

Analisa Kinerja *Boost Converter* dan *Cascaded Boost Converter* pada Kondisi Tidak Ideal

Petra Elisa Ayu Hashinta¹, Slamet Riyadi², Leonardus Heru Pratomo³, Florentinus Budi Setiawan⁴

^{1,2,3,4} Program Studi Teknik Elektro, Universitas Katolik Soegijapranata Semarang

Jl. Pawiyatan Luhur Sel. IV No.1, Bendan Duwur, Kec. Gajahmungkur, Kota Semarang, Jawa Tengah 50234

e-mail: ayuhashinta17@gmail.com

Abstrak— Mesin *brushless direct current* (BLDC) banyak digunakan sebagai penggerak kendaraan listrik karena dapat dioperasikan pengereman regeneratif sehingga dapat memperpanjang jarak tempuh. Agar pengereman regeneratif lebih optimal, dibutuhkan *boost converter* dengan *gain* tinggi. *Boost converter* konvensional menghasilkan *gain* yang terbatas karena adanya elemen *parasitic* yang mengakibatkan kondisi tidak ideal, sehingga dibutuhkan *cascaded boost converter*. Pada makalah ini, dianalisa konverter yang mampu memberi *gain* yang tinggi dengan implementasi *boost converter* yang dihubungkan secara seri. Untuk memvalidasi hasil analisa dilakukan simulasi dan pengujian laboratorium. Simulasi dan pengujian menunjukkan bahwa *cascaded boost converter* mampu memberikan *gain* yang lebih tinggi dari *boost converter* konvensional.

Kata kunci: *elemen parasitic, mesin BLDC, pengereman regeneratif, boost converter, cascaded boost converter*

Abstract— *Brushless Direct Current (BLDC) machine are widely used in electric vehicle therefore can operate a regenerative braking, so it can get more mileage. For optimize the regenerative braking, a high gain boost converter is required. Conventional boost converter produce limited gain due to the presence of parasitic elements that resulting in non-ideal conditions, so a cascaded boost converter is needed. In this paper, the analysis of converter is able to provide high gain by implementing a boost converter that connected in series. To validate data from analysis, simulation and laboratory testing were performed. The result of simulation and testing show that the cascaded boost converter is able to provide higher gain than conventional boost converters.*

Keywords: *parasitic elements, BLDC machine, regenerative braking, boost converter, cascaded boost converter*

I. PENDAHULUAN

Mesin BLDC sering digunakan untuk aplikasi kendaraan listrik karena memiliki torka yang besar dan dapat dioperasikan untuk pengereman regeneratif. Pengereman jenis ini mengubah energi kinetik putaran motor menjadi energi listrik lalu disimpan di baterai sehingga dapat memperpanjang jarak tempuh kendaraan [1], [2]. Agar energi dapat disimpan di baterai, maka energi listrik hasil perubahan dari energi kinetik mesin BLDC harus lebih besar dari energi pada baterai [3].

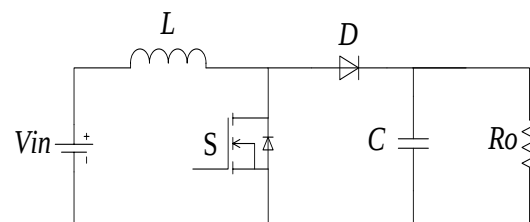
Pengembangan metode pengereman regeneratif pada mesin BLDC dilakukan dengan mengoperasikan konverter *bidirectional* menjadi *boost converter*. Pola pensaklaran PWM konverter menggunakan referensi *hall-effect* pada mesin BLDC. Metode ini bertujuan agar pensaklaran terjadi saat *Back Electromotive Force* (BEMF) puncak [4]. Elemen *parasitic* mengakibatkan *boost converter* konvensional menghasilkan *gain* yang terbatas sehingga dibutuhkan topologi *boost converter* lain yang dapat menghasilkan *gain* lebih tinggi agar pengereman regeneratif berjalan lebih optimal [5]. Dalam penelitian ini dilakukan analisa kinerja *boost converter* konvensional dan *cascaded boost converter* pada kondisi tidak ideal.

