

Analisis kondisi tunak dan simulasi konverter DC-DC *buck-boost*

Sofyan Muhammad Iman^{1*}, Febi Ariefka Septian Putra²

^{1,2}Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung

Jl. Gegerkalong Hilir Ds. Ciwaruga, Bandung Barat 40559, Indonesia

^{1*}sofyan.muhammad@polban.ac.id, ²febi.ariefka@polban.ac.id

ABSTRAK

Energi baru terbarukan mengalami perkembangan yang sangat pesat, terutama pada teknologi yang ada pada konverter. Dengan menganalisis operasi kerja dari suatu konverter tersebut, maka kita dapat mengetahui karakteristik dari konverter. Pada penelitian ini penulis melakukan analisis keadaan tunak tegangan keluaran pada konverter DC-DC *buck-boost* yang mana konverter ini memiliki dua mode kerja saat mengatur besarnya persentase dari *duty cycle*. Tahap pertama yang dilakukan adalah mencari persamaan ketika sakelar konverter dalam kondisi ON dan OFF kemudian dimodelkan dalam persamaan *Kirchhoff voltage law* (KVL) yang kemudian ketika persamaan tersebut diperoleh, maka tahap selanjutnya adalah mensubstitusikan persamaan KVL ketika sakelar ON dan OFF dalam waktu satu periode kemudian mengintegrasikan dan menyederhanakannya. Sebagai bentuk validasi dari penurunan persamaan tersebut maka dilakukan simulasi menggunakan *software* PSIM. Hasil yang diperoleh adalah ketika tegangan pada induktor dengan waktu *switching* nol sampai T_{on} adalah sebesar V_s dan ketika waktu *switching* T_{on} sampai T sebesar $-V_o$, dan ketika *duty cycle* dibawah 50% konverter akan sebagai mode *buck*, ketika *duty cycle* diatas 50% konverter akan sebagai mode *boost*.

Kata kunci: keadaan tunak, *buck-boost*, *duty cycle*

ABSTRACT

New renewable energy is experiencing very rapid development, especially in the technology involved such as converter technology. By analyzing how a converter works, we can find out the characteristics of the converter. In this research the author carried out a steady state analysis of the output voltage on a DC-DC buck-boost converter, where this converter has two working modes when setting the duty cycle percentage. The first step is to find the equation for the converter switch when it is on and off, then model it using the Kirchhoff voltage law (KVL) equation, then after obtaining this equation, the next step is to substitute the KVL equation when the switch is ON and OFF in one period, then integrate, which then simplifies it. As a form of validation of the derivative equation, a simulation was carried out using PSIM software. The results obtained are that when the voltage on the inductor with the transition time from zero to T_{on} is V_s and when the transition time from T_{on} to T is $-V_o$, and when the duty cycle is below 50 % the converter will enter buck mode, when the duty cycle is above 50% the converter will enter boost mode.

Keywords: steady state, *buck-boost*, *duty cycle*

1. PENDAHULUAN

Pada era abad dua puluh satu ini pertumbuhan energi baru terbarukan (EBT) semakin pesat. Dengan menekan pertumbuhan EBT di dunia ketenagalistrikan maka akan menekan pula penggunaan energi fosil yang lambat laun akan semakin habis dan tidak bisa diperbaharui. Sistem tersebut tumbuh dalam rangka mengurangi ketergantungan terhadap penggunaan energi fosil tersebut. Berbagai macam sistem yang telah dikembangkan dalam sistem ketenagalistrikan saat ini, diantaranya adalah sistem pembangkit listrik tenaga solar surya, tenaga bayu (angin), tenaga mikro hidro, tenaga panas bumi dan lain sebagainya. Dengan keunggulan dalam sistem yang ramah lingkungan, tidak menyebabkan polusi untuk lingkungan sekitar, dan mempunyai jangka panjang dalam energi yang berkelanjutan dimasa depan. Dan juga dalam perkembangan penyaluran energi dari berbagai sistem pembangkitan sudah mulai berkembang, salah satunya adalah sistem mikro grid. Dalam sistem besar yang terintegrasi dengan berbagai sumber pembangkitan baik skala kecil maupun besar, maka grid ini akan tumbuh dalam sistem tersebut. Berbagai macam jenis grid, salah satunya adalah mikro grid DC dari heterogen jenis pembangkitan atau homogen dengan tujuan untuk mengurangi rugi-rugi di jaringan ketika jarak antara

sumber pembangkitan dan beban terlampaui sangat jauh [1]-[2]. Selain dari pengembangan teknologi grid, maka setiap pembangkitan yang menghasilkan catu daya DC akan membutuhkan sebuah konverter untuk mengkonversi sebuah daya, DC ke DC yang lebih tinggi atau DC ke AC. Untuk sistem PLTS daya yang dibangkitkan dari solar panel adalah berupa daya arus searah/DC. Jika kebutuhan untuk integrasi DC grid antar PLTS agar memiliki tegangan tinggi DC diperlukan konverter DC-DC yang memiliki rasio tinggi yang dapat mengeluarkan tegangan sesuai dengan grid tersebut [3]-[5].

