

Design dan Implementasi Buck Chopper-PMSG Terkendali Tegangan Keluaran Berbasis STM32VET407

Denilson Elias Fatima Da Costa Freitas ^{#1}, Leonardus Hero Pratomo ^{#2}

Department of Electrical Engineering Soegijapranata Catholic University
Semarang, Indonesia

¹ devvilsonelias12@gmail.com

² Leonardus_@unika.ac.id

Received on 27-10-2023, revised on 29-10-2023, accepted on 31-10-2023

Abstract

Pembangkit energi angin dapat digunakan sebagai sumber listrik alternatif dan jika dikembangkan dengan baik maka energi tipe ini mampu menjadi penopang energi nasional. Pemanfaatan energi angin yang diintegrasikan dengan *Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)* dapat menghasilkan listrik AC 3 Fasa. Besaran listrik ini memiliki tegangan dan frekuensi yang tidak konstan serta pada kasus ini bertegangan relatif kecil. Guna mendapatkan tegangan listrik yang stabil lazimnya dilakukan manipulasi: disearahkan dan dijaga tegangan DC konstan kemudian diubah ke tegangan AC sesuai standar PLN dengan menggunakan inverter. Pada tulisan ini membahas proses mendapatkan tegangan DC yang stabil walau terjadi perubahan kecepatan pada PMSG yang dilakukan dengan menggunakan *Buck Chopper* yang dikendalikan dengan mikrokontroler STM32VET407. Verifikasi awal dilakukan dengan simulasi komputasi dan tahap akhir dilakukan implementasi perangkat keras di laboratorium. Dari hasil simulasi dan implementasi sistem dapat beroperasi dengan baik dengan tegangan keluaran stabil dinilai 60 Volt.

Keywords: PMSG, *Buck Chopper*, STM32VET407

This is an open access article under the [CC BY-SA](#) license.



Corresponding Author:

Denilson Elias Fatima Da Costa Freitas
Department Teknik Elektro, Universitas Katolik Soegijapranata
Jl. Pawiyatan Luhur IV/1 Bendan Duwur Semarang
devvilsonelias12@gmail.com

I. PENDAHULUAN

Perkembangan dalam sektor konversi energi meningkat seiring dengan perkembangan dalam sektor teknologi energi. Pada masa ini, sektor teknologi energi sangat mengutamakan dan terfokus untuk menghasilkan sumber energi yang dapat diandalkan dan terjangkau. Sumber energi angin merupakan teknologi energi terbarukan yang paling efisien karena bersih dan ramah lingkungan[1]–[3]. Pada teknologi sumber energi angin menggunakan *propeller* turbin terhubung dengan *permanent magnet synchronous generator (PMSG)* 3 fasa 3 kawat. Konfigurasi generator PMSG terdiri dari rotor *permanent magnet* dan stator *wire winding*[4]. Energi listrik yang dihasilkan turbin angin dengan generator PMSG yakni listrik AC 3 fasa dimana besar nilai tegangan dan frekuensi yang dihasilkan tergantung oleh kecepatan angin yang menggerakkan *propeller* dari turbine angin, semakin cepat hembusan angin maka semakin besar nilai tegangan dan frekuensi yang dihasilkan[5], [6]. Energi listrik AC yang dihasilkan generator PMSG perlu dirubah menjadi listrik DC dengan menggunakan sebuah konverter AC – DC. Dalam proses konversi energi listrik secara sederhana tegangan DC yang dihasilkan belum stabil, sehingga memerlukan rangkaian penyearah 3 fasa dengan topologi gelombang penuh dan sebuah kapasitor sebagai filter untuk listrik keluaran DC[7].

Dalam sistem pembangkit listrik tenaga angin terdiri dari beberapa komponen pendukung seperti penyearah 3 fasa, filter pasif, konverter DC-DC, sistem kendali, dan beban. Desain suatu konverter dari sistem terkendali tegangan keluaran untuk menghasilkan listrik DC dengan tingkat kestabilan serta efisiensi tinggi. Untuk menghasilkan tingkat kestabilan yang bagus maka modifikasi konverter dengan strategi baru. Dikarenakan energi listrik yang dihasilkan generator PMSG dengan menggunakan konverter konvensional masih memiliki beberapa kelemahan[8]. Konverter konvensional dapat membuat tegangan tegangan tidak stabil. Konverter konvensional menghasilkan riak harmonik yang tinggi akibat saat proses konversi energi listrik. Konverter konvensional memerlukan nilai kapasitansi filter induktor dan kapasitor yang besar untuk mengurangi riak harmonik yang dihasilkan sehingga membuat ukuran secara fisik juga besar. Konverter konvensional memiliki kinerja yang kurang efisien apabila digunakan secara terus menerus. Dampak terbesar dari penggunaan konverter konvensional ini adalah dapat merusak sistem pembangkit listrik tenaga angin ini sendiri dikarenakan tegangan yang dihasilkan tidak stabil dan juga tidak adanya sistem proteksi dalam sistem konvensional ini[9], [10]. Sistem kendali pada sebuah konverter DC-DC memiliki peranan yang sangat penting dalam menghasilkan tegangan[11].