II. METODE

A. *Boost Converter* Konvensional pada Kondisi Tidak Ideal

Konverter umumnya terdiri dari saklar statis, dioda, induktor, kapasitor, dan resistor. Dalam rangkaian *boost converter* konvensional pada Gambar 1, semua elemen dianggap ideal [6]. Hal ini memberi kemudahan dalam analisis, sehingga didapatkan :

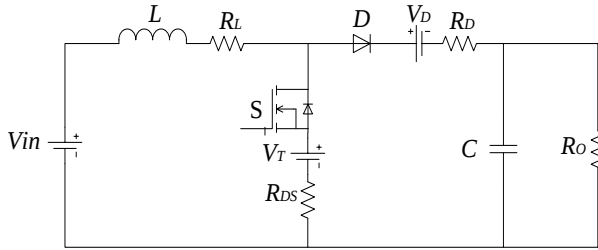
$$V_o = \frac{V_{in}}{(1-D)} \quad (1)$$



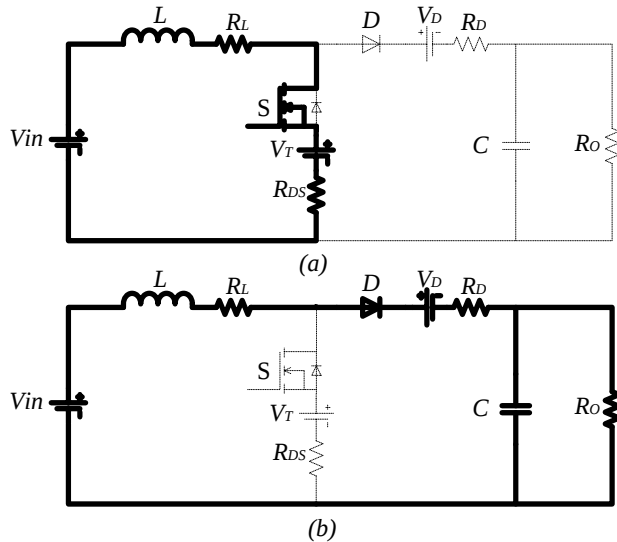
Gambar 1. Rangkaian ekuivalen *boost converter* konvensional ideal

Persamaan diatas hanya berlaku pada kondisi ideal hal ini diakibatkan karena adanya elemen *parasitic* [7]. Elemen *parasitic* yang menyebabkan ketidak-idealan elemen

ditunjukkan dengan adanya hambatan dalam pada elemen L, C dan saklar yang disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Rangkaian ekivalen boost converter konvensional tidak ideal



Gambar 3. Mode operasi boost converter konvensional tidak ideal (a) Mode Operasi 1 (b) Mode Operasi 2

Mode operasi boost converter konvensional ditunjukkan pada Gambar 3. Saat saklar hidup, tegangan sumber disuplai ke induktor sehingga menyimpan energi [8], [9]. Saat saklar mati, induktor mengubah polaritasnya untuk meneruskan energi yang disimpan menuju ke kapasitor dan beban melalui dioda. Dari mode operasi tersebut, didapatkan :

$$S_{On} : V_L = V_{in} - I_L R_L - V_T - I_L R_{ds} \quad (2)$$

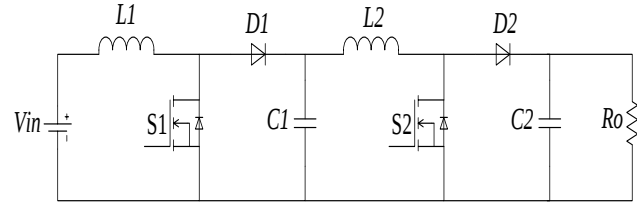
$$S_{Off} : V_L = V_{in} - I_L R_L - V_D - I_L R_D - V_o \quad (3)$$

Guna mendapatkan hasil analisa yang mendekati hasil pengujian perangkat keras, digunakan [10]:

$$V_o = \frac{V_{in} - DV_T - (1-D)V_D}{(1-D) - I_L [R_L + R_D(1-D) + DR_{ds}]} \quad (4)$$

B. Cascaded Boost Converter pada Kondisi Ideal

Cascaded boost converter merupakan gabungan seri dua boost converter yang mampu memberikan gain lebih tinggi dari boost converter konvensional [11]. Rangkaian ekivalen konverter ini dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Rangkaian ekivalen cascaded boost converter ideal

Cascaded boost converter memiliki dua kemungkinan metode pensaklaran yang berlaku, yaitu *simultant* dan juga geser fasa 90° sehingga menghasilkan kemungkinan pola pensaklaran seperti pada Tabel 1 [12], [13].

