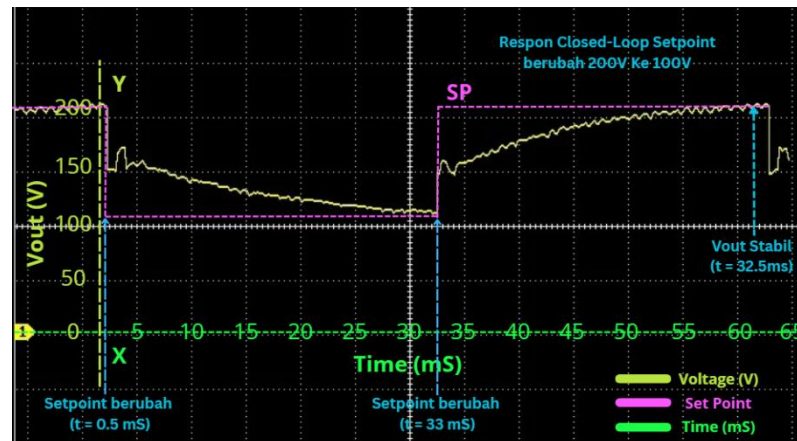
**Table 3: Respon Sinyal Keluaran Kendali Tegangan PI Pada Hardware**

Parameter	Nilai
Rise time ( $t_r$ )	12 ms
Settling time ( $t_s$ )	52,5 ms
Maximum overshoot ( $M_p$ )	2,5 %
Steady state error ( $SS_e$ )	1%

Tabel 3 menyajikan hasil respon sinyal keluaran tegangan pada sistem dengan pengendalian PI. Berdasarkan data yang ditampilkan, performa kendali tegangan menunjukkan pencapaian waktu naik dan waktu tunak yang relatif cepat, serta nilai overshoot yang masih dalam batas wajar. Setelah pengujian awal berhasil dilakukan pada sistem kendali PI di perangkat keras, pengujian dilanjutkan dengan beberapa skenario tambahan untuk mengamati kinerja sistem secara lebih menyeluruh. Skenario yang diuji meliputi perubahan nilai setpoint serta variasi beban, guna mengevaluasi kemampuan sistem dalam menjaga kestabilan tegangan keluaran di kondisi nyata.

#### 3.3.1 Pengujian Set Point Berubah Pada Hardware

Skenario yang dilakukan sama seperti pada pengujian simulasi, yaitu dengan memberikan variasi set point dari 200 V, diturunkan menjadi 100 V selama 3 detik, lalu dikembalikan ke 200 V.

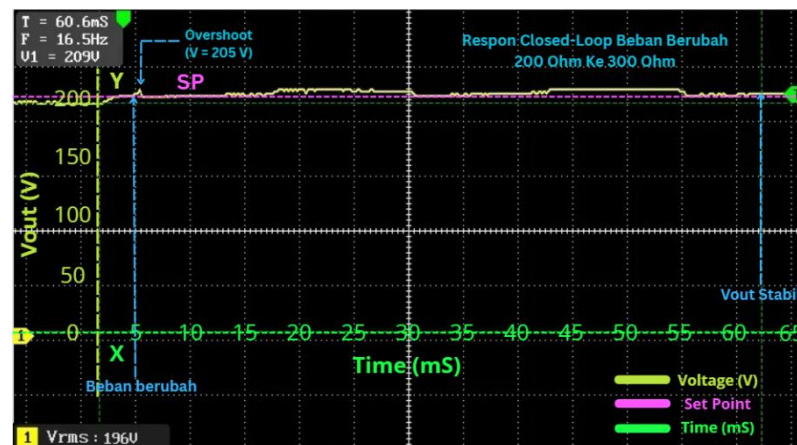


**Gambar 12: Hasil respon kendali tegangan keluaran set point berubah pada hardware dengan kendali PI**

Gambar 12 menunjukkan respon sistem pada implementasi perangkat keras ketika nilai set point diubah dari 200 V menjadi 100 V, kemudian dikembalikan ke 200 V, mengikuti skenario yang sama seperti pada simulasi. Dibandingkan dengan hasil simulasi, respon sistem nyata menunjukkan pola yang serupa, di mana tegangan keluaran mampu mengikuti perubahan referensi dengan cukup baik. Meskipun waktu stabilisasinya sedikit lebih lambat akibat keterbatasan kecepatan pemrosesan mikrokontroler dan karakteristik komponen daya, sistem tetap dapat kembali ke nilai set point tanpa *overshoot* atau osilasi yang signifikan.

### 3.3.2 Pengujian Beban Berubah Pada *Hardware*

Skenario ini dilakukan untuk menguji respon sistem kendali PI terhadap perubahan beban secara nyata. Beban konverter diubah secara tiba-tiba dari 200  $\Omega$  menjadi 300  $\Omega$ .