Berbagai jenis konverter yang digunakan dalam sistem EBT, konverter DC-DC konvensional seperti *boost converter*, *buck converter*, dan *buck-boost converter* yang mana penggunaan konverter tersebut sesuai kebutuhan. Untuk menaikkan tegangan DC maka digunakan jenis *boost*, menurunkan tegangan maka digunakan jenis *buck* sedangkan untuk menaikkan atau menurunkan menggunakan *buck-boost*. Dengan teknik modifikasi topologi konverter dapat dilakukan untuk menaikkan performa dari konverter tersebut, seperti konverter *Buck-Boost buck* dengan mode arus kontinu untuk menjaga agar riak arus kecil di sisi masukan dan keluaran yang mana daya masuk berasal dari PV sedangkan keluaran menuju sistem penyimpanan baterai yang terintegrasi [6]. Modifikasi konverter *Buck-Boost* dengan dual *output*, yaitu keluaran DC dan AC, untuk sisi keluaran AC konverter diintegrasikan dengan inverter tiga fasa [7]. Polaritas terminal keluaran dari konverter *Buck-Boost* secara umum terbalik dari polaritas masukannya, namun dapat dirubah dengan modifikasi dengan jenis non-inverting [8]. Analisa konverter *Buck-Boost* berbasis penyaklaran kapasitor yang kemudian konverter dianalisa kinerja secara kondisi tunak (*steady state*), pemodelan ruang keadaan (*state space*) [9]-[11]. Modifikasi dan analisa konverter dengan orde tinggi dimaksudkan untuk mengetahui karakteristik, mengurangi riak arus sisi sumber dengan analisa *state space*, *small signal*, dan *transfer function*. Yang mana mode operasi arus bersifat kontinu [12]-[15].

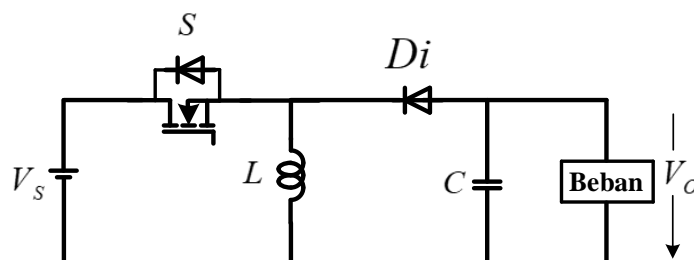
Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penurunan persamaan tegangan keluaran pada konverter *DC-DC Buck-Boost* (B-B) dengan mengacu dari kerja pensakelaran ketika dalam kondisi ON dan OFF dalam kondisi *steady state*. Dengan menggunakan persamaan *kirchoff voltage law* (KVL) pada kedua kondisi sakelar tersebut, kemudian dari persamaan KVL tersebut diubah kedalam bentuk integral dalam waktu satu periode pensakelaran yang kemudian disederhanakan untuk mendapatkan persamaan tegangan keluaran konverter. Dari hasil analisa tersebut akan dilakukan pengujian konverter *Buck-Boost* (B-B) menggunakan *software* PSIM sebagai bentuk validasi dari analisa, dengan pengaturan konverter menggunakan sinyal *pulse width modulatio* (PWM).

2. METODE PENELITIAN

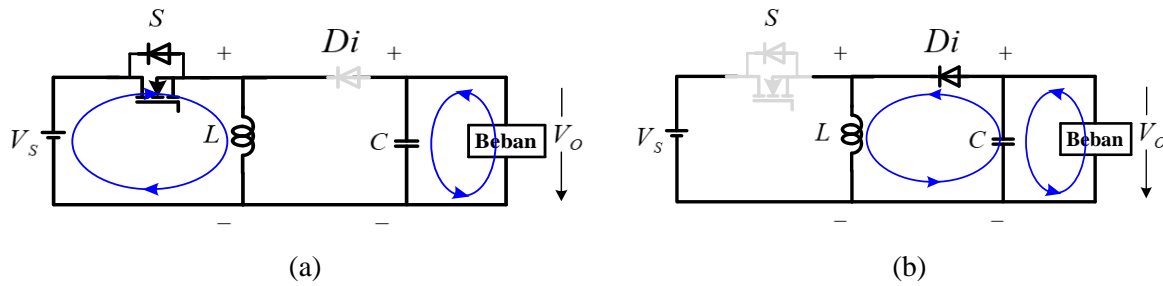
Metode penelitian yang akan dilakukan dibagi menjadi dua tahap, yaitu analisa secara matematis dari konverter B-B, dan simulasi dengan PSIM. Untuk operasi kerja pada konverter ketika kondisi sakelar *on* dan *off*, lalu di analisa kondisi *steady state* dari tegangan keluaran hingga penurunan persamaan praktis dan tahapan selanjutnya adalah memodelkan topologi Konverter B-B ke dalam *software* simulasi.