Tabel 1. Kemungkinan pola pensaklaran cascaded boost converter

S ₁	S ₂
0	0
0	1
1	0
1	1

Pada penelitian ini digunakan metode pensaklaran *simultant* yang menghasilkan pola pensaklaran 00 atau 11. Saat saklar hidup, induktor 1 menerima suplai energi dari sumber. Induktor 2 menerima suplai energi dari kapasitor 1.

$$S_{On} : V_{L2} = V_{in} + V_{C1} \quad (5)$$

Pada saat saklar mati, induktor mengubah polaritasnya untuk meneruskan energi yang tersimpan melalui diode ke beban.

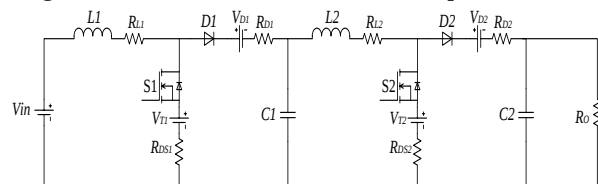
$$S_{Off} : V_{L2} = V_{in} + V_{C1} - V_o \quad (6)$$

Persamaan (7) merupakan persamaan tegangan keluaran cascaded boost converter kondisi ideal.

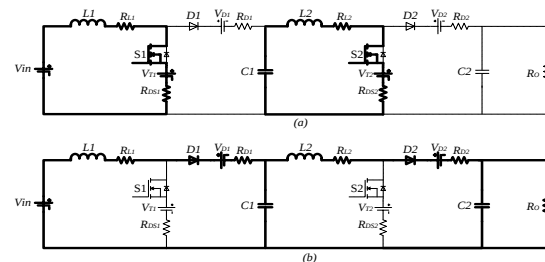
$$V_{out} = \frac{V_{in}}{(1-D)^2} \quad (7)$$

C. Cascaded Boost Converter pada Kondisi Tidak Ideal

Elemen *parasitic* menyebabkan ketidak-idealn rangkaian cascaded boost converter seperti Gambar 5.



Gambar 5. Rangkaian ekivalen cascaded boost converter tidak ideal



Gambar 6. Mode operasi cascaded boost converter tidak ideal (a) Mode Operasi 1 (b) Mode Operasi 2

Analisa mode operasi pada kondisi tidak ideal pada Gambar 6 dinyatakan dalam :

$$S_{On} : V_{L2} = V_{in} - I_{L1}R_{L1} - V_{T1} - I_{L1}R_{ds1} + V_{C1} - I_{L2}R_{L2} - V_{T2} - I_{L2}R_{ds2} \quad (8)$$

$$S_{Off} : V_{L2} = V_{in} - I_{L1}R_{L1} - V_{D1} - I_{L1}R_{D1} - I_{L2}R_{L2} - V_{D2} - I_{L2}R_{D2} - V_o \quad (9)$$

Sehingga didapatkan persamaan tegangan keluaran *cascaded boost converter* pada kondisi tidak ideal.

$$V_o = \frac{V_{in} - DV_{T1} - (1-D)V_{D1} + V_{C1} - DV_{T2} - (1-D)V_{D2}}{(1-D)^2} - I_{L1} - I_{L2}[R_{L1} - R_{L2} + R_{D1}(1-D) + R_{D2}(1-D) - DR_{ds} - DR_{ds2}] \quad (10)$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

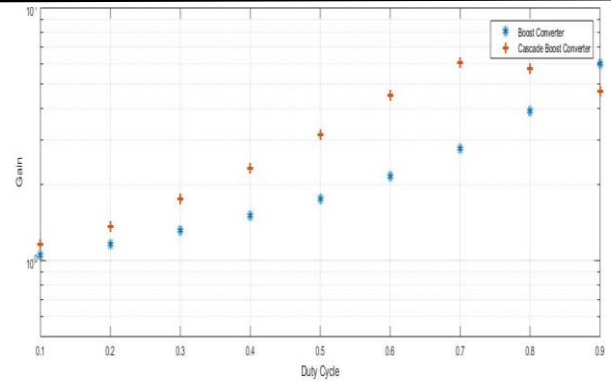
Berdasarkan metodologi penelitian, maka dilakukan simulasi *boost converter* konvensional dan *cascaded boost converter* menggunakan perangkat lunak PSIM serta pengujian laboratorium dengan parameter yang ditunjukkan pada Tabel 2 dan Tabel 3. Data *gain* pada makalah ini didapat berdasarkan perhitungan (11).

