

Integrasi PMSG dan *DC-DC Buck-Boost Converter* untuk Meregulasi Tegangan Keluaran menggunakan STM32VET407

EMANNUEL BAYU SETO, LEONARDUS HERU PRATOMO

Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Katolik Soegijapranata
Email: bayusetto424@gmail.com

Received 14 November 2023 | *Revised* 3 Desember 2023 | *Accepted* 11 Desember 2023

ABSTRAK

Energi terbarukan saat ini banyak digunakan sebagai sumber energi baru ramah lingkungan. Imbasnya, sumber energi terbarukan dikembangkan secara signifikan seperti mikrohidro. Mikrohidro adalah alat yang mengkonversikan energi air menjadi energi listrik. Dalam sistem ini, mikrohidro terhubung dengan permanent magnet synchronous generator (PMSG) dan menghasilkan energi listrik tiga fasa dengan skala kecil. Untuk menghasilkan energi listrik yang stabil dan memiliki efisiensi tinggi, diperlukan penyearah dioda tiga fasa dan konverter DC-DC. Penelitian ini mengusulkan DC-DC Buck-Boost Converter dengan peregulasi tegangan keluaran. Dari hasil uji coba simulasi dan implementasi perangkat keras menggunakan microcontroller STM32VET407 sistem dapat berjalan baik, dimana tegangan keluaran selalu sesuai dengan referensi yang diinginkan.

Kata kunci: Mikrohidro, Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG), Konverter DC-DC, DC-DC Buck-Boost converter

ABSTRACT

Renewable energy is currently widely used as a new source of environmentally friendly energy. As a result, renewable energy sources are significantly developed such as micro hydro. Micro hydro is a device that converts water energy into electrical energy. In this system, the microhydro is connected to a permanent magnet synchronous generator (PMSG) and produces three-phase electrical energy on a small scale. To produce stable and high-efficiency electrical energy, a three-phase diode rectifier and a DC-DC converter are required. This research proposes a DC-DC Buck-Boost Converter equipped with output voltage regulation. From the results of simulation trials and hardware implementation using the STM32VET407 microcontroller, the system can run well, it is evident that the output voltage is always in accordance with the desired reference.

Keywords: Micro hydro; Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG), DC-DC converter, DC-DC Buck-Boost converter

1. PENDAHULUAN

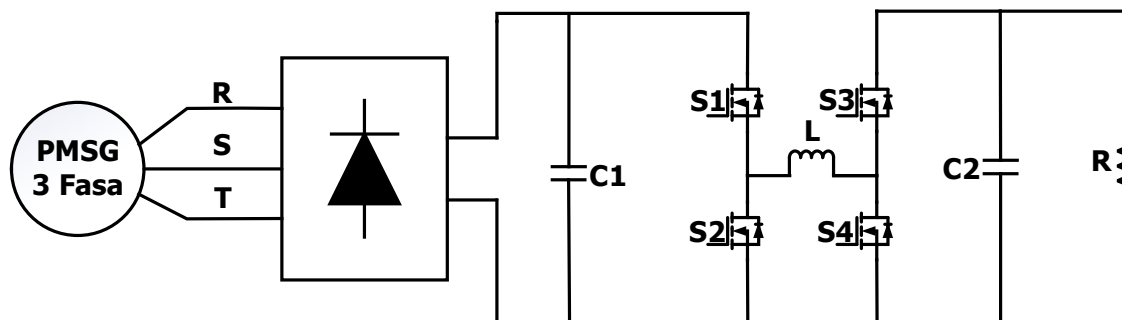
Pada zaman sekarang penggunaan energi hijau sebagai energi baru terbarukan (EBT) semakin meningkat dan perlahan akan menggantikan energi konvensional yakni energi fosil untuk mengurangi dampak buruk terhadap lingkungan. Sumber energi terbarukan dikembangkan dan dioptimalkan sebagai solusi atas krisis energi yang menjadi masalah dalam menghadapi krisis ketersediaan energi konvensional tersebut. Salah satu sumber energi terbarukan yang termasuk dalam jenis energi hijau yakni air atau mikrohidro **(Irimia, dkk, 2020) (Nag & Sarkar, 2021) (Tapia, dkk, 2020) (Yah, dkk, 2017)**. *Permanent magnet synchronous generator (PMSG)* dapat digunakan untuk mengubah energi mekanik yang dihasilkan oleh energi air menjadi energi listrik dengan skala mikro berupa listrik AC tiga fasa, dimana magnet permanen terpasang pada permukaan dan menghasilkan fluks magnet dari rotor. Generator PMSG memiliki komponen bagian yaitu pada bagian stator terbuat dari belitan kawat email dan bagian rotor terbuat dari magnet permanen **(Gil-González, dkk, 2020) (Harrouz, dkk, 2019)**. Energi listrik AC 3 fasa yang dihasilkan oleh generator PMSG harus diubah menjadi listrik DC dengan menggunakan sebuah konverter AC 3 Fasa – DC. Dalam proses konversi atau mengubah energi listrik secara sederhana tegangan dan arus DC yang dihasilkan belum stabil, sehingga diperlukan sebuah rangkaian penyearah 3 fasa dengan topologi gelombang penuh dan sebuah kapasitor sebagai filter untuk listrik keluaran DC **(Rahimi, 2017)**.