2.1 Analisa Steady State Konverter B-B

Konverter B-B berfungsi sebagai penurun dan penaik tegangan dengan tegangan keluaran lebih besar atau lebih kecil dari tegangan masukan. Topologi dasar konverter diberikan dalam Gambar 1. Pengaturan tegangan keluaran dari konverter tersebut adalah dengan cara mengatur besarnya *duty cycle* pada komponen pensakelaran, dalam hal ini komponen pensakelaran berupa MOSFET. Pada Gambar 2. merupakan siklus kerja dari Konverter B-B.



Gambar 1. Topologi dasar konverter DC-DC *buck-boost*



Gambar 2. Siklus kerja konverter DC-DC buck-boost: (a) sakelar ON, (b) sakelar OFF

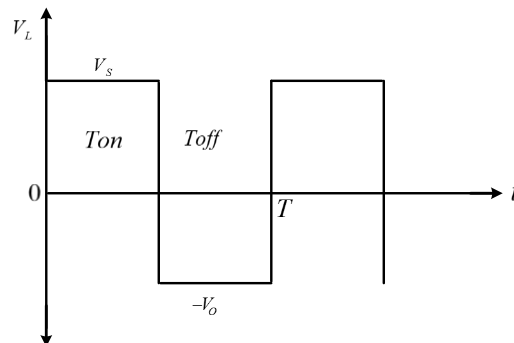
Berdasarkan Gambar 2, ketika sakelar dalam keadaan *on* atau menutup, *reverse-bias* terjadi pada dioda (Di), akan menjadi,

$$V_s = V_L = L \frac{di_L}{dt} \tag{1}$$

Untuk sakelar dalam keadaan *off*, maka *forward bias* akan terjadi pada dioda, maka persamaan KVL menjadi,

$$V_o = V_L = L \frac{di_L}{dt} \tag{2}$$

Dari persamaan (1) dan (2), jika dalam satu siklus keadaan (sakelar *on* dan *off*) besarnya V_L akan menjadi seperti Gambar 3.



Gambar 3. Gelombang tegangan pada induktor

Gambar 3 merupakan besarnya tegangan induktor dengan satu siklus pensakelaran sampai T . Dengan persamaan (1) dan (2) jika disubstitusikan dalam satu periode, maka akan menjadi,

$$\frac{1}{T} \int_0^T V_L dt = 0 \tag{3}$$

Dari persamaan (3) jika dijabarkan menjadi,

$$\frac{1}{T} \int_0^{T_{on}} V_s dt + \int_{T_{on}}^T V_o dt = 0 \tag{4}$$

$$\frac{1}{T} (V_s [t]_0^{T_{on}} + V_o [t]_{T_{on}}^T) = 0 \tag{5}$$

Maka jika persamaan (5) diturunkan menjadi,

$$\frac{1}{T} (V_s (T_{on} - 0) + V_o (T - T_{on})) = 0 \tag{6}$$

Dari persamaan (6) maka,

$$\frac{1}{T}(V_s T_{on} + V_o T - V_o T_{on}) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{V_s T_{on}}{T} + \frac{V_o T}{T} - \frac{V_o T_{on}}{T} = 0 \quad (8)$$

Dari persamaan (8) jika dilakukan penyederhanaan yang mana besarnya $\frac{T_{on}}{T} = D$ maka,

$$V_s D + V_o - V_o D = 0 \quad (9)$$

Dari persamaan (9) jika disederhanakan menjadi,

$$V_o = -\frac{V_s D}{1-D} \quad (10)$$

Persamaan (10) merupakan analisis keadaan tunak tegangan keluaran pada Konverter B-B. Tabel 1 berikut merupakan spesifikasi dari konverter.