Tabel 2. Parameter <i>boost converter</i>	
Parameter	Nilai
Induktor (L/R_L)	8mH/4m Ω
Kapasitor C	47 μ F
MUR860 (V_D/R_D)	0.5V/0.17 Ω
IRFP460 (V_T/R_{DS})	4V/0.27 Ω
Beban	15 Ω 34 Ω 65 Ω

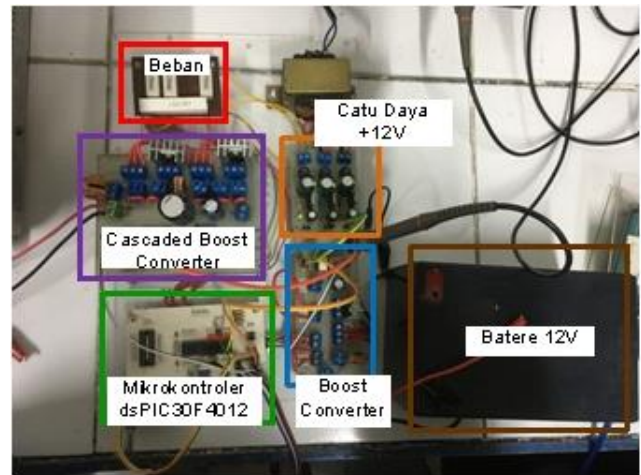
Tabel 3. Parameter <i>cascaded boost converter</i>	
Parameter	Nilai
Induktor (L/R_{L1})	8mH/4m Ω
Induktor (L/R_{L2})	2.5mH/6m Ω
Kapasitor (C1)	330 μ F
Kapasitor 2 (C2)	22 μ F
MUR860 (V_D/R_D)	0.5V/0.17 Ω
IRFP460 (V_T/R_{DS})	4V/0.27 Ω
Beban	15 Ω 34 Ω 65 Ω

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (11)$$

Perbandingan *gain* simulasi *boost converter* konvensional dan *cascaded boost converter* pada kondisi tidak ideal dapat dilihat pada Gambar 7. Simulasi menunjukkan *cascaded boost converter* dapat memberikan *gain* lebih tinggi dari *boost converter* konvensional. Analisa dan simulasi dibuktikan dengan percobaan laboratorium dengan komponen pada Gambar 8 yang meliputi rangkaian *boost converter*, rangkaian *cascaded boost converter*, driver MOSFET, mikrokontroler dsPIC30F4012, beban (15 Ohm, 34 Ohm, 65 Ohm), catu daya dan baterai 12V.

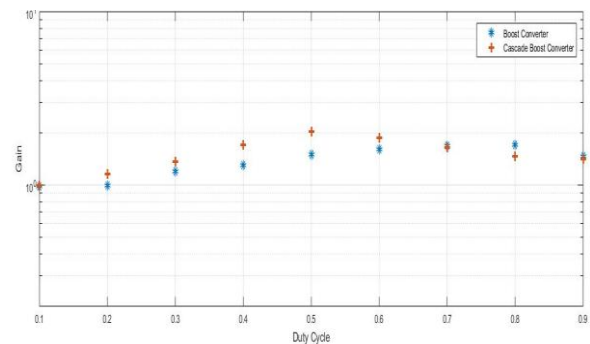


Gambar 7. Perbandingan simulasi *boost converter* konvensional dan *cascaded boost converter* tidak ideal pada beban 65 Ohm



Gambar 8. Implementasi perangkat keras *boost converter* konvensional dan *cascaded boost converter*

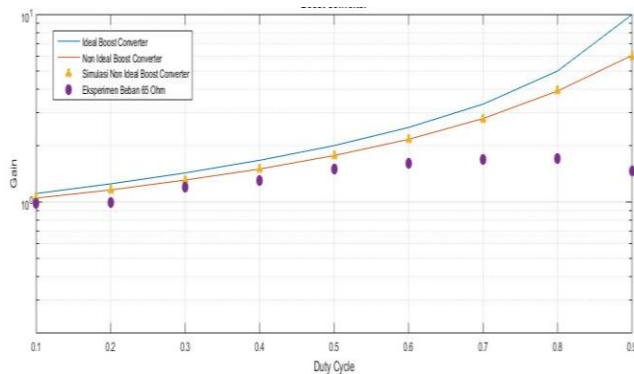
Gambar 9 merupakan perbandingan pengujian alat menggunakan beban 65 Ohm. *Cascaded boost converter* menghasilkan *gain* yang lebih tinggi dari *boost converter* konvensional.



