



Evaluasi Respon Dinamis Konverter Cascaded Buck-Boost Tiga Unit Menggunakan Pendekatan Simulasi di MATLAB/Simulink

Rio Rivaldo Sinurat

Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan

Christoper Alfredo Laoli

Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan

Arga Sakti Oktavianus Sihombing

Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan

Desman Jonto Sinaga

Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan

Arwadi Sinuraya

Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan

Alamat: Jln. Willem Iskandar, Pasar V, Percut Sei Tuan, Deli Serdang, Sumatera Utara

Korespondensi penulis: rsinurat2601@gmail.com

Abstract. Buck-boost DC-DC converters are widely used in power systems due to their ability to step up or step down voltage according to load requirements. However, in applications requiring a wider voltage regulation range and high stability, a single-stage configuration is often insufficient. Therefore, this study evaluates the dynamic response of a three-unit cascaded buck-boost converter using a simulation approach in MATLAB/Simulink. Each converter unit is connected in series to increase the flexibility of output voltage regulation. The analysis is carried out by observing the change in output voltage against duty cycle and loading variations to assess the transient characteristics and system stability. The simulation results show that the cascaded configuration is capable of producing a stable output voltage with a controlled transient response, although sensitivity to duty cycle variations increases with the increase in the number of stages. Thus, the three-unit cascaded buck-boost topology can be applied to DC power systems requiring adaptive and broad voltage regulation.

Keywords: DC-DC Converter, Buck-Boost, Cascaded Converter, Dynamic Response, MATLAB Simulation.

Abstrak. Konverter DC-DC tipe buck-boost banyak digunakan pada sistem daya karena kemampuannya untuk menaikkan maupun menurunkan tegangan sesuai kebutuhan beban. Namun, pada aplikasi yang membutuhkan rentang pengaturan tegangan yang lebih luas serta stabilitas yang tinggi, konfigurasi satu tahap seringkali tidak mencukupi. Oleh karena itu, penelitian ini mengevaluasi respon dinamis konverter cascaded buck-boost tiga unit menggunakan pendekatan simulasi pada MATLAB/Simulink. Setiap unit konverter dihubungkan secara seri untuk meningkatkan fleksibilitas pengaturan tegangan keluaran. Analisis dilakukan dengan mengamati perubahan tegangan keluaran terhadap variasi duty cycle dan pembebanan untuk menilai karakteristik transien dan kestabilan sistem. Hasil simulasi menunjukkan bahwa konfigurasi cascaded mampu menghasilkan tegangan keluaran yang stabil dengan respon transien yang terkendali, meskipun sensitivitas terhadap variasi duty cycle meningkat seiring bertambahnya jumlah tahap. Dengan demikian, topologi cascaded buck-boost tiga unit dapat diterapkan pada sistem tenaga DC yang membutuhkan pengaturan tegangan adaptif dan luas. **Kata kunci:** Konverter DC-DC, Buck-Boost, Cascaded Converter, Respon Dinamis, Simulasi MATLAB.

PENDAHULUAN

Perkembangan sistem konversi daya DC menjadi penting dalam berbagai aplikasi seperti sistem energi terbarukan, pengisian baterai, kendaraan listrik, dan DC microgrid. Untuk memperoleh rentang pengaturan tegangan yang lebih luas, digunakan konfigurasi cascaded buck-boost converter, dimana beberapa unit konverter DC-DC dihubungkan secara seri untuk menghasilkan tegangan keluaran yang lebih stabil dan fleksibel (Antoaneta, Bocean, Rotea, & Budic, 2021).

Namun, penambahan jumlah tahapan konverter dapat mempengaruhi respon dinamis, stabilitas, serta efisiensi sistem. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi respon dinamis dari tiga unit buck-boost yang dihubungkan secara cascaded dengan pendekatan simulasi menggunakan MATLAB/Simulink (Extraction, Decision, Using, & Approaches, n.d.).