Tabel 1. Parameter konverter B-B

| Jenis Komponen | Nilai | Satuan |
|---|-------|---------------|
| Induktor (L) | 450 | μH |
| Kapasitor (C) | 120 | μF |
| Frekuensi <i>switching</i> | 20 | kHz |
| Tegangan Keluaran-Mode <i>Buck</i> (V_o) | 14,5 | V |
| Tegangan Keluaran-Mode <i>Boost</i> (V_o) | 32,68 | V |
| Tegangan Masukan (V_s) | 21,8 | V |
| Beban Resistor (R) | 50 | Ω |

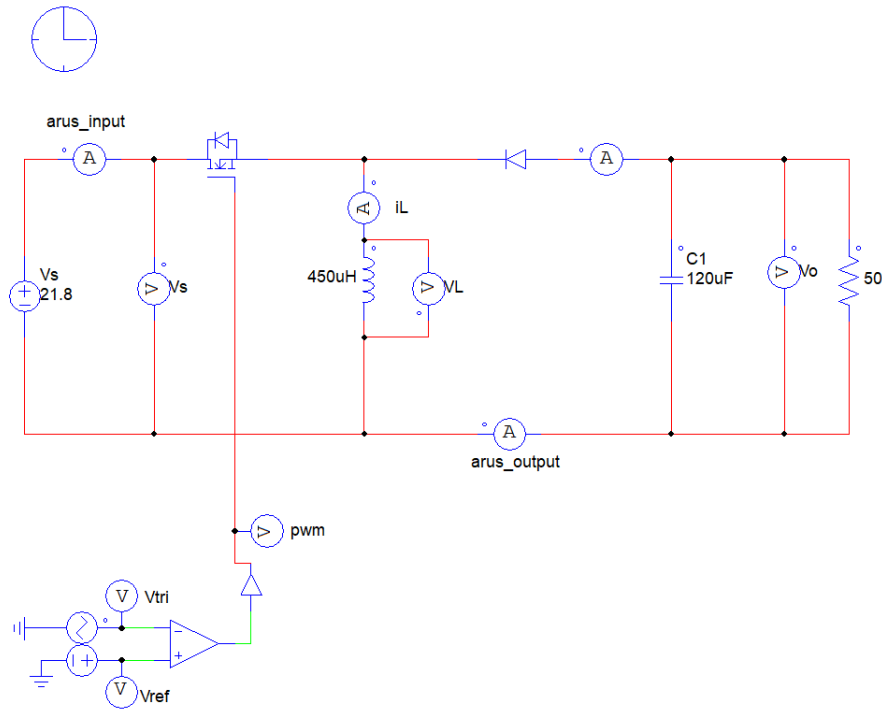
Tabel 1 merupakan spesifikasi dari Konverter B-B. Tahapan selanjutnya adalah memverifikasi hasil analisa kedalam bentuk model simulasi pada PSIM.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembahasan hasil ini dibuktikan dengan perangkat lunak PSIM untuk melihat tegangan keluaran ketika diberi tegangan sumber yang telah ditentukan diawal. Skema pengujian dengan cara memberi sinyal PWM pada MOSFET dengan *duty cycle* dibawah 50%, sama dengan 50%, dan diatas 50%. Dari persamaan (9) menyatakan bahwa besarnya tegangan keluaran tergantung nilai dari *duty cycle*. Pengujian pertama adalah ketika *duty cycle* dibawah 50% dengan sumber tegangan tetap, pengujian kedua *duty cycle* diatas 50% dengan tegangan sumber dan beban tetap.

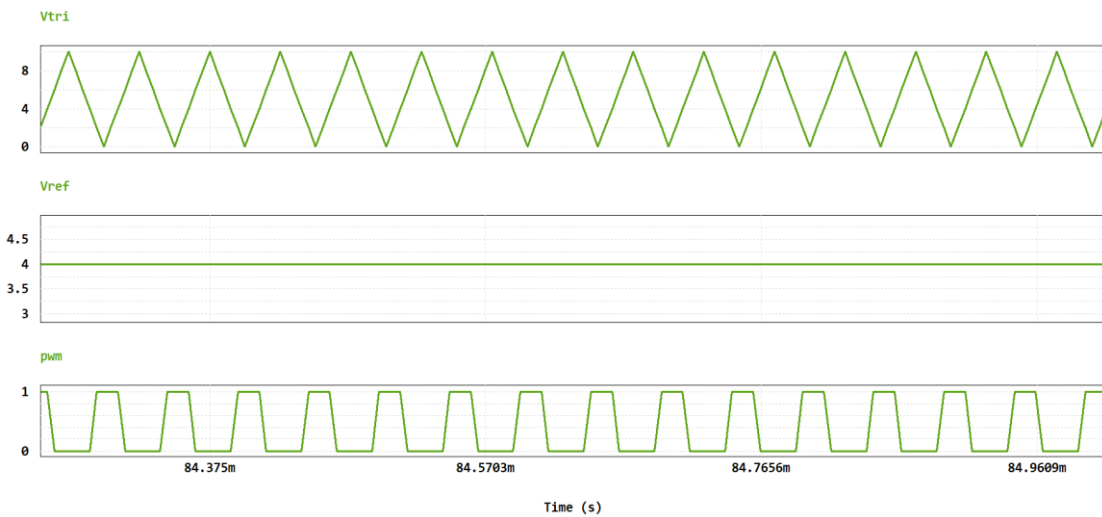
3.1 Pengujian Tegangan Keluaran Dengan *Duty Cycle* Dibawah 50%