DC-DC Buck Chopper-PMSG atau disebut *DC-DC buck converter* berfungsi yakni untuk menghilangkan daya aktif diproduksi oleh PMSG sedemikian rupa sehingga daya aktif tetap seimbang. Namun, masalah kinerja dinamis dapat muncul jika daya aktif yang berasal dari PMSG tidak seimbang dengan kapasitas resistor maka menghasilkan tegangan tegangan tidak seimbang dan akibatnya tidak riak stabil[8]. *DC-DC buck chopper* memiliki memiliki beberapa keuntungan yakni guna mengurangi yang dihasilkan pada sisi keluaran, mengurangi besar nilai filter kapasitor dan induktor, serta mampu mengkonversi tegangan input yang lebih tinggi dengan baik tanpa meninggalkan riak akibat proses konversi[12]. Maka dari itu, penelitian ini mengusulkan konfigurasi *buck chopper* dengan strategi baru. Tujuan dari *buck chopper*-PMSG yang disarankan dalam penelitian ini adalah untuk mengurangi tegangan keluaran ketika motor PMSG berjalan dengan kecepatan tinggi. Pada sistem loop terbuka *buck chopper*, biasanya nilai tegangan keluaran yang dihasilkan tidak dapat diatur sesuai kebutuhan. Dalam sistem loop terbuka energi listrik yang dihasilkan memiliki riak yang tinggi. Untuk mengatasi masalah dalam sistem loop terbuka ini harus memodifikasi agar menjadi sistem loop tertutup dan biasanya hanya menggunakan strategi kendali tunggal saja[13]–[15]. Ketika digunakan untuk beban nonlinier dan diimplementasikan dalam aplikasi industri, tegangan keluaran yang dihasilkan akan terdistorsi. Akibatnya, sistem kontrol bertanggung jawab untuk mengendalikan tegangan yang berlebihan. Kemudian tegangan keluaran aktual tidak dapat mengikuti tegangan referensi dengan cepat karena mengalami berfluktuasi dan terdistorsi. Untuk memperbaiki masalah, sistem loop tertutup dengan strategi kendali tunggal diubah menjadi kendali *buck chopper* dan bertujuan untuk mengendalikan tegangan keluaran berlebihan menjadi stabil[16], [17], [18].

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan suatu sistem kontrol dengan strategi baru yang mampu mengendalikan tegangan lebih baik. Penelitian ini mengusulkan strategi kontrol baru yang disebut *buck chopper* yang dapat mengontrol tegangan keluaran menggunakan sistem loop tertutup pada generator PMSG turbin angin. Metode ini merupakan proses *switching* menggunakan kontrol *Proportional Integrator (PI)*. Kontrol PI dapat digunakan untuk mengontrol tegangan keluaran. Kontrol PI digunakan pada penelitian ini untuk menghasilkan tegangan keluaran yang stabil, tidak ada riak, dan tegangan yang terkontrol. Strategi ini telah dikonfirmasi melalui simulasi dan implementasi pada perangkat keras secara langsung dengan menggunakan mikrokontroler STM32FVET407.

II. METODOLOGI PENELITIAN

Dalam menyelesaikan penelitian ini diperlukan beberapa prosedur diantaranya latar belakang konsep, definisi masalah, simulasi, implementasi dan pengujian untuk mendapatkan kesimpulan. Meninjau kembali konsep *DC – DC buck chopper*-PMSG yang telah dilakukan, dan mendapatkan beberapa masalah, salah satu masalah terbesar adalah konverter *DC – DC buck chopper*-PMSG. Dengan menggunakan bantuan perangkat lunak PSIM (*Power Simulator*), simulasi ini digunakan untuk menguji bahwa perangkat keras dapat berfungsi dengan baik sebelum diimplementasikan pada perangkat keras.

A. Permanent Magnet Synchronous Generator

PMSG merupakan jenis generator listrik yang menggunakan permanen magnet sebagai pengganti fluks medan konvensional pada rotor. Desain ini memungkinkan PMSG untuk menghasilkan

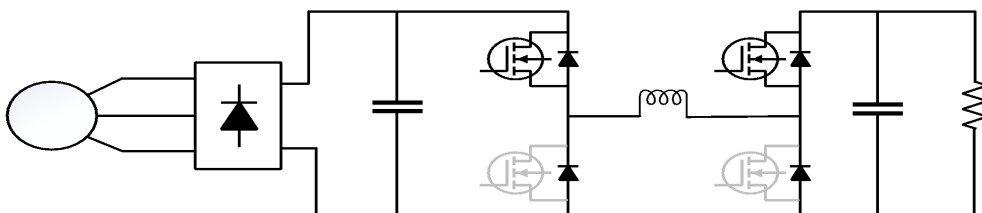
listrik pada frekuensi konstan, terlepas dari kecepatan rotor. PMSG menghasilkan listrik tiga fasa seperti generator konvensional lainnya. Keistimewaan ini membuat PMSG menjadi komponen penting yang dapat mengubah energi dari berbagai sumber seperti turbin angin. Selain itu, PMSG lebih mudah dan lebih efisien, sehingga ideal untuk diimplementasikan pada sistem turbin angin. Persamaan tegangan pada PMSG dapat dilihat pada persamaan (1).