KAJIAN TEORITIS

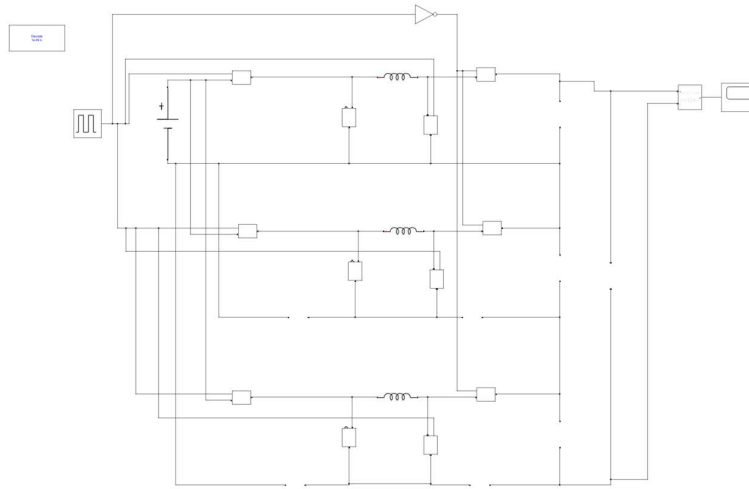
Konverter DC-DC merupakan rangkaian elektronika daya yang berfungsi untuk mengubah level tegangan DC menjadi nilai tegangan DC lainnya melalui proses pensaklaran. Salah satu jenis konverter yang umum digunakan adalah buck-boost converter, yang memiliki kemampuan untuk menaikkan (boost) maupun menurunkan (buck) tegangan input sesuai dengan pengaturan duty cycle pada sakelar utamanya (Investments, 2022). Secara umum, hubungan antara tegangan masukan dan keluaran pada mode Continuous Conduction Mode (CCM) dinyatakan oleh persamaan $V_{out} = \frac{D}{1-D} V_{in}$ sehingga nilai duty cycle D menjadi parameter utama dalam pengaturan tegangan keluaran (Kalbantner, Markantonakis, Hurley-smith, & Semal, 2021).

Untuk aplikasi yang memerlukan rentang pengaturan tegangan yang lebih luas, stabil, dan mampu beroperasi pada beban bervariasi, digunakan konfigurasi cascaded buck-boost converter, dimana beberapa unit buck-boost dihubungkan secara seri (Man, Ding, Ren, & Xu, 2021). Dalam konfigurasi ini, tegangan keluaran total merupakan hasil multiplikasi penguatan tegangan dari setiap tahap konverter (Method, 2023). Jumlah tahapan yang lebih banyak memungkinkan peningkatan tegangan keluaran yang signifikan tanpa harus menggunakan komponen yang bekerja pada tegangan tinggi, namun juga meningkatkan kompleksitas kontrol serta karakteristik respon dinamis (Plaza, Mart, & Rubiera, 2020). Selain itu, nilai induktor (L) dan kapasitor (C) berperan penting dalam menentukan karakteristik transien, seperti overshoot, ripple, rise time, dan settling time, terutama saat terjadi perubahan beban atau duty cycle. Oleh karena itu, kajian terhadap respon dinamis sangat diperlukan untuk memastikan kestabilan sistem pada konfigurasi cascaded tiga tahap (Shamseldin, 2023).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan menggunakan pendekatan pemodelan dan simulasi berbasis perangkat lunak MATLAB/Simulink untuk mengevaluasi respon dinamis konverter cascaded buck-boost tiga unit (Tawfiq & Ibrahim, 2022). Setiap unit konverter dimodelkan menggunakan komponen ideal berupa sakelar MOSFET, induktor, dioda, dan kapasitor sesuai karakteristik topologi buck-boost (Underwater & Materials, 2021). Tegangan masukan dijaga konstan, sedangkan nilai duty cycle divariasikan untuk memperoleh perubahan tegangan keluaran dan respon transien sistem (Zhang, Zhu, Han, & Wang, 2021). Simulasi dijalankan dalam kondisi Continuous Conduction Mode (CCM) dengan frekuensi pensaklaran tetap (Zhao, Bao, Wang, Han, & Wang, 2019). Parameter respon yang diamati meliputi tegangan keluaran total, overshoot, settling time, dan ripple tegangan ketika terjadi perubahan duty cycle maupun beban. Hasil simulasi kemudian dianalisis untuk menentukan stabilitas dan karakteristik dinamika dari konfigurasi cascaded tiga tahap, sehingga diperoleh hubungan kinerja sistem terhadap pengaturan duty cycle dan parameter rangkaian.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN



Gambar 1. Rangkaian simulasi Konverter Cascaded Buck-Boost Tiga Unit

Rangkaian yang ditunjukkan pada Gambar 1 merupakan konfigurasi cascaded buck-boost converter tiga unit yang disimulasikan menggunakan MATLAB/Simulink. Setiap unit konverter memiliki struktur dasar yang sama, terdiri dari sakelar MOSFET, induktor (L), dioda (D), dan kapasitor keluaran (C). Ketiga unit ini dihubungkan secara seri pada jalur tenaga, sehingga tegangan keluaran dari unit pertama menjadi masukan bagi unit kedua, dan seterusnya hingga unit ketiga menghasilkan tegangan keluaran total.

