

Simulasi Pengontrolan Tegangan Arus dan Frekuensi Generator Induksi Tiga Fasa Menggunakan Electronic Load Controller Tipe AC-DC Konverter Tiga Fasa

Nur Fajri Anhar^{1*}, Krismadinata^{1,2}

¹ Teknik Elektro Industri, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang

² Centre for Energy and Power Electronics Research, Universitas Negeri Padang

Jl.Prof. Dr Hamka, Kampus UNP Air Tawar Padang 25131.Telp/Fax(0751)7055644, 445998

*e-mail: norfajri67@gmail.com

(Diajukan: 10 November 2023, direvisi: 29 April 2024, disetujui: 07 Juni 2024, dipublikasikan: 11 Juni 2024)

Abstrak

Generator induksi umumnya digunakan di daerah terpencil namun cenderung rentan terhadap fluktuasi tegangan. Penelitian ini mengusulkan penggunaan AC-DC Konverter 3 Fasa dengan Electronic Load Controller (ELC) untuk mengatasi masalah tersebut. Konverter ini mengubah tegangan AC menjadi DC dengan nilai bervariasi, yang diatur oleh ELC untuk menjaga tegangan generator dalam rentang yang diinginkan dan memperbaiki frekuensinya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tegangan keluaran yang bervariasi dapat diimbangi secara real-time dengan konsumsi daya, meningkatkan keandalan dan efisiensi generator induksi dalam menyediakan listrik stabil di daerah terpencil.

Kata Kunci: generator induksi, ELC, konverter AC-DC 3 fasa, tegangan, frekuensi.

Abstract

Induction generators are generally used in remote areas but tend to be susceptible to voltage fluctuations. This research proposes the use of a 3 Phase AC-DC Converter with an Electronic Load Controller (ELC) to overcome this problem. This converter converts AC voltage to DC with varying values, which are regulated by the ELC to keep the generator voltage within the desired range and increase its frequency. The research results show that variations in output voltage can be balanced in real-time with power consumption, thereby increasing the reliability and efficiency of induction generators in providing stable electricity in remote areas.

Keywords: induction generator, ELC, 3 phase AC-DC converter, voltage, frequency.

PENDAHULUAN

Energi terbarukan semakin menjadi fokus utama dalam memenuhi kebutuhan energi global, terutama di masa kini yang diwarnai oleh tantangan perubahan iklim dan keberlanjutan. Sementara teknologi energi terbarukan telah mengalami perkembangan pesat, akses terhadap listrik masih menjadi masalah serius di daerah terpencil, di mana infrastruktur jaringan distribusi belum mencapai sebagian besar wilayah tersebut[1]. Keterbatasan ini memicu pencarian solusi yang inovatif dan efektif untuk menyediakan sumber listrik yang handal dan berkelanjutan bagi masyarakat di daerah terpencil[2].

Dalam konteks ini, generator induksi telah muncul sebagai salah satu solusi alternatif yang menjanjikan[3][4]. Meskipun memiliki kelebihan dalam kesederhanaan konstruksi dan keandalan operasi, namun kelemahannya terletak pada ketidakstabilan tegangan terbangkit yang rentan terhadap fluktuasi beban dan keluaran generator[5][6]. Fenomena ini menjadi hambatan dalam mencapai stabilitas dan konsistensi dalam penyediaan listrik, mengurangi efisiensi dan keandalan sistem secara keseluruhan[7].

Untuk mengatasi masalah tersebut, *Electronic Load Controller* (ELC) muncul sebagai inovasi yang menjanjikan[8]. Dengan kemampuannya untuk memperbaiki kelemahan generator induksi selama fluktuasi beban dan keluaran, ELC menawarkan solusi yang efektif untuk menjaga stabilitas sistem listrik. ELC bekerja dengan mengontrol tegangan dan frekuensi generator secara otomatis, sehingga menghasilkan daya yang optimal sesuai dengan kebutuhan pengguna[9][10].