Komponen pendukung dalam sistem pembangkit listrik mikrohidro yakni PMSG, penyearah 3 fasa, filter pasif, konverter DC-DC, sistem kendali, dan beban. Penggunaan konverter mempunyai peran penting sebagai kontrol dalam semua sistem pengiriman daya ke beban **(Gil-Gonzalez, dkk, 2020) (Guo, dkk, 2018)**. Desain konverter dari sistem kendali tegangan dan arus yang digunakan untuk menghasilkan listrik DC dengan tingkat kestabilan dan efisiensi yang tinggi merupakan konverter yang sudah dimodifikasi dengan strategi baru. Konverter konvensional yang digunakan dalam mengkonversi energi listrik yang dihasilkan oleh generator PMSG masih memiliki beberapa kelemahan **(Rakshith, dkk, 2018)**. Penggunaan konverter *buck* atau konverter *boost* sebagai konverter konvensional pemasok daya memiliki kekurangan seperti rugi daya, harmonik, riak tinggi, tegangan tidak stabil **(Borkowski, 2018)**. Konverter *buck* atau konverter *boost* memiliki kinerja yang tidak efisien jika digunakan jangka Panjang dan terus menerus. Dampaknya yaitu konverter *buck* atau konverter *boost* dapat merusak sistem pembangkit listrik mikrohidro dikarenakan tegangan dan arus yang dihasilkan tidak stabil dan juga tidak konstan **(Belkaid, dkk, 2020)**. Dengan begitu, dibutuhkan *DC-DC buck-boost converter* sebagai sistem pengendali keluarannya. Sistem kendali pada sebuah konverter DC-DC memiliki peranan yang sangat penting dalam menghasilkan tegangan dan arus **(Chandran, dkk, 2020) (Suharningsih, dkk, 2019)**. Dalam menjalankan *DC-DC buck-boost converter* diperlukan suatu sistem kendali agar menghasilkan tegangan DC dengan besaran nilai sesuai yang diinginkan **(Tripathy & Mohanty, 2020)**.

Berdasarkan pada masalah tersebut, tujuan penelitian ini adalah memanfaatkan sebuah *DC-DC buck-boost converter* sebagai peregulasi tegangan yang diintegrasikan dengan PMSG sehingga tegangan keluarannya stabil sesuai dengan yang diinginkan, walaupun terjadi perubahan putaran pada sistem PMSGnya. penelitian ini diawali dengan kajian karakteristik PMSG dilanjutkan dengan *DC-DC buck-boost converter* dan strategi pengendaliannya. Pada tahap selanjutnya dilakukan simulasi komputasi dan eksperimental untuk memverifikasi hasil yang didapatkan. Tahap akhir penarikan kesimpulan berdasarkan hasil ujicoba yang dihasilkan.

2. METODOLOGI

DC-DC buck-boost converter merupakan rangkaian daya yang menggunakan 4 saklar daya (S1-S4) yang akan bekerja secara bergantian sesuai sistem kerjanya akan berubah bergantian menjadi dua buah saklar dan dua buah dioda, filter induktor dan dua filter kapasitor (C1-C2). *DC-DC buck-boost converter* ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian Daya DC – DC Buck-Boost Converter

2.1 Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)