Sinyal PWM diberikan secara bersama atau terpisah ke ketiga sakelar MOSFET, bergantung pada strategi kontrol yang digunakan. Ketika sakelar berada dalam kondisi ON, induktor pada masing-masing unit menyimpan energi dari sumber. Sebaliknya, saat sakelar OFF, energi induktor dilepaskan melalui dioda menuju kapasitor dan beban. Proses ini berlangsung secara berulang sesuai frekuensi switching, sehingga tercipta tegangan DC keluaran yang telah teratur.

Konfigurasi cascaded ini memberikan dua manfaat utama:

1. Rentang pengaturan tegangan yang lebih luas, karena penguatan terjadi secara bertahap pada setiap unit.
2. Pengurangan tegangan kerja setiap komponen, sehingga komponen dapat dipilih dengan rating yang lebih rendah dibandingkan satu konverter boost tunggal bertegangan tinggi.

Secara keseluruhan, rangkaian ini bertujuan untuk menghasilkan tegangan DC yang dapat dinaikkan atau diturunkan secara fleksibel dengan mengatur duty cycle switching.

Untuk satu unit buck-boost converter yang beroperasi pada Continuous Conduction Mode (CCM), hubungan tegangan input dan output diberikan oleh:

$$V_{out} = \frac{D}{1-D} V_{in}$$

Karena sistem ini menggunakan tiga unit yang tersusun cascaded, maka tegangan keluaran total diperoleh dari perkalian penguatan tiap unit:

$$V_{out-tota} = V_{in} \left(\frac{D}{1-D} \right)^3$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa semakin besar nilai duty cycle, maka tegangan keluaran meningkat secara eksponensial. Namun, peningkatan duty cycle yang terlalu tinggi akan

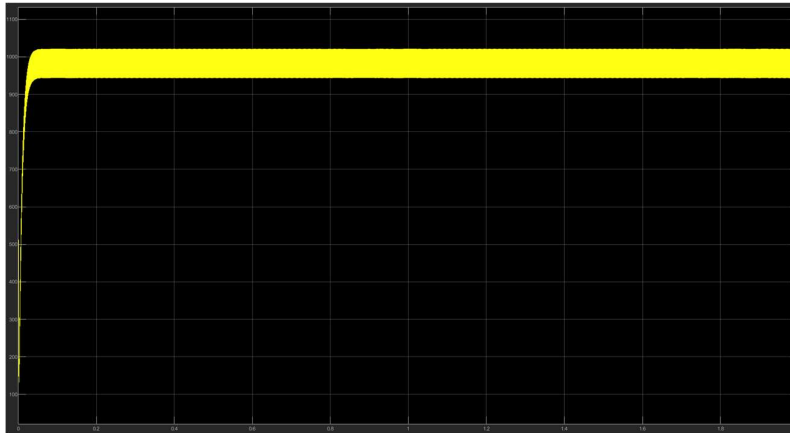
mengurangi stabilitas dan menambah ripple, sehingga pemilihan duty cycle harus diatur sesuai batas operasi stabil.

Karakteristik respon dinamis sistem dipengaruhi oleh:

1. Nilai induktor L yang berperan dalam kelancaran aliran energi
2. Nilai kapasitor C sebagai penyaring tegangan keluaran
3. Frekuensi switching sebagai pembentuk pola gelombang arus induktor
4. Variasi beban yang memengaruhi kestabilan tegangan output

Jika nilai L dan C cukup besar, maka ripple tegangan dan arus menjadi kecil, tetapi respon transien menjadi lambat. Sebaliknya, nilai yang terlalu kecil dapat menyebabkan respon cepat tetapi ripple meningkat, sehingga diperlukan desain parameter yang seimbang.

4.1 Analisis Grafik



Gambar 2. Grafik Hasil

Grafik menunjukkan respons tegangan keluaran sistem cascaded buck-boost (gabungan tiga unit) terhadap langkah (step) referensi pada $t = 0$. Terlihat pola kenaikan cepat pada awal (transien) hingga mencapai kondisi tunak (steady-state) di rentang kira-kira 950 – 1.030 (satuan sesuai pengaturan simulasi). Tidak terlihat overshoot signifikan dan ripple steady-state relatif kecil dibandingkan nilai DC, sehingga menandakan desain kontrol dan pemilihan komponen (L , C , f_{sw}) yang memadai.

Secara matematis, respon transien sistem tertutup dapat didekati oleh model orde-pertama (untuk analisis garis besar):

$$V_{out-total} = V_{ss} \left(1 - e^{-t/\tau} \right)$$

Dimana V_{ss} adalah tegangan steady-state total dan τ adalah konstanta waktu efektif sistem. Dari grafik, waktu naik cepat (rise time) terlihat pada rentang orde puluhan milidetik dan kondisi tunak tercapai dalam kurang dari 0.1 s, sehingga τ bernilai relatif kecil sebuah indikasi respon kontrol yang cepat.