Gambar 9. Perbandingan tegangan keluaran pengujian *boost converter* konvensional dan *cascaded boost converter* tidak ideal dengan beban 65 Ohm

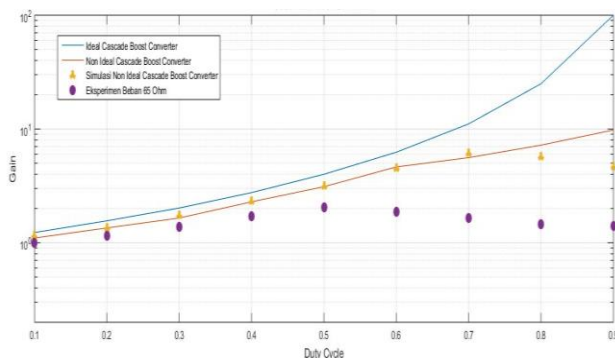
Dilakukan pengolahan data sehingga didapatkan Gambar 10 yang merupakan perbandingan *gain* perhitungan ideal persamaan (1) yang ditunjukkan oleh garis warna biru, analisa tidak ideal persamaan (4) yang ditunjukkan oleh garis warna jingga, simulasi tidak ideal ditunjukkan oleh segitiga warna kuning dan pengujian *boost converter* konvensional ditunjukkan oleh titik berwarna ungu menggunakan beban 65 Ohm. *Boost converter* konvensional dengan analisa sederhana menghasilkan *gain* lebih tinggi dari *gain* analisa *boost converter* konvensional

pada kondisi tidak ideal. Hasil simulasi dan pengujian alat menunjukkan bahwa *gain* yang dihasilkan mendekati analisa *boost converter* konvensional pada kondisi tidak ideal.



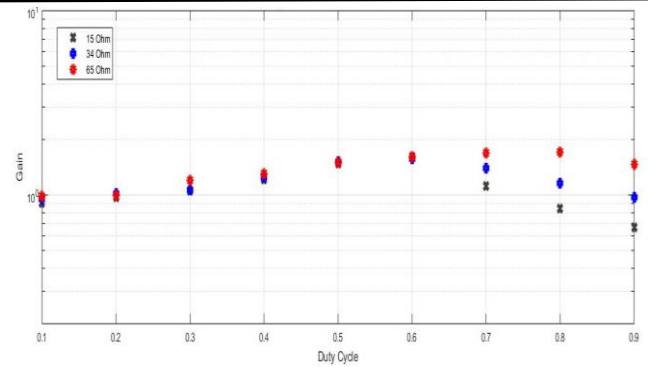
Gambar 10. Perbandingan hasil perhitungan persamaan ideal, analisis tidak ideal, simulasi dan pengujian *boost converter* konvensional dengan beban 65 Ohm

Gambar 11 merupakan hasil perbandingan *gain* perhitungan ideal persamaan (7) yang ditunjukkan oleh garis warna biru, analisa tidak ideal persamaan (10) yang ditunjukkan oleh garis warna jingga, simulasi tidak ideal ditunjukkan oleh segitiga warna kuning dan juga pengujian *cascaded boost converter* ditunjukkan oleh titik berwarna ungu. Pada perbandingan ini terlihat bahwa *cascaded boost converter* ideal menghasilkan *gain* yang tak terhingga. Setelah dilakukan analisa kondisi tidak ideal dan simulasi, *gain* pengujian alat lebih mendekati analisa *cascaded boost converter* kondisi tidak ideal.

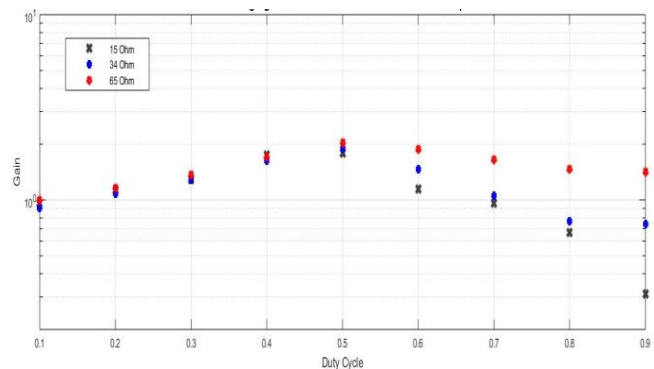


Gambar 11. Perbandingan hasil perhitungan persamaan ideal, analisis tidak ideal, simulasi dan pengujian *cascaded boost converter* dengan beban 65 Ohm

Tegangan yang dihasilkan pada *duty cycle* besar mengalami penurunan yang disebabkan adanya efek nilai elemen *parasitic* diluar dari analisa tidak ideal yang tidak diketahui besarnya. Gambar 12 dan Gambar 13 di sajikan kurva perubahan *gain boost converter* konvensional dan *cascaded boost converter* pada kondisi tidak ideal terhadap tiga nilai beban yang berbeda. Hal ini berkaitan dengan semakin kecil nilai beban yang digunakan maka efek *parasitic* yang mempengaruhi semakin besar.