PMSG merupakan mesin listrik yang berputar memiliki tiga stator seperti generator induksi konvensional, dimana medan eksitasinya berasal dari magnet permanen berbeda dengan generator konvensional. PMSG bekerja secara terisolasi, kondisi ini sangat signifikan karena generator ini digunakan untuk mengubah energi mekanik dari sumber seperti mikrohidro menjadi energi listrik. Generator ini menghasilkan listrik 3 fasa dan sering digunakan pada sistem konversi energi terbarukan. Sebutan sinkron dalam generator ini mengacu pada rotor dan medan magnet yang berputar dengan kecepatan yang sama. Persamaan tegangan pada PMSG dapat dilihat pada Persamaan (1) dibawah ini,

$$V = N \frac{d\phi}{dt} + R.I \quad (1)$$

2.2 DC-DC Buck-Boost Converter

DC-DC buck-boost Converter terdiri dari empat buah saklar daya (S1-S4) dimana nanti secara bergantian sesuai sistem kerjanya akan berubah bergantian menjadi dua buah saklar dan dua buah dioda, filter induktor dan filter kapasitor. *DC-DC buck-boost converter* ini memiliki besaran tegangan output yang lebih besar atau lebih kecil daripada tegangan input. Ketika konverter *buck (step-down)* digabungkan dengan konverter *boost (step-up)*, tegangan keluaran biasanya memiliki polaritas masukan yang sama, dan dapat lebih rendah atau lebih tinggi dari masukan. *DC-DC buck-boost converter* ini memiliki fungsi menaikkan (*Boost*) dan menurunkan (*Buck*) tegangan dengan mengoperasikan empat buah saklar dimana nanti secara bergantian sesuai sistem kerjanya akan berubah bergantian menjadi dua buah saklar dan dua buah dioda. Ketika konverter bekerja dalam mode *boost (step-up)* maka saklar daya S1 dan S4 akan aktif bekerja dan saklar daya S2 dan S3 akan bekerja sebagai dioda. Ketika konverter bekerja dalam mode *buck (step-down)* maka saklar daya S2 dan S3 akan aktif bekerja dan saklar daya S1 dan S4 akan bekerja sebagai dioda. Saklar daya yang aktif bekerja menggunakan pengaturan PWM bergeser fasa yang mengakibatkan pensaklaran secara bergantian. Mode operasi *buck-boost* digunakan untuk menurunkan dan menaikkan tegangan berlebih dan tegangan yang kurang yang dihasilkan PMSG yang dikonversi menjadi listrik DC digunakan sebagai distribusi daya. Pada saat mode operasi *buck-boost converter* difungsikan, tegangan yang dihasilkan oleh *DC-DC buck-boost converter* akan lebih stabil, konstan dan

minim gangguan pada jangkauan yang sudah diatur. *DC-DC buck-boost converter* ini memiliki kendali pada tegangan. Untuk mengendalikan tegangan dibutuhkan suatu strategi kontrol yang harus diterapkan. Strategi kontrol yang digunakan pada konverter ini adalah *Proportional-Integral (PI)*. Pengaplikasian kendali dan strategi kontrol ini menggunakan program yang telah disusun pada sebuah *microcontroller STM32F4VET6*.

2.3 Mode Operasi Konverter

Berdasarkan gambar 1 didapatkan mode operasi *buck* dan *boost*. Mode operasi *boost* 1 yaitu saklar daya S1 dan S4 dihidupkan secara bersama dan saklar daya lainnya dimatikan. Pada mode operasi *boost* 2 yaitu saat S1 dan DS3 dihidupkan dan yang lainnya di matikan. Pada mode operasi *boost* 1 telah dirumuskan dalam Persamaan (2) dan mode operasi *boost* 2 dalam Persamaan (3) dibawah ini.

$$V_i = L \frac{di}{dt} \quad (2)$$

$$V_o = L \frac{di}{dt} + V_i \quad (3)$$

Dimana V_i adalah tegangan sumber, V_o merupakan tegangan pada keluaran.