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

B. Buck Chopper

DC – DC Buck Chopper terdiri dari dua saklar daya (S1 - S2), dua dioda (D1 - D2), filter induktor dan kapasitor dapat dilihat pada Gambar 1. *Buck chopper* ini mempunyai fungsi sebagai *step-down* dengan hanya mengoperasikan dua saklar daya S1 dan S2, sedangkan dua saklar lainnya digunakan sebagai dioda. Kedua saklar daya beroperasi secara bersamaan menggunakan pengaturan *Pulse Width Modulation* (PWM).

PWM dapat berbasis waktu atau berbasis frekuensi. Modulasi berbasis frekuensi memiliki kelemahan seperti rentang frekuensi yang lebar untuk mencapai kontrol saklar yang diperlukan untuk memberikan tegangan keluaran yang diinginkan dan modulasi berbasis waktu sebagian besar digunakan untuk frekuensi tetap konstan. Operasi *buck chopper* digunakan untuk penurunan tegangan berlebih yang dihasilkan PMSG dikonversi menjadi listrik DC digunakan sebagai distribusi daya. *Buck chopper* ini memiliki kendali pada tegangan keluaran. Untuk mengendalikan tegangan keluaran dibutuhkan suatu strategi kontrol yang harus diterapkan. Strategi kontrol yang digunakan pada *buck chopper* ini adalah *Proportional Integral* (PI). Pengaplikasian kendali dan strategi kontrol ini menggunakan program yang telah disusun pada sebuah mikrokontroler STM32VET407.



Gambar 1. Rangkaian buck chopper-PMSG

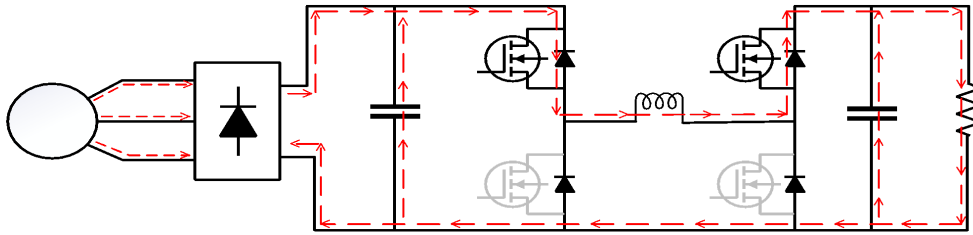
C. Mode Operasi

Buck chopper memiliki dua siklus proses pensaklaran, dimana yang ditampilkan pada Gambar 2 pada saklar daya S1 dan S2 dihidupkan secara bersama, maka tegangan yang dihasilkan sama dengan tegangan sumber (V_s). Arus mengalir menuju beban melewati saklar daya S1, induktor, saklar daya S2, kapasitor C2 dan beban DC. Tahap pensaklaran dari mode operasi pertama ini dapat dirumuskan ke dalam bentuk persamaan (2), (3) dan (4) dibawah. Dimana V_s adalah tegangan sumber, V_o adalah tegangan keluaran, L adalah induktor, V_L adalah tegangan induktor, Δi_L adalah perubahan arus induktor, Δt adalah durasi operasi mode dan D adalah *duty cycle*.

$$\Delta t = DT \quad (2)$$

$$V_s = V_L + V_o \quad (3)$$

$$(\Delta i_L)_{closed} = \frac{(V_s - V_o)}{L} \cdot DT \quad (4)$$



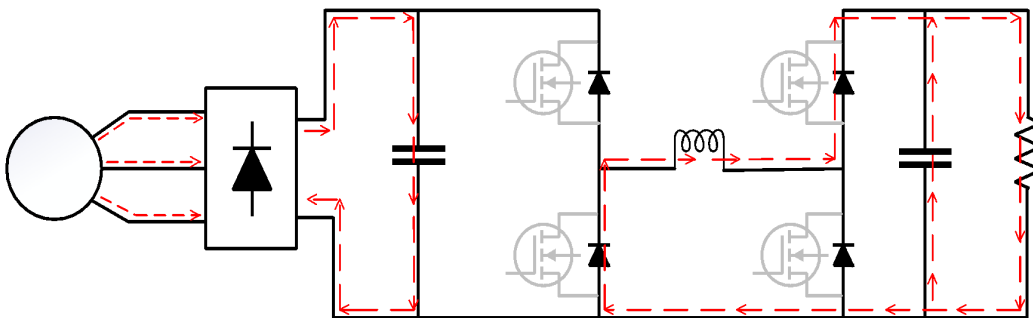
Gambar 2. Buck chopper-PMSG kondisi saklar ON