Gambar 12. Perubahan tegangan keluaran *boost converter* tidak ideal terhadap beban



Gambar 13. Perubahan tegangan keluaran *cascaded boost converter* tidak ideal terhadap beban

IV. KESIMPULAN

Cascaded boost converter telah dijabarkan pada uraian diatas. Dari hasil simulasi dan pengujian menunjukkan bahwa rugi-rugi yang disebabkan oleh elemen *parasitic* mengakibatkan *gain* menjadi berkurang. Penggunaan *cascaded boost converter* menjadi penting karna dapat menaikkan *gain* sehingga dapat berkontribusi untuk pengoptimalan pengereman regeneratif pada mesin BLDC.

REFERENSI

- [1] S. A. Note, M. Software, and D. Kit, "3-Phase BLDC Motor Control with Hall Sensors Using DSP56F80x," pp. 1–20, 2001.
- [2] P. B. Bobba and K. R. Rajagopal, "Compact regenerative braking scheme for a PM BLDC motor driven electric two-wheeler," 2010 *Jt. Int. Conf. Power Electron. Drives Energy Syst. PEDES 2010 2010 Power India*, pp. 1–5, 2010.
- [3] H. Aulia Rahman and S. Riyadi, "Pengaruh Duty Cycle Terhadap Perpindahan Energi Pada Motor Bldc (Brushless Direct Current) Saat Pengereman Regeneratif Berbasis Dspic30F4012," pp. 247–254, 2019.
- [4] I. W. A. Nugroho and S. Riyadi, "Regenerative Braking with Duty Cycle Settings for Brushless DC Motor," *Proc. Int. Conf. Electr. Eng. Informatics*, vol. 2019-July, no. July, pp. 336–341, 2019.
- [5] N. Boujelben, F. Masmoudi, M. Djemel, and N. Derbel, "Modeling and comparison of boost converter with cascaded boost converters," *Green Energy Technol.*, pp. 85–103, 2019.
- [6] A. Fathah, "Design of a Boost Converter," *Fathah, A. (2013). Des. a Boost Convert. 2. Retrieved from http://ethesis.nitrkl.ac.in/4811/1/109EE0612.pdf*, p. 2, 2013.
- [7] G. Narayanan, "Computationally efficient models for simulation

-
- of non-ideal DC – DC Computationally efficient models for simulation of non-ideal DC – DC converters operating in continuous,” no. July, 2017.
- [8] S. Riyadi, *Konverter Statis : Chopper dan PWM Rectifier serta Aplikasinya*. 2018.
- [9] N. Boujelben, F. Masmoudi, M. Djemel, and N. Derbel, “Design and comparison of quadratic boost and double cascade boost converters with boost converter,” *2017 14th Int. Multi-Conference Syst. Signals Devices, SSD 2017*, vol. 2017-Janua, pp. 245–252, 2017.
- [10] A. P. Electronics, “Section 3 : Effect of Non-Ideal Switches And Components On DC-DC Converters,” vol. 1, pp. 1–34.
- [11] M. Lotfi Nejad, B. Poorali, E. Adib, and A. A. M. Birjandi, “New cascade boost converter with reduced losses,” *IET Power Electron.*, vol. 9, no. 6, pp. 1213–1219, 2016.
- [12] F. L. Tofoli, D. de C. Pereira, W. J. de Paula, and D. de S. Oliveira Júnior, “Survey on non-isolated high-voltage step-up dc-dc topologies based on the boost converter,” *IET Power Electron.*, vol. 8, no. 10, pp. 2044–2057, 2015.
- [13] M. Z. Malik, A. Ali, and D. Kumar, “A Two Cascaded Boost Converter with High Voltage Gain Module,” *Int. J. Comput. Electr. Eng.*, vol. 9, no. 2, pp. 476–483, 2017.