Pada saat mode operasi *buck* 1 yaitu saklar daya S1 dan DS3 dihidupkan secara bersama dan saklar daya lainnya dimatikan. Pada saat mode operasi *buck* 2 yaitu saat DS2 dan DS3 dihidupkan secara bersamaan dan yang lainnya dimatikan. Pada mode operasi *buck* 1 telah dirumuskan dalam Persamaan (4) dan pada mode operasi *buck* telah dirumuskan dalam Persamaan (5) dibawah ini,

$$V_i = L \frac{di}{dt} + V_o \quad (4)$$

$$L \frac{di}{dt} = V_o \quad (5)$$

Pada saat mode operasi *buck-boost* dirumuskan dalam Persamaan (6) dan Persamaan (7) dibawah ini,

$$d = \frac{ton}{T} \quad (6)$$

$$V_o = \frac{d}{1-d} V_i \quad (7)$$

Dimana d adalah siklus kerja yang digunakan untuk mengendalikan suatu fungsi kerja *DC-DC buck-boost converter*, jika $0 \leq d \leq 0.5$ akan beroperasi sebagai penurun tegangan dan jika $0.5 \leq d \leq 1$ akan beroperasi sebagai penaik tegangan.

2.4 Kontrol Strategi

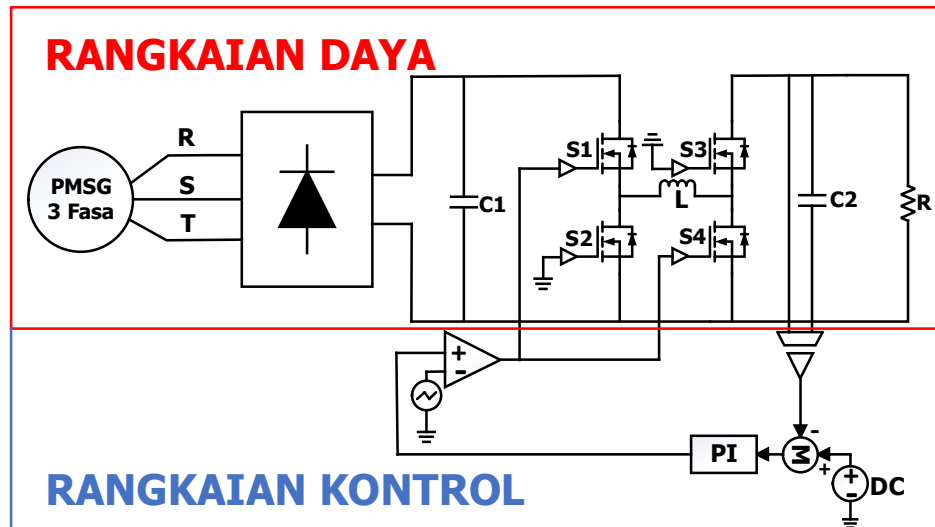
Strategi kontrol *Proportional-Integral (PI)* adalah kontrol yang digunakan untuk menentukan kondisi pensaklaran pada *DC-DC buck-boost converter*. Sensor tegangan digunakan sebagai pembaca sinyal referensi dan sinyal aktual. Komparasi dari sinyal aktual dan sinyal referensi menghasilkan sinyal *error*. Sinyal *error* akan dikomparasi dengan kontrol PI menghasilkan sinyal PI. Sedangkan, sinyal PI digunakan sebagai masukan pensaklaran untuk S1 dan S4 sebagai penaik dan penurun serta penstabil keluaran tegangan.

Pada Gambar 2 rangkaian daya dan rangkaian kontrol *DC-DC buck-boost converter* tersebut dikendalikan menggunakan kontrol PI. Kontrol PI digunakan untuk mendapatkan hasil yang memiliki respon cepat dan memiliki fungsi sebagai penghilang bias pada sistem. Strategi