**Gambar 13: Hasil respon kendali tegangan keluaran beban berubah pada hardware dengan kendali PI**

Gambar menunjukkan respon tegangan keluaran saat beban berubah dari 200  $\Omega$  menjadi 300  $\Omega$ . Tegangan mengalami *overshoot* sebesar 2,5% dan kembali stabil mendekati setpoint 209 V dalam waktu sekitar 60,6 ms. Dengan *steady state error* sebesar 0 V, respon

ini membuktikan bahwa kendali PI mampu menjaga kestabilan tegangan secara efektif meskipun terjadi perubahan beban.

#### 4. Kesimpulan

Makalah ini menyajikan hasil perancangan dan implementasi pengendali tegangan pada sistem *multilevel boost converter* berbasis metode *Proportional-Integral* (PI). Tahapan penelitian meliputi perancangan rangkaian konverter daya dan pengendali berbasis mikrokontroler, serta pengujian melalui simulasi dan eksperimen langsung pada perangkat keras. Uji coba dilakukan dengan dua skenario, yaitu perubahan nilai set point dan perubahan beban. Pada pengujian set point, sistem mampu mengikuti perubahan dari 200 V ke 100 V lalu kembali ke 200 V dengan respons yang stabil dan tanpa gejala osilasi. Sementara itu, pada skenario perubahan beban dari 200  $\Omega$  ke 300  $\Omega$ , sistem tetap mempertahankan tegangan di sekitar nilai referensi dengan *steady state error* yang sangat kecil. Kinerja pengendali PI menunjukkan *rise time* dan *settling time* yang cepat serta *overshoot* tidak melebihi 3%. Secara keseluruhan, metode pengendalian PI mampu menjaga tegangan keluaran tetap stabil dalam kondisi dinamis. Penelitian berikutnya disarankan mengeksplorasi pendekatan kendali lainnya yang memiliki performa adaptif dan respon lebih cepat.

#### Acknowledgements

Para peneliti mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Bandung atas bantuan pendanaan yang diberikan dalam pelaksanaan penelitian ini berdasarkan Surat Keputusan Direktur Politeknik Negeri Bandung Nomor 317 /PL1 /HK.02/2025.

#### References

- [1] A. Allehyani, "Analysis of a symmetrical *multilevel* DC-DC *boost converter* with ripple reduction structure for solar PV systems," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 9, pp. 7055–7065, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.aej.2021.12.049.
- [2] S. Alatai *et al.*, "A review on state-of-the-art power *converters*: Bidirectional, resonant, *multilevel converters* and their derivatives," Nov. 01, 2021, MDPI. doi: 10.3390/app112110172.
- [3] R. D. N. Aditama, N. Ramadhani, T. Ardriani, J. Furqani, A. Rizqian, and P. A. Dahono, "New Modular *Multilevel* DC-DC Converter Derived from Modified Buck-Boost DC-DC Converter," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 19, Oct. 2023, doi: 10.3390/en16196950.
- [4] A. I. Elsanabary, G. Konstantinou, S. Mekhilef, C. D. Townsend, M. Seyedmahmoudian, and A. Stojcevski, "Medium Voltage Large-Scale Grid-Connected Photovoltaic Systems Using Cascaded H-Bridge and Modular *Multilevel Converters*: A Review," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 223686–223699, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3044882.
- [5] M. A. Perez, S. Ceballos, G. Konstantinou, J. Pou, and R. P. Aguilera, "Modular *Multilevel Converters*: Recent Achievements and Challenges," *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, vol. 2, pp. 224–239, 2021, doi: 10.1109/OJIES.2021.3060791.
- [6] M. Lakshmi and S. Hemamalini, "Decoupled control of grid connected photovoltaic system using fractional order controller," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 9, no. 4, pp. 927–937, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.asej.2016.06.002.
- [7] S. W. Shneen, A. L. Shuraiji, and K. R. Hameed, "Simulation model of proportional integral controller-PWM DC-DC power *converter* for DC motor using MATLAB," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 29, no. 2, pp. 725–734, Feb. 2023, doi: 10.11591/ijeecs.v29.i2.pp725-734.