Tahap pensaklaran dari mode operasi kedua ditunjukkan pada Gambar 3 ketika saklar daya S1 dan S2 dimatikan secara bersama, maka menghasilkan tegangan keluaran nol volt dikarenakan tahap ini adalah *freewheeling*. Kemudian arus yang tersimpan pada induktor berupa medan magnet dilepaskan dan mengalir menuju beban melewati dioda saklar daya S2, kapasitor C2, diode D1. Tahap pensaklaran dari mode operasi kedua ini dapat dirumuskan ke dalam bentuk persamaan (5), (6) dan (7) dibawah.

$$0 = VL + Vo \quad (5)$$

$$(\Delta iL)_{open} = \left(\frac{-V_o}{L}\right)(1 - D)T \quad (6)$$

$$D = \frac{V_o}{V_s} \quad (7)$$



Gambar 3. Buck chopper-PMSG Kondisi saklar OFF

D. Strategi Kontrol

Buck chopper menggunakan sensor tegangan untuk menjadikan sistem tertutup dengan sistem koneksi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5, sehingga memerlukan sistem kendali dengan strategy yang tepat dalam menjalankan *DC-DC chopper* jenis ini. Sistem kendali *buck chopper* dalam penelitian ini menggunakan kendali *Proportional Integral* (PI). Kendali PI terprogram menggunakan mikrokontroler STM32F407VET6. Sensor tegangan terpasang secara paralel setelah filter L dan C pada terminal keluaran *DC-DC chopper*, penggunaan sensor tegangan berfungsi sebagai pembaca sinyal referensi dan sinyal aktual dan dikirimkan menuju mikrokontroler dalam bentuk data analog. Sedangkan, data dari mikrokontroler berupa PWM digunakan sebagai masukan pensaklaran untuk S1 dan S2 berfungsi sebagai kestabilan tegangan keluaran. Komparasi dari sinyal aktual dan sinyal referensi menghasilkan sinyal error dapat dirumuskan ke dalam bentuk persamaan (8).

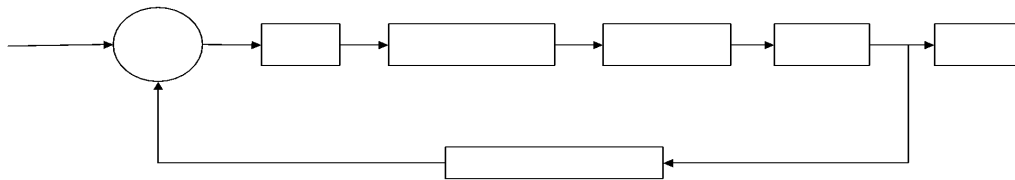
Diagram blok sistem kontrol PI ditunjukkan pada Gambar 4 untuk mendapatkan hasil lebih cepat respon terhadap sistem kendali dan berfungsi sebagai *feedback* pada sistem, dibutuhkan kontroler PI. Strategi kontrol PI, berfungsi sebagai kontrol kondisi *ON* atau *OFF* dari saklar daya sesuai sinyal error 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. Dalam hal ini peran kontrol PI, dimana $u(t)$ adalah nilai hasil *DC-DC chopper*, K_p adalah nilai konstanta *proporsional*, K_i adalah nilai konstanta *integrator*, $e(t)$ adalah nilai kesalahan, dt adalah

nilai sampling dalam periode waktu. Kemudian dapat dirumuskan dalam bentuk persamaan (9) di bawah ini.