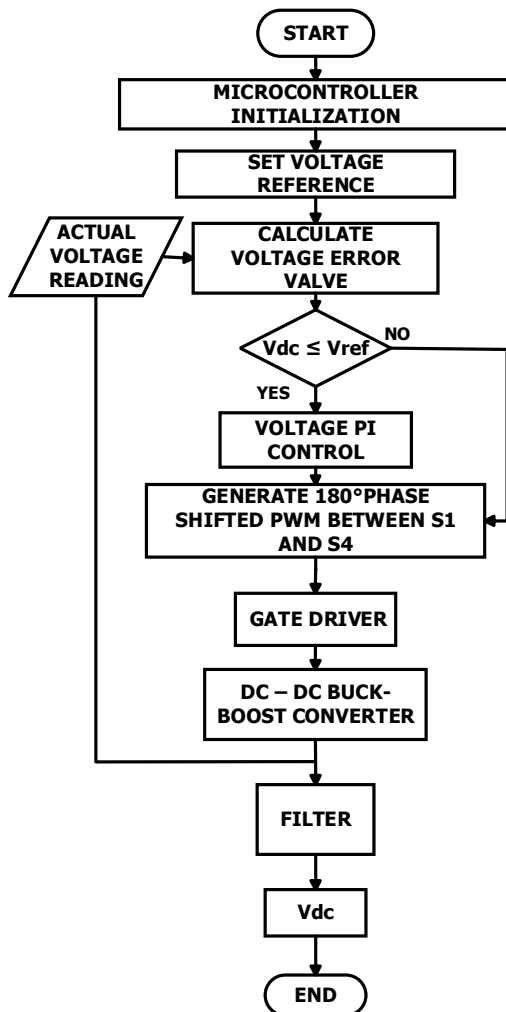
kontrol PI, berfungsi sebagai kontrol kondisi hidup atau mati dari saklar daya sesuai sinyal *error* yang dihasilkan. Nilai *error* yang dihitung berasal dari perbandingan nilai yang diatur (referensi) dengan nilai yang dihasilkan sirkuit daya (aktual) dan dilakukan pembetulan yang mengacu pada PI. Kontrol PI mengoperasikan nilai *error* langsung serta membandingkan nilai *error* tersebut dengan nilai *error* sebelumnya. Kontrol PI juga dapat memulihkan sinyal aktual berdasarkan sinyal referensi dengan respon yang cepat. Peranan kontrol PI, dimana $u(t)$ adalah nilai hasil konverter, K_p adalah nilai *gain proportional*, K_i adalah nilai *gain integrator*, $e(t) = ref - act$ adalah nilai *error*, dT adalah nilai sampling pada periode waktu. Peranan tersebut ditunjukkan dalam Persamaan yang dirumuskan dibawah ini.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(T) dT \quad (7)$$

Flowchart pemrograman dan alur dari kerja konverter dibuat untuk pengaplikasian kontrol PI ditampilkan pada Gambar 3. Langkah pertama adalah inisialisasi pada mikrokontroler. Langkah berikutnya menentukan nilai referensi tegangan, lalu nilai referensi dan nilai aktual tegangan dibandingkan untuk mendapat nilai *error*. Berdasarkan nilai *error* yang dihasilkan menjadi masukan kontrol PI. Lebar pulsa yang dihasilkan kontrol PI sebelum menuju saklar daya S1 dan S4, lebar pulsa modulasi akan digeser 180° mengakibatkan siklus hidup S1 dan S4 tidak bersama. Selanjutnya pensaklaran dari S1 dan S4 menghasilkan tegangan yang dinaikkan atau diturunkan dengan kualitas tegangan konstan dan stabil. *DC-DC buck-boost converter* dengan regulasi tegangan disajikan ke dalam *microcontroller STM32F4VET6*. Mikrokontroler ini menghasilkan sinyal DC digital sebagai sinyal referensi menggunakan fungsi *timer* dan *counter* dalam mikrokontroler. Bacaan nilai referensi yang dihasilkan berasal dari bawaan ADC mikrokontroler. Algoritma dari pemrograman disajikan dalam *flowchart* Gambar 3.