Dalam penelitian ini, peneliti mengusulkan penggunaan ELC dengan tipe AC-DC konverter 3 fasa sebagai solusi untuk mengoptimalkan kinerja generator induksi[11]. Konverter ini memungkinkan penyaluran daya yang tersisa di generator ke *dumload* secara *real-time*, menjaga stabilitas tegangan dalam rentang yang diinginkan[12]. Dengan demikian, tegangan generator dapat dijaga dalam regulasi yang diinginkan, serta meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan[13].

Tujuan penelitian ini adalah untuk merancang dan mengimplementasikan sistem ELC dengan konverter AC-DC 3 fasa untuk mengontrol tegangan generator induksi dalam rentang regulasi yang diinginkan[14]. Peneliti bertujuan untuk menguji kinerja sistem ini dalam berbagai kondisi simulasi yang mencakup variasi beban dan fluktuasi tegangan generator[15]. Melalui pendekatan ini, peneliti berharap dapat memberikan kontribusi yang signifikan dalam meningkatkan aksesibilitas dan ketersediaan listrik di daerah terpencil, serta memperkuat keberlanjutan sistem energi secara keseluruhan[16].

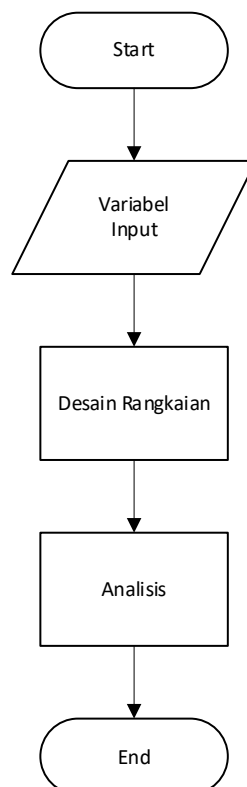
Penelitian ini menunjukkan pendekatan yang dapat menghadapi kompleksitas sistem kontrol daya. *Mikrokontroler* menjadi otak dalam memimpin dan mengkoordinasikan seluruh proses, sementara pembacaan pulsa *zero crossing* dan modifikasi sudut penyalan memberikan fondasi yang kokoh untuk optimalisasi kinerja SCR[17]. Dengan mendapatkan informasi nilai tegangan dan frekuensi dari sensor, sistem dapat menyesuaikan diri secara dinamis, meningkatkan efisiensi penggunaan energi[18].

Pada tahap berikutnya, peneliti akan melakukan simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink[19][20]. Simulasi ini akan membantu peneliti untuk menganalisis kinerja sistem ELC dengan konverter AC-DC 3 fasa dalam kondisi operasional yang beragam. Dengan memperoleh hasil simulasi yang valid dan akurat,

peneliti akan dapat mengevaluasi keefektifan solusi yang diusulkan dan mengidentifikasi potensi perbaikan yang mungkin diperlukan untuk implementasi di lapangan.

METODE

Metode penelitian ini diawali dengan memahami karakteristik generator, kemudian merancang *Electronic Load Controller* (ELC) dengan menggunakan konverter AC-DC 3 fasa. Tahap pertama dalam penelitian adalah pengembangan pendekatan matematika dari generator induksi, yang kemudian diikuti oleh penerapan teori kapasitor eksitasi dan pengujian saat saturasi untuk memahami karakteristik generator. Tahap berikutnya adalah merancang *Electronic Load Controller* (ELC) dengan menggunakan konverter AC-AC 3 fasa, yang melibatkan simulasi konverter AC-DC 3 fasa untuk menentukan parameter desain yang tepat. Setiap tahap di dalam diagram alir ini menggambarkan urutan logis dari langkah-langkah yang di ambil dalam penelitian.



Gambar 1. Diagram alir

Pengujian Saturasi Pada Mesin Induksi