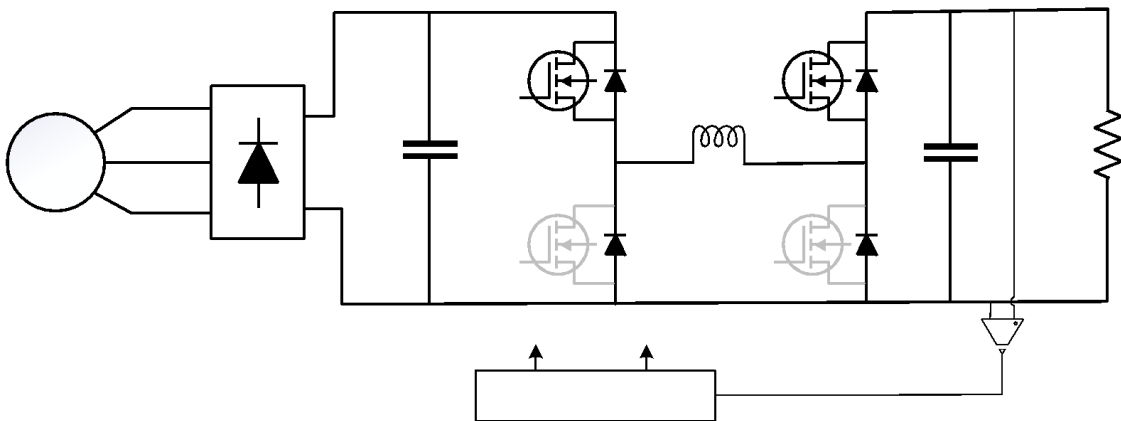
$$e(t) = ref - act \quad (8)$$

$$u(t) = Kp e(t) + Ki \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (9)$$

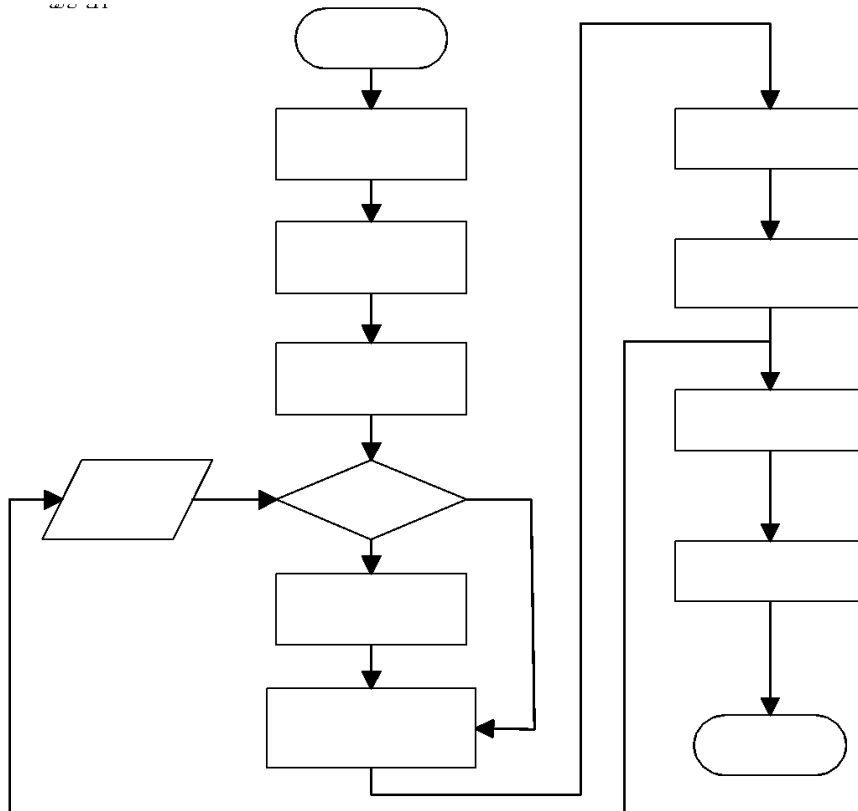
Sistem kendali PI ini terprogram dalam sebuah mikrokontroler STM32VET407 dengan algoritma sistem kendali dan flowchart program seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Flowchart pemrograman merupakan alur dari kerja *buck chopper* dibuat untuk pengaplikasian. Langkah pertama adalah inialisasi pada mikrokontroler. 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 mikrokontroler berupa sinyal PWM menuju ke saklar daya S1 dan S2 untuk mengakibatkan siklus hidup saklar S1 dan S2 secara bersamaan. Selanjutnya pensaklaran dari S1 dan S2 menghasilkan tegangan yang diturunkan dengan kualitas tegangan konstan dan stabil.