Gambar 2. Rangkaian Daya dan Rangkaian Kontrol



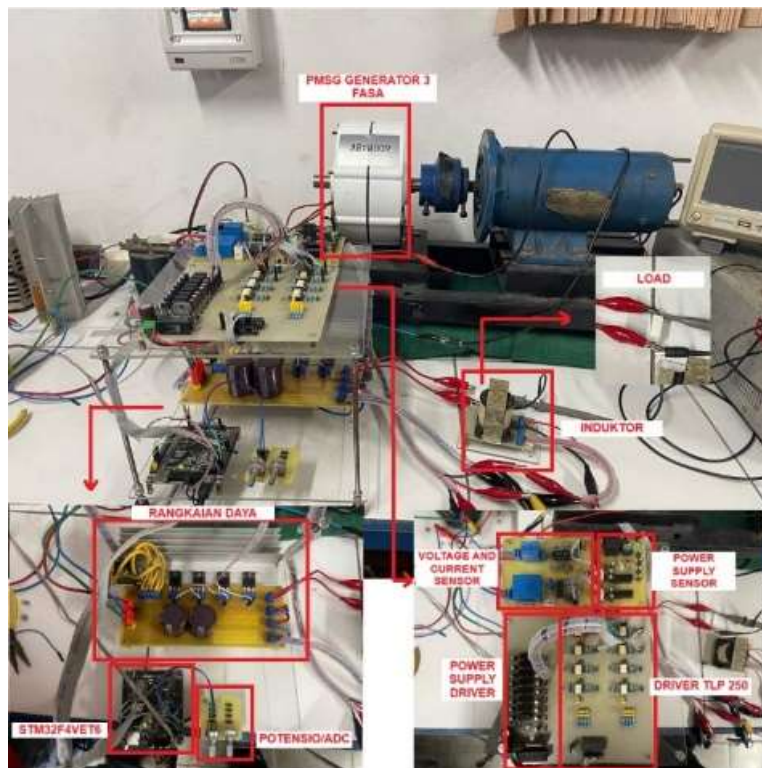
Gambar 3. *Flowchart Programming*

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

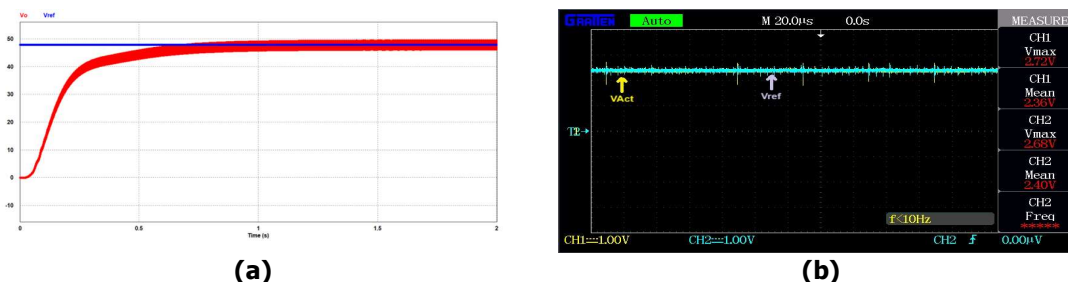
Telah dilakukan simulasi kontrol tegangan pada *DC-DC buck-boost converter* teregulasi tegangan dengan menggunakan perangkat lunak bernama *power simulator*. Disajikan pada Gambar 4 hasil implementasi perangkat keras dari *DC-DC buck-boost converter* regulasi tegangan di laboratorium. Implementasi perangkat keras terdiri dari *motor DC*, PMSG, penyearah dioda tiga fasa, *DC-DC buck-boost converter*, *DC-DC converter A1212-2W* sebagai pemasok sensor tegangan, sensor tegangan LV25P, driver saklar daya TLP250, *DC-DC converter B1212-1W* sebagai pemasok driver saklar daya, *microcontroller STM32F4VET6*, beban resistor. Implementasi ini dilaksanakan untuk mendapatkan hasil pengambilan data simulasi, hasil yang diambil menggunakan osiloskop. Parameter yang digunakan pada simulasi disajikan tabel 1.

Tabel 1. Parameter Simulasi dan Implementasi

Parameter	Nilai
RPM PMSG	266 RPM, 355 RPM, 426 RPM
Filter induktif	2mH
Beban resistor	100k Ω
<i>PI gain</i>	0.0001
Kapasitor C1, C2	220uF
Referensi Tegangan	48Vdc
Frekuensi Pensaklaran	25KHz



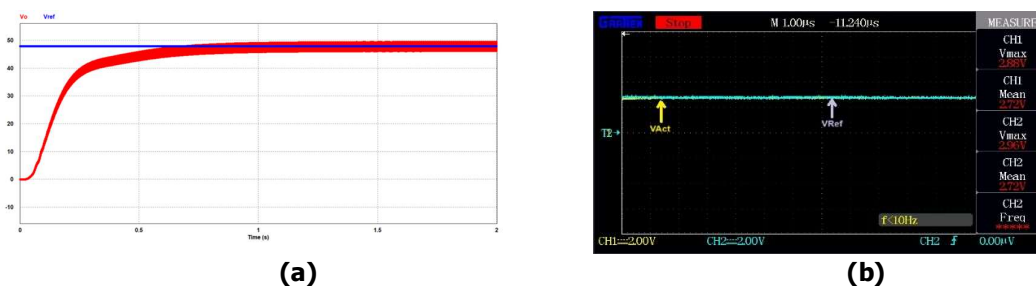
Gambar 4. Implementasi Perangkat Keras *DC -DC Buck-Boost Converter*