- [8] T. Porselvi *et al.*, “Combined harmonic reduction and DC voltage regulation of a single DC source five-level *multilevel* inverter for wind electric system,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 9, no. 6, pp. 1–19, Jun. 2020, doi: 10.3390/electronics9060979.
- [9] Gede Patrianaya Margayasa Wirsuyana, Novie Ayub Windarko, Muhammad Nizar Habibi, And Suryono, “Desain dan Simulasi UPS *Multilevel* Inverter Dengan Metode Modulasi Phase Disposition-PWM (Design and Simulation of UPS *Multilevel* Inverter with Phase Disposition-PWM Modulation Method),” *SEMESTA TEKNIKA*, vol. 23, pp. 1–12, May 2020, doi: 10.18196/st.231256.
- [10] Fanani Zaky Akhmad, Ashari Mochamad, and Yuwono Teguh, “Desain dan Simulasi Konverter *Boost Multilevel* sebagai Catu Daya Kendaraan Listrik,” *JURNAL TEKNIK POMITS*, vol. Vol. 3, pp. 1–6, 2014.
- [11] A. Abu Bakar *et al.*, “DC/DC *Boost Converter* With Pi Controller Using Real-Time Interface,” *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 10, no. 19, pp. 1–6, Aug. 2015, [Online]. Available: [www.arnpjournals.com](http://www.arnpjournals.com)
- [12] Julio C. Rosas Caro, IEEE Student Member Juan M. Ramirez, IEEE Member, and Antonio Valderrabano, *Voltage Balancing in DC/DC Multilevel Boost Converters*. IEEE, 2008.
- [13] J. C. Mayo-Maldonado, R. Salas-Cabrera, J. C. Rosas-Caro, J. De Leon-Morales, and E. N. Salas-Cabrera, “Modelling and control of a DC-DC *multilevel boost converter*,” *IET Power Electronics*, vol. 4, no. 6, pp. 693–700, Jul. 2011, doi: 10.1049/iet-pel.2010.0191.
- [14] Julio C. Rosas-Caro, Juan M. Ramirez, Pedro Martin Garcia-Vite, Power System Departement Guadalajara Campus of CINVESTASV, and Guadalajara City Mexico, “*Novel DC-DC Multilevel Boost Converter*.” IEEE, 2008.
- [15] A. Alsafrani, M. Parker, M. Shahbazi, and A. Horsfall, “High gain DC-DC *multilevel boost converter* to enable transformerless grid connection for renewable energy,” in *2021 56th International Universities Power Engineering Conference: Powering Net Zero Emissions, UPEC 2021 - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Aug. 2021. doi: 10.1109/UPEC50034.2021.9548271.
- [16] J. C. Rosas-Caro, J. M. Ramirez, F. Z. Peng, and A. Valderrabano, “A DC-DC *multilevel boost converter*,” *IET Power Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 129–137, Nov. 2010, doi: 10.1049/iet-pel.2008.0253.
- [17] S. Pada *et al.*, “Rancang Bangun *Multilevel Boost Converter* Untuk Catu Daya Motor Arus,” *Jurnal Rekayasa dan Teknologi*, pp. 1–7, Sep. 2018.
- [18] Mostafa Mousa *et al.*, “A Switched Inductor *Multilevel Boost Converter*,” *I E E E*, Nov. 2010.
- [19] R. Cisneros, M. Pirro, G. Bergna, R. Ortega, G. Ippoliti, and M. Molinas, “Global tracking passivity-based PI control of bilinear systems: Application to the interleaved *boost* and modular *multilevel converters*,” *Control Eng Pract*, vol. 43, pp. 109–119, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.conengprac.2015.07.002.
- [20] Julio C. Rosas-Caro *et al.*, *The Resonant DC-DC Multilevel Boost Converter*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018.
- [21] F. Castaños, B. Jayawardhana, R. Ortega, and E. García-Canseco, “Proportional plus integral control for set-point regulation of a class of nonlinear RLC circuits,” *Circuits Syst Signal Process*, vol. 28, no. 4, pp. 609–623, 2009, doi: 10.1007/s00034-009-9103-x.
- [22] T. T. Arvianto, E. Wahjono, and I. Irianto, “Perancangan *boost converter* menggunakan kontrol proporsional integral (PI) sebagai suplai tegangan *input* inverter satu fasa

- untuk sistem uninterruptible power supply,” *Teknika: Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 16, no. 2, p. 136, Nov. 2020, doi: 10.36055/tjst.v16i2.8511.
- [23] S. Ardhi and T. P. Gunawan, “Permodelan Konverter DC to DC Tipe *Boost Converter* dengan Pengendali Proporsional Integral (PI),” *Jurnal Teknik Industri*, vol. 25, no. 2, pp. 13–24, Aug. 2022, [Online]. Available: <http://univ45sby.ac.id/ejournal/index.php/industri/index>
- [24] S. Haq, S. P. Biswas, M. K. Hosain, M. A. Rahman, M. R. Islam, and S. Jahan, “A modular *multilevel converter* with an advanced pwm control technique for grid-tied photovoltaic system,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 2, Jan. 2021, doi: 10.3390/en14020331.
- [25] G. Darivianakis, A. Eichler, and J. Lygeros, “Distributed Model Predictive Control for Linear Systems with Adaptive Terminal Sets,” *IEEE Trans Automat Contr*, vol. 65, no. 3, pp. 1044–1056, Mar. 2020, doi: 10.1109/TAC.2019.2916774.
- [26] S. Muhammad Ilman and F. A. Septian Putra, “Kendali arus dan tegangan pada konverter DC-DC *boost* dengan metode kaskade proportional integral derivative,” *JITEL (Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Elektronika, dan Listrik Tenaga)*, vol. 3, no. 3, pp. 191–202, Sep. 2023, doi: 10.35313/jitel.v3.i3.2023.191-202.