Saat pengujian ini dilakukan beban bersifat tetap, sumber tegangan dibuat tetap, sinyal PWM memicu MOSFET untuk bekerja. Frekuensi *switching* yang diberikan sebesar 20 kHz dengan beban berupa resistor. Dengan skema pengujian ini maka akan diketahui operasi kerja dari konverter. Pada Gambar dibawah ini merupakan rangkaian konverter dan hasil yang diperoleh dari simulasi.



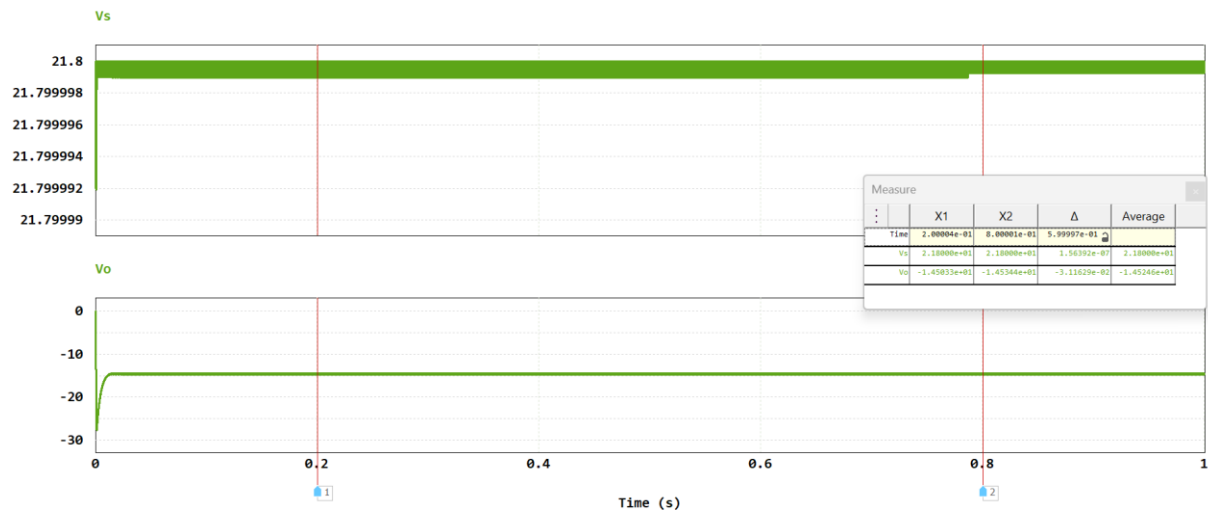
Gambar 4. Konverter B-B dengan kendali PWM

Gambar 4 menunjukkan rangkaian dari konverter yang dikendalikan oleh PWM untuk proses pensakelaran. Sinyal PWM dibangkitkan oleh hasil *summing* antara sinyal DC dan sinyal segitiga yang mana dengan mengatur besarnya sinyal DC maka, *duty cycle* pada sinyal PWM dapat berubah. Pengaturan frekuensi dilakukan pada sinyal segitiga yang mana diberi frekuensi *switching* sebesar 20kHz. Pada Gambar 5 gelombang sinyal DC, sinyal segitiga dan PWM dari rangkaian tersebut dengan besarnya *duty cycle* sebesar 40%.