Gambar 4. Diagram blok kontrol



Gambar 5. Skema daya dan skema kontrol



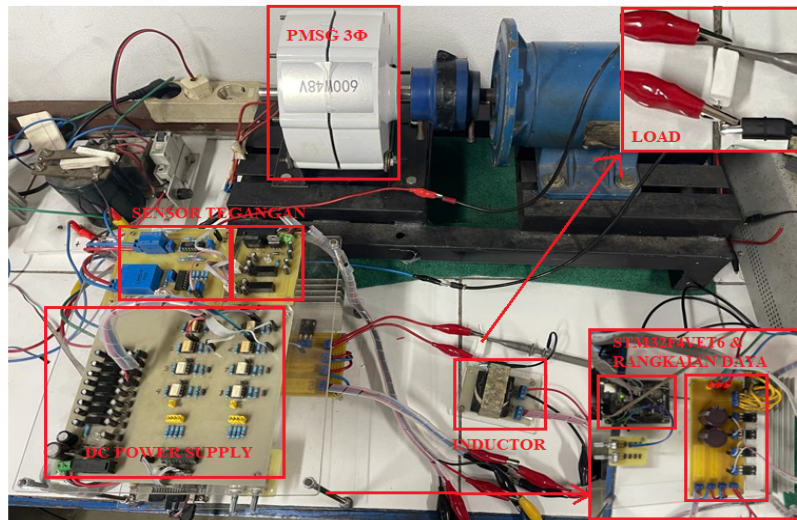
Gambar 6. Flowchart programing

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Buck chopper telah disimulasikan dengan bantuan perangkat lunak *PSIM (Power Simulator)* dan di implementasikan ke dalam bentuk perangkat keras untuk memverifikasi data dari penelitian ini. Parameter yang digunakan dalam simulasi dan implementasi ditunjukkan dalam Tabel 1, kemudian hasil perangkat keras yang telah diimplementasikan ditunjukkan pada Gambar 7.

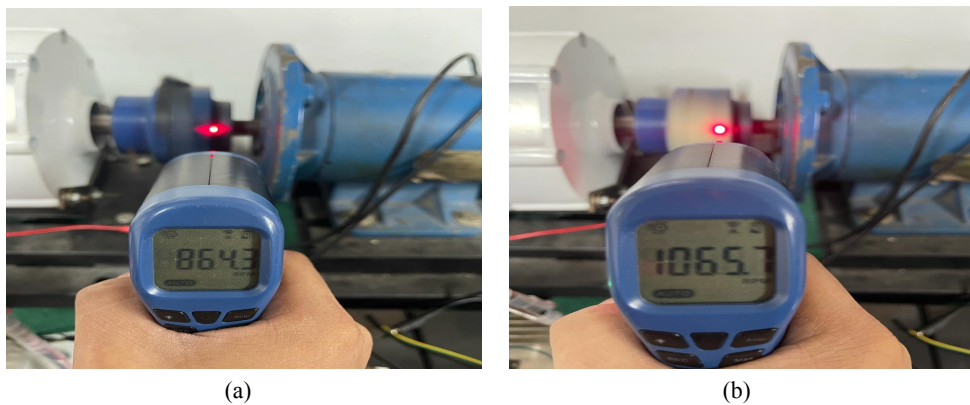
Parameter	Nilai
Kecepatan PMSG	800 - 1065,7 RPM
Filter Induktor	2mH
Beban Resistor	100k Ω
PI Gain	0.1
Tis Gain	0.001
Kapasitor C1, C2	220uF
Nilai Referensi	60 Vdc

Tabel 1. Parameter simulasi dan implementasi perangkat keras

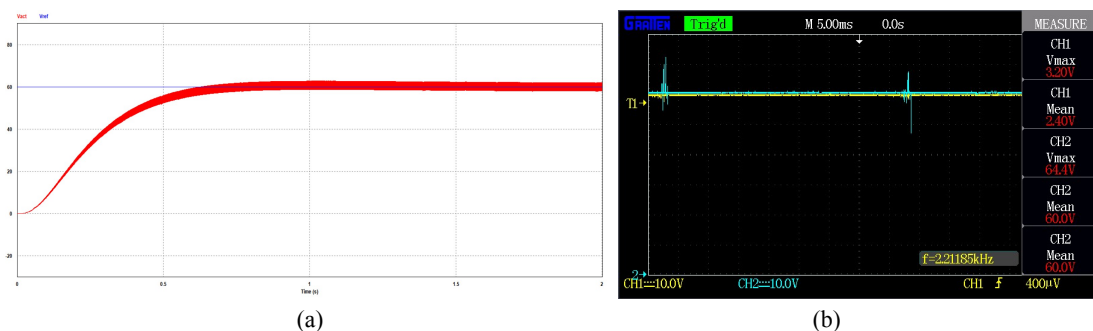


Gambar 7. Hardware implementasi buck chopper-PMSG

Berdasarkan simulasi dan implementasi perangkat keras *DC-DC buck chopper* regulasi tegangan dilakukan beberapa uji coba dengan kecepatan variabel ditampilkan pada Gambar 8, pengaturan referensi pada nilai 60Vdc.



Gambar 8. 864 rpm (a) dan 1065,7 rpm (b) variable kecepatan motor

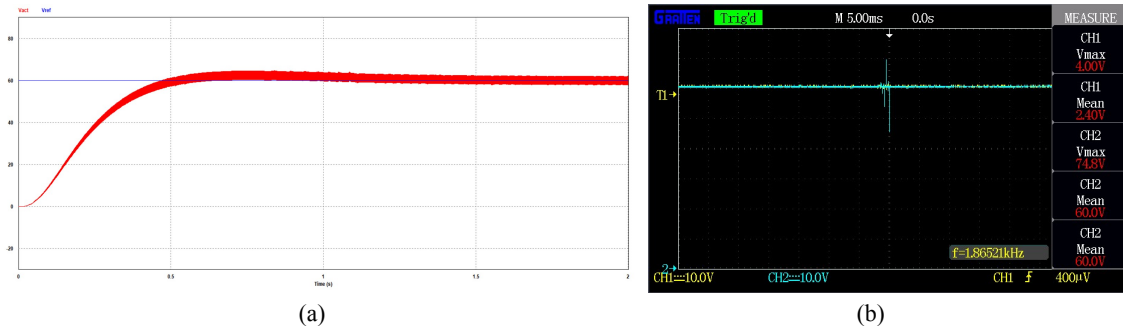


Gambar 9. Data simulasi (a) dan data implementasi (b) tegangan keluaran pada kecepatan 864 RPM