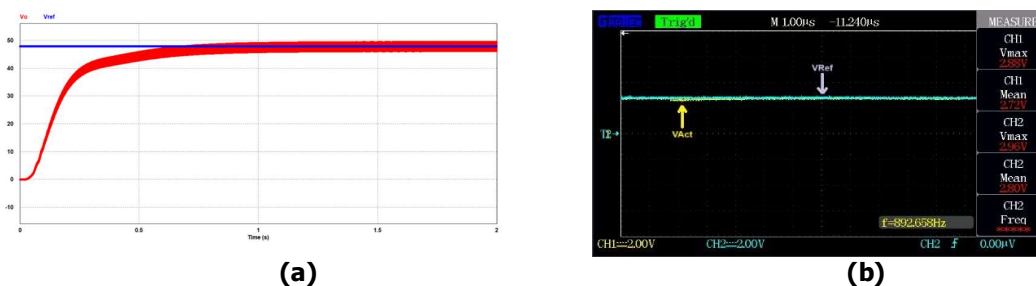
Gambar 5. Data simulasi V_{act} dan V_{ref} Kecepatan 266 RPM (a) dan Data Implementasi V_{act} dan V_{ref} Kecepatan 266 RPM (b) Data Kecepatan 266 RPM

Parameter keberhasilan yang digunakan untuk mengontrol tegangan keluaran pada *DC-DC buck-boost converter* yang dikontrol PI ditunjukkan pada sinyal aktual pada Gambar 5(a), yang menunjukkan hasil simulasi sinyal aktual (V_{act}) mengikuti sinyal referensi (V_{ref}) dengan kecepatan 266 RPM. Sistem rangkaian ini menunjukkan bahwa gelombang tegangan keluaran *DC - DC buck-boost Converter* yang dikontrol PI telah sukses dikontrol secara efektif.

Hasil pengukuran osiloskop pada *DC-DC buck-boost converter* dengan kontrol PI yang diimplementasikan di laboratorium untuk menampilkan tegangan aktual (V_{act}) setelah tegangan referensi (V_{ref}) pada kecepatan 266 RPM dan ditunjukkan pada Gambar 5(b).



Gambar 6. Data simulasi V_{act} dan V_{ref} kecepatan 355 RPM (a) dan Data implementasi V_{act} dan V_{ref} kecepatan 355 RPM (b) Data kecepatan 355 RPM



Gambar 7. Data simulasi V_{act} dan V_{ref} kecepatan 426 RPM (a) dan Data implementasi V_{act} dan V_{ref} kecepatan 426 RPM (b) Data Kecepatan 426 RPM

Pengujian ini selanjutnya dilakukan uji coba pada variabel kecepatan lainnya, diperoleh hasil yang telah disimulasikan terlebih dahulu yang dapat dilihat pada Gambar 6(a) kecepatan 355 RPM dan Gambar 7(a) kecepatan 426 RPM. Tegangan aktual (V_{act}) konstan dan stabil mengikuti tegangan referensi (V_{ref}) pada nilai 48Vdc. Berdasarkan simulasi yang dilakukan pada kecepatan variabel membuktikan gelombang tegangan keluaran *DC-DC buck-boost converter* dengan kontrol PI telah sukses dikendalikan dan dikontrol secara efektif.

Hasil simulasi selanjutnya diimplementasikan pada hardware dan pengukuran menggunakan osiloskop untuk menampilkan tegangan aktual (V_{act}) mengikuti tegangan (V_{ref}) dengan kecepatan 355 RPM dan 426 RPM dapat dilihat pada Gambar 6(b) dan Gambar 7(b). Dari hasil pengujian menggunakan variabel kecepatan dapat dilihat Gambar 6 dan Gambar 7 serupa dengan hasil Gambar 5. Berdasarkan hasil tersebut, dapat ditarik kesimpulan bahwa Gambar 4 sampai dengan Gambar 6 memperlihatkan hasil simulasi dan implementasi *hardware* mempunyai hasil sesuai yang sama dengan simulasi pada *software*.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan simulasi dan implementasi perangkat keras integrasi PMSG dengan *DC-DC buck-boost converter* teregulasi tegangan keluaran dengan *microcontroller STM32VET407* dapat beroperasi dengan baik, dimana tegangan keluaran akan selalu mengikuti tegangan referensi yang diinginkan walaupun putaran PMSG diubah-ubah. Pada ujicoba ini tegangan referensi yang digunakan sebesar 48 *volt*. Berdasarkan ujicoba ini sistem dimungkinkan diintegrasikan dengan *inverter* 48 *Volt* ke 220 *Volt* untuk mendapatkan tegangan sesuai dengan standar PT. PLN.