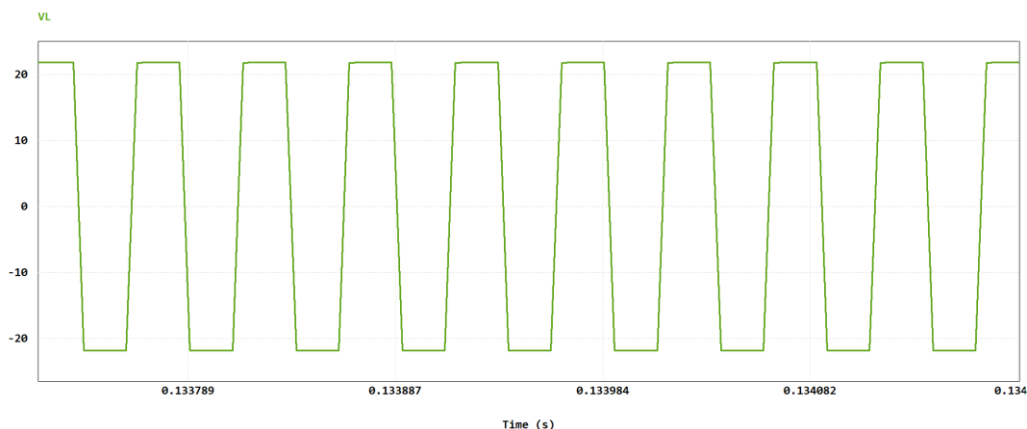
Gambar 5. Gelombang sinyal PWM (bawah), segitiga (atas) dan DC (tengah)

Gambar 5 menunjukkan gelombang sinyal PWM dengan *duty cycle* sebesar 40%. Arti dari 40% adalah besarnya persentase T_{on} . Untuk melihat besarnya tegangan keluaran konverter dengan *duty cycle* 40% terlihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Tegangan sumber (atas) dan keluaran ketika $D < 50\%$ (bawah)

Gambar 6 menunjukkan tegangan sumber dan keluaran konverter dengan *duty cycle* 40%. Jika mengacu pada persamaan (9) bahwasannya polaritas sisi keluaran terbalik dengan sisi masukan. Kemudian dengan *duty cycle* dibawah 50%, maka besarnya tegangan sisi keluaran lebih kecil dari tegangan sumber dan konverter bersifat *buck* (penurun tegangan). Bentuk gelombang dari tegangan pada induktor adalah sebagai berikut.

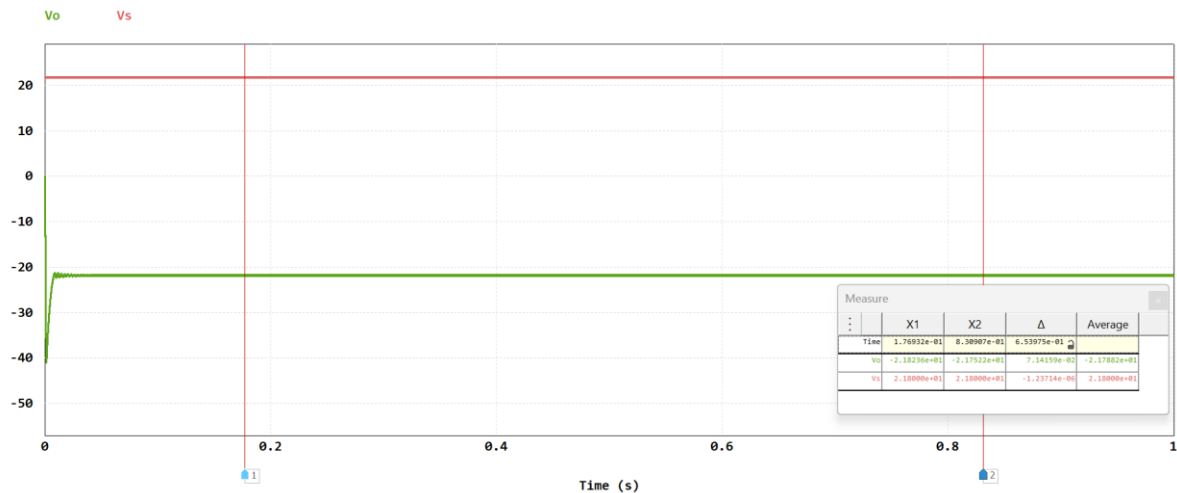


Gambar 7. Tegangan pada induktor

Gambar 7 merupakan bentuk gelombang dari tegangan pada induktor. Yang mana pada besarnya tegangan induktor pada waktu 0 sampai T_{on} sebesar V_s dan ketika waktu T_{on} sampai T sebesar $-V_o$.

3.2 Pengujian Tegangan Keluaran Dengan *Duty Cycle* Sama Dengan 50%

Pada skema ini besarnya tegangan sumber dan beban dibuat sama, namun *duty cycle* diatur mencapai sama dengan 50%. Maka sinyal DC pada sisi pembentukan sinyal PWM diatur setengah dari besarnya sinyal gelombang segitiga. Dalam skema ini diartikan bahwa besarnya persentase $T_{on} = 50\%$ dan $T_{off} = 50\%$. Gambar 8 menunjukkan hasil percobaan skema tersebut.