Hubungan statis ideal untuk tiap unit buck-boost pada CCM adalah:

$$V_{out} = \frac{D}{1-D} V_{in}$$

Karena konfigurasi tiga unit cascaded, tegangan keluaran total (ideal, tanpa rugi dan batasan dinamis) diperkirakan:

$$V_{out-total} = V_{in} \left(\frac{D}{1-D} \right)^3$$

Persamaan ini menjelaskan mengapa perubahan kecil pada duty cycle D akan lebih berpengaruh pada keluaran total: efek penguatan bersifat multiplikatif sehingga sensitivitas terhadap variasi D meningkat.

Ripple dan dinamika switching. Rentang ripple yang terlihat pada steady-state disebabkan oleh perubahan arus induktor tiap siklus switching. Untuk tiap induktor pada mode CCM, peak-to-peak perubahan arus per periode diberikan oleh:

$$\Delta I_L = \frac{V_{Lon}}{L} DT_s = \frac{V_{in} D}{FL_{sw}}$$

dengan $T_s = 1/f_{sw}$. Besaran ripple tegangan pada kapasitor berbanding lurus dengan ΔI_L dan berbanding terbalik dengan nilai kapasitansi C . Oleh karena itu, pengurangan ripple dapat dicapai dengan meningkatkan L atau C atau menaikkan frekuensi switching f_{sw} .

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi pada konverter cascaded buck-boost tiga unit menggunakan MATLAB/Simulink, sistem menunjukkan respon dinamis yang stabil dengan waktu naik yang cepat dan tanpa overshoot signifikan. Tegangan keluaran mampu mencapai kondisi tunak dalam rentang waktu kurang dari 0,1 s dan mempertahankan nilai steady-state pada kisaran yang diharapkan, sehingga menunjukkan bahwa strategi pensaklaran dan pemilihan nilai induktor serta kapasitor telah mendukung pengoperasian pada mode arus kontinu (CCM). Ripple tegangan pada keadaan tunak tetap berada pada tingkat yang terkendali, menandakan bahwa konfigurasi cascaded tidak menyebabkan akumulasi gangguan yang berlebihan pada keluaran. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pendekatan cascaded tiga unit pada konverter buck-boost efektif dalam meningkatkan fleksibilitas rentang tegangan keluaran sambil tetap menjaga stabilitas sistem dan kualitas tegangan. Untuk pengembangan lebih lanjut, optimasi kontrol dan pemodelan small-signal dapat diterapkan guna memperoleh kinerja transien dan ripple yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Antoaneta, A., Bocean, C. G., Rotea, C. C., & Budic, A. (2021). *Assessing Antecedents of Behavioral Intention to Use Mobile Technologies in E-Commerce*.
- Extraction, M. F., Decision, E., Using, M., & Approaches, L. (n.d.). *Multivariate Features Extraction and Effective Decision Making Using Machine Learning Approaches*. <https://doi.org/10.3390/en13030609>
- Investments, E. (2022). *Geopolitical Risk as a Determinant of Renewable Energy Investments*. 1–21.
- Kalbantner, J., Markantonakis, K., Hurley-smith, D., & Semal, B. (2021). *P2PEdge: A Decentralised, Scalable P2P Architecture for Energy Trading in Real-Time*. 1–25.
- Man, P., Ding, C., Ren, W., & Xu, G. (2021). *A Nonlinear Fingerprint-Level Radar Simulation Modeling Method for Specific Emitter Identification*.
- Method, B. (2023). *Boltzmann Method*.
- Plaza, M. G., Mart, S., & Rubiera, F. (2020). *Cement Industry: State of the Art and Expectations*.

(1).

- Shamseldin, M. A. (2023). *Design of Auto-Tuning Nonlinear PID Tracking Speed Control for Electric Vehicle with Uncertainty Consideration*.
- Tawfiq, K. B., & Ibrahim, M. N. (2022). *A Simple Commutation Method and a Cost-Effective Clamping Circuit for Three-to-Five-Phase Indirect-Matrix Converters*.
- Underwater, C., & Materials, R. (2021). *Investigation and Practical Application of Silica Nanoparticles Composite Underwater Repairing Materials*. 1–10.
- Zhang, Y., Zhu, Y., Han, K., & Wang, J. (2021). *A High-Accuracy Stochastic FIR Filter with Adaptive Scaling Algorithm and Antithetic Variables Method*. 1–13.
- Zhao, Q., Bao, K., Wang, J., Han, Y., & Wang, J. (2019). *An Online Hybrid Model for Temperature Prediction of Wind Turbine Gearbox Components*. 1–20.
<https://doi.org/10.3390/en12203920>