DAFTAR RUJUKAN

- Belkaid, A., Colak, I., Kayisli, K., & Bayindir, R. (2020). Indirect Sliding Mode Voltage Control of Buck Converter. *8th International Conference on Smart Grid, IcSmartGrid 2020*, 90–95. <https://doi.org/10.1109/ICSMARTGRID49881.2020.9144974>
- Borkowski, D. (2018). Analytical model of small hydropower plant working at variable speed. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, *33*(4), 1886–1894. <https://doi.org/10.1109/TEC.2018.2849573>
- Chandran, V. P., Kewat, S., & Singh, B. (2020). Reconfigurable two-stage solar PV -Battery supported- small hydro system based micro-grid. *9th IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, PEDES 2020*. <https://doi.org/10.1109/PEDES49360.2020.9379336>
- Gil-Gonzalez, W., Garces, A., & Fosso, O. B. (2020). Passivity-Based Control for Small Hydro-Power Generation with PMSG and VSC. *IEEE Access*, *8*, 153001–153010. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3018027>
- Gil-González, W., Montoya, O. D., & Garces, A. (2020). Modeling and control of a small hydro-power plant for a DC microgrid. *Electric Power Systems Research*, *180*, 106104. <https://doi.org/10.1016/J.EPSR.2019.106104>
- Guo, B., Mohamed, A., Bacha, S., & Alamir, M. (2018). Variable speed micro-hydro power plant: Modelling, losses analysis, and experiment validation. *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology, 2018-February*, (pp. 1079–1084). <https://doi.org/10.1109/ICIT.2018.8352328>
- Harrouz, A., Colak, I., & Kayisli, K. (2019). Energy modeling output of wind system based on

- wind speed. *8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2019*, 63–68. <https://doi.org/10.1109/ICRERA47325.2019.8996525>
- Irimia, O., Tomozei, C., Panainte-Lehadus, M., & Dinu, M. C. (2020). Evaluation of the potential of wind energy as a source of electricity generation: Case study - Vanatori Wind Power Plant. *2020 7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering, EE and AE 2020 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/EEAE49144.2020.9278983>
- Nag, A. K., & Sarkar, S. (2021). Techno-economic analysis of a micro-hydropower plant consists of hydrokinetic turbines arranged in different array formations for rural power supply. *Renewable Energy*, *179*, 475–487. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2021.07.067>
- Rahimi, M. (2017). Modeling, control and stability analysis of grid connected PMSG based wind turbine assisted with diode rectifier and boost converter. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, *93*, 84–96. <https://doi.org/10.1016/J.IJEPES.2017.05.019>
- Rakshith, P., Bhat, J. R., Ashwini, M., Rakshitha, C. R., & Sharma, V. K. (2018). Output Maximization by Modeling and Simulation of Hybrid Wind/Photovoltaic Standalone Generation. *International Conference on Current Trends in Computer, Electrical, Electronics and Communication, CTCEEC 2017*, (pp. 447–453). <https://doi.org/10.1109/CTCEEC.2017.8455168>
- Suhariningsih, Mukti, M. A. M., & Rakhmawati, R. (2019). Implementation Buck-Boost Converter using PI Control for Voltage Stability and Increase Efficiency. *Proceedings - 2019 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication: Industry 4.0: Retrospect, Prospect, and Challenges, ISemantic 2019*, (pp. 492–496). <https://doi.org/10.1109/ISEMANTIC.2019.8884308>
- Tapia, A., Reina, D. G., & Millán, P. (2020). Optimized micro-hydro power plants layout design using messy genetic algorithms. *Expert Systems with Applications*, *159*, 113539. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2020.113539>
- Tripathy, S., & Mohanty, B. (2020). Cascaded Controlled Converter System for Grid Connected Variable Speed Wind Generator. *International Conference on Computational Intelligence for Smart Power System and Sustainable Energy, CISPSSE 2020*. <https://doi.org/10.1109/CISPSSE49931.2020.9212208>
- Yah, N. F., Oumer, A. N., & Idris, M. S. (2017). Small scale hydro-power as a source of renewable energy in Malaysia: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *72*, 228–239. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.01.068>