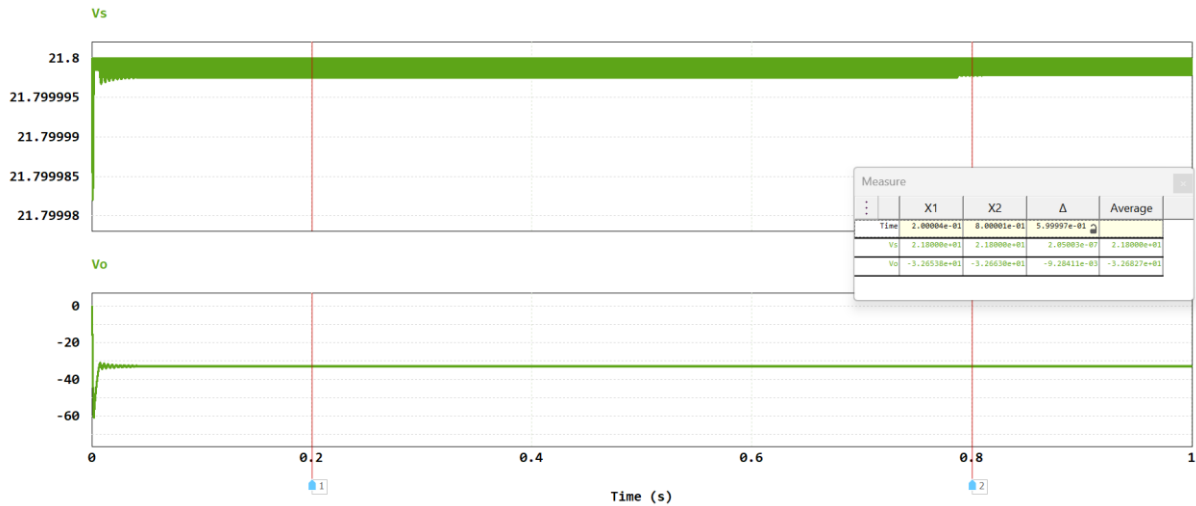


Gambar 8. Tegangan keluaran ketika $D = 50\%$

Gambar 8 menunjukkan besarnya tegangan keluaran ketika $D=50\%$, maka sesuai dengan persamaan (9) $D=50\%$ maka besarnya tegangan keluaran sama dengan tegangan sumber, hanya saja pada tegangan keluaran polaritas terbalik.

3.3 Pengujian Tegangan Keluaran Dengan *Duty Cycle* Diatas 50%

Pada pengujian ini besarnya *duty cycle* diatur pada 60%, dengan nilai tegangan sumber dan beban yang tetap. Sinyal DC pada sisi pembentukan sinyal PWM diatur sebesar 6v dari besarnya sinyal gelombang segitiga yang mencapai 10v. Dalam skema ini diartikan bahwa besarnya persentase $T_{on} = 60\%$ dan $T_{off} = 40\%$. Gambar 9 menunjukkan hasil percobaan.



Gambar 9. Tegangan keluaran ketika $D>50\%$

Gambar 9. adalah keluaran konverter dengan *duty cycle* 60%. Pada persamaan (9) bahwasannya polaritas sisi keluaran terbalik dengan sisi masukan. Kemudian dengan *duty cycle* diatas 50%, maka besarnya tegangan sisi keluaran lebih besar dari tegangan sumber dan konverter bersifat *boost* (penaik tegangan).

4. KESIMPULAN

Pada penelitian ini penulis menganalisa *steady state* tegangan keluaran dari hasil kondisi pensakelaran. Analisa yang dilakukan mulai dari menentukan persamaan KVL dari rangkaian konverter ketika dalam kondisi ON dan OFF, kemudian dari persamaan tersebut persamaan di substitusikan kedalam bentuk persamaan integral dari tegangan yang ada pada induktor yang kemudian

dilakukan penyederhanaan persamaan. Dalam tahap verifikasi hasil dari analisa tersebut dilakukan pengujian berupa simulasi dengan tiga skema pengujian yaitu ketika *duty cycle* dibawah, sama dengan, dan diatas kondisi $T_{on} = 50\%$. Hasil menunjukkan bahwa ketika tegangan pada induktor dengan waktu *switching* nol sampai T_{on} adalah sebesar V_s , ketika waktu *switching* T_{on} sampai T sebesar $-V_o$, dan ketika *duty cycle* dibawah 50% konverter akan sebagai mode *buck*, ketika *duty cycle* diatas 50% konverter akan sebagai mode *boost* dengan tegangan keluaran dari konverter B-B memiliki polaritas yang berlawanan dengan polaritas di sisi masukan, sesuai dengan persamaan yang telah dianalisis.