Kesuksesan parameter yang digunakan untuk mengendalikan tegangan keluaran di *DC-DC buck chopper* dengan kontrol PI tersaji dalam sinyal aktual yang ditampilkan pada Gambar 8(a) melihat hasil simulasi sinyal aktual (V_{act}) mengikuti sinyal referensi (V_{ref}) dengan kecepatan 864 RPM. Sistem

ini membuktikan gelombang tegangan keluaran *DC-DC buck chopper* dengan kontrol PI telah sukses dikendalikan.

Hasil pengukuran menggunakan osiloskop pada *DC-DC buck chopper* dengan kontrol PI diimplementasikan di laboratorium untuk menampilkan tegangan aktual (V_{act}) mengikuti tegangan referensi (V_{ref}) dengan kecepatan 864 RPM dan disajikan pada Gambar 9(a-b).



Gambar 10. Data simulasi (a) dan data implementasi (b) tegangan keluaran pada kecepatan 1065,7 RPM

Penelitian ini selanjutnya dilakukan uji coba pada kecepatan tinggi, didapatkan hasil yang telah disimulasikan terlebih dahulu tertampil pada Gambar 8(b) kecepatan 1065,7 RPM. Tegangan aktual (V_{act}) konstan dan stabil mengikuti tegangan referensi (V_{ref}) pada nilai 60Vdc. Berdasarkan simulasi yang dilakukan pada kecepatan variabel membuktikan gelombang tegangan keluaran *DC-DC buck chopper* dengan kontrol PI telah berhasil dikendalikan.

Hasil simulasi selanjutnya diimplementasikan pada perangkat keras dan pengukuran menggunakan osiloskop untuk menampilkan tegangan aktual (V_{act}) mengikuti tegangan (V_{ref}) dengan kecepatan 1065,7 RPM dapat dilihat pada Gambar 10.

Berdasarkan implementasi kecepatan PMSG 800-1000 RPM pada perangkat keras dan simulasi dari *DC-DC buck chopper* regulasi tegangan dengan kontrol PI berfungsi dengan baik. Sesuai hasil simulasi dan implementasi pada perangkat keras membuktikan bahwa sinyal tegangan dari *DC-DC buck chopper* menghasilkan sinyal yang stabil dan riak yang rendah.

IV. KESIMPULAN

Dari hasil simulasi dan implementasi pada perangkat keras dalam penelitian ini menyimpulkan *DC-DC buck chopper* dengan kendali PI menghasilkan sinyal pensaklaran yang baik untuk mengendalikan tegangan keluaran agar selalu mengikuti tegangan referensi dan stabil walaupun generator bekerja pada kecepatan yang berubah, kemudian semakin besar kecepatan generator PMSG semakin besar pula tegangan keluaran ke beban, dengan menggunakan *DC-DC buck chopper* berfungsi sebagai (*step-down voltage*) penurunan tegangan keluaran sehingga tetap konstan mengikuti nilai referensi 60Vdc.