REFERENSI

- [1] M. Lakshmi and S. Hemamalini, "Nonisolated high gain DC-DC converter for DC microgrids," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 2, pp. 1205–1212, 2017, doi: 10.1109/TIE.2017.2733463.
- [2] P. Prabhakaran and V. Agarwal, "Novel Four-Port DC-DC Converter for Interfacing Solar PV-Fuel Cell Hybrid Sources with Low-Voltage Bipolar DC Microgrids," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 8, no. 2, pp. 1330–1340, 2020, doi: 10.1109/JESTPE.2018.2885613.
- [3] V. Karthikeyan, S. Kumaravel, and G. Gurukumar, "High Step-Up Gain DC-DC Converter with Switched Capacitor and Regenerative Boost Configuration for Solar PV Applications," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. 66, no. 12, pp. 2022–2026, 2019, doi: 10.1109/TCSII.2019.2892144.
- [4] T. G. T. Inverters, M. Das, S. Member, M. Pal, and V. Agarwal, "Novel High Gain , High Efficiency DC – DC Converter Suitable for Solar PV Module Integration With," *IEEE J. PHOTOVOLTAICS*, vol. 9, no. 2, pp. 1–10, Jan. 2019.
- [5] M. Das and V. Agarwal, "Novel High-Performance Stand-Alone Solar PV System With High-Gain High-Efficiency DC-DC Converter Power Stages," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 6, pp. 4718–4728, 2015, doi: 10.1109/TIA.2015.2454488.
- [6] S. Nagarjun, D. Debnath, and C. Chakraborty, "Buck-Boost Buck CCM-DCM Converter for PV Based DC Standalone System," *IEEE Int. Conf. Power Electron. Drives Energy Syst. PEDES 2018*, vol. 1, no. 1, pp. 1–6, Dec. 2018, doi: 10.1109/PEDES.2018.8707723.
- [7] A. K. Chauhan, R. R. Kumar, M. Raghuram, and S. K. Singh, "Extended Buck-Boost derived hybrid converter," *IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meet. IAS 2017*, vol. 1, no. 1, pp. 1–8, Oct. 2017, doi: 10.1109/IAS.2017.8101766.
- [8] R. Nisha and K. Gnana Sheela, "Non Inverting Buck-Boost Converter with PV fed BLDC Drive for Irrigation," in *IEEE International Power and Renewable Energy Conference, IPRECON 2020*, Oct. 2020, pp. 1–5. doi: 10.1109/IPRECON49514.2020.9315216.
- [9] M. Veerachary and V. Khubchandani, "Analysis, Design, and Control of Switching Capacitor Based Buck-Boost Converter," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, vol. 55, no. 3, pp. 2845–2857. doi: 10.1109/TIA.2018.2889848.
- [10] V. Trifa, G. Brezeanu, and E. Ceuca, "Worst-case input voltage in buck, boost and buck-boost converters," in *Proceedings of the International Semiconductor Conference, CAS*, 2019, vol. 2019-October, no. 5, pp. 281–284. doi: 10.1109/SMICND.2019.8923845.
- [11] B. R. Kiran and G. A. Ezhilarasi, "Design and analysis of soft-switched Buck-Boost Converter for PV applications," in *12th IEEE International Conference Electronics, Energy, Environment, Communication, Computer, Control: (E3-C3), INDICON 2015*, 2016, no. 1, pp. 1–5. doi: 10.1109/INDICON.2015.7443509.
- [12] M. V. Vasudha Khubchandani, "Extended Bucking Range Fifth-Order Buck-Boost Converter," in *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) 2020*, 2020, vol. 1, no. 1, pp. 2–7.
- [13] M. Veerachary and V. Khubchandani, "Design and Analysis of Fifth-order Buck-Boost Converter," in *IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE2020)*, 2020, pp. 1–6.
- [14] T. Urkin and M. M. Peretz, "Unified current-programmed digital controller for non-inverting buck-boost converter with optimal steady-state and transient conditions," *Conf. Proc. - IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. - APEC*, vol. 2019-March, pp. 199–206, 2019, doi: 10.1109/APEC.2019.8721978.
- [15] V. Samavatian and A. Radan, "A high efficiency input/output magnetically coupled interleaved buck-boost converter with low internal oscillation for fuel-cell applications: CCM steady-state analysis," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 9, pp. 5560–5568, 2015, doi: 10.1109/TIE.2015.2408560.