REFERENSI

- [1] B. Chae, T. Kang, and Y. Suh, "Current Source Type PMSG Wind Turbine System with Three-phase Three-switch Buck-type Rectifier for Machine-side Converter," *2018 Int. Power Electron. Conf. IPEC-Niigata - ECCE Asia 2018*, pp. 1977–1984, 2018, doi: 10.23919/IPEC.2018.8507964.
- [2] M. F. Elmorshedy, S. M. Allam, and E. M. Rashad, "Load voltage control and maximum power extraction of a stand-alone wind-driven PMSG including unbalanced operating conditions," *2016 18th Int. Middle-East Power Syst. Conf. MEPCON 2016 - Proc.*, pp. 552–559, 2017, doi: 10.1109/MEPCON.2016.7836946.
- [3] L. Bisenieks, D. Vinnikov, and I. Galkin, "New isolated interface converter for grid-connected PMSG based wind turbines," *2011 10th Int. Conf. Environ. Electr. Eng. IEEEIC.EU 2011 - Conf. Proc.*, pp. 1–4, 2011, doi: 10.1109/EEEIC.2011.5874750.
- [4] R. I. Putri, S. Adhisuwignjo, and M. Rifari, "Design of simple power converter for small scale wind turbine system for battery charger," *Proc. - 2018 3rd Int. Conf. Inf. Technol. Inf. Syst. Electr. Eng. ICITISEE 2018*, pp. 169–173, 2018, doi: 10.1109/ICITISEE.2018.8721018.
- [5] A. Asri, Y. Mihoub, S. Hassaine, P. O. Logerais, and T. Allaoui, "Intelligent maximum power tracking control of a PMSG wind energy conversion system," *Asian J. Control*, vol. 21, no. 4, pp. 1980–1990, Jul. 2019, doi: 10.1002/ASJC.2090.
- [6] D. Simonetti, T. Freitas, P. Menegáz, and J. Fardin, "Theoretical analysis of a multiresonant zero-current switching buck converter applied to low wind power PMSG," *IET Conf. Publ.*, vol. 2014, no. CP651, pp. 1–5, 2014, doi: 10.1049/cp.2014.0865.
- [7] V. Lazarov, D. Roje, D. Spirov, and Z. Zarkov, "New control strategy for variable speed wind turbine with DC-DC converters," *Proc. EPE-PEMC 2010 - 14th Int. Power Electron. Motion Control Conf.*, pp. 120–124, 2010, doi: 10.1109/EPEPEMC.2010.5606570.
- [8] L. Sartika, M. Rosyadi, A. Umamura, R. Takahashi, and J. Tamura, "Stabilization of PMSG based wind turbine under network disturbance by using new buck controller system for DC-link protection," *IET Conf. Publ.*, vol. 2016, no. CP694, pp. 1–5, 2016, doi: 10.1049/cp.2016.0578.
- [9] T. H. Nguyen and D. C. Lee, "A novel current control scheme of grid converters for small PMSG wind turbines under grid voltage distortion," *PEMWA 2012 - 2012 IEEE Power Electron. Mach. Wind Appl.*, 2012, doi: 10.1109/PEMWA.2012.6316368.
- [10] A. Belkaid, I. Colak, K. Kayisli, and R. Bayindir, "Indirect Sliding Mode Voltage Control of Buck Converter," *8th Int. Conf. Smart Grid, icSmartGrid 2020*, no. 2, pp. 90–95, 2020, doi: 10.1109/icSmartGrid49881.2020.9144974.
- [11] S. Palanidoss and T. V. S. Vishnu, "Experimental analysis of conventional buck and boost converter with integrated dual output converter," *Int. Conf. Electr. Electron. Commun. Comput. Technol. Optim. Tech. ICEECCOT 2017*, vol. 2018-Janua, pp. 323–329, 2018, doi: 10.1109/ICEECCOT.2017.8284521.
- [12] Y. Li, H. Liu, Y. Chi, X. Fan, X. Tian, and Z. Zhang, "Requirement Analysis on Large-scale Renewable Energy DC Collection and Transmission Technology," *2020 4th Int. Conf. HVDC, HVDC 2020*, pp. 410–414, 2020, doi: 10.1109/HVDC50696.2020.9292827.
- [13] Y. Mori, K. Matsui, M. Hasegawa, F. Ueda, and H. Mori, "A novel PFC buck chopper for single-phase with single switching device," *Proc. - 12th Int. Conf. Electr. Mach. Syst. ICEMS 2009*, pp. 1–6, 2009, doi: 10.1109/ICEMS.2009.5382953.
- [14] M. K. Asy'Ari, A. Musyafa', and K. Indriawati, "Design of Wind Turbine Output Voltage Control Systems in Multi-Input Buck Converter Using Fuzzy Logic Control for Battery Charging," *2019 Int. Conf. Adv. Mechatronics, Intell. Manuf. Ind. Autom. ICAMIMIA 2019 - Proceeding*, pp. 249–252, 2019, doi: 10.1109/ICAMIMIA47173.2019.9223417.
- [15] Z. Qiji, D. Liang, P. Kou, and Z. Liang, "Dual Closed-loop Control of a Doubly Salient Permanent Magnet Generator based on Gain- Scheduling PI Controller," 2017.
- [16] G. El-Saady, E. N. A. Ibrahim, and M. Gelany, "Voltage regulation of stand-alone variable speed wind energy system," *2016 18th Int. Middle-East Power Syst. Conf. MEPCON 2016 - Proc.*, no. 1, pp. 360–366, 2017, doi: 10.1109/MEPCON.2016.7836916.
- [17] S. Dong, H. Li, and Y. Wang, "Low voltage ride through capability enhancement of PMSG-based wind turbine," *IET Conf. Publ.*, vol. 2012, no. 611 CP, 2012, doi: 10.1049/cp.2012.1784.
- [18] H. M. Yassin, H. H. Hanafy, and M. M. Hallouda, "Design and implementation of PI controllers of direct drive PMSG wind turbine system tuned by Linearized biogeography-based optimization technique," *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, pp. 4072–4077, 2016, doi:

10.1109/IECON.2016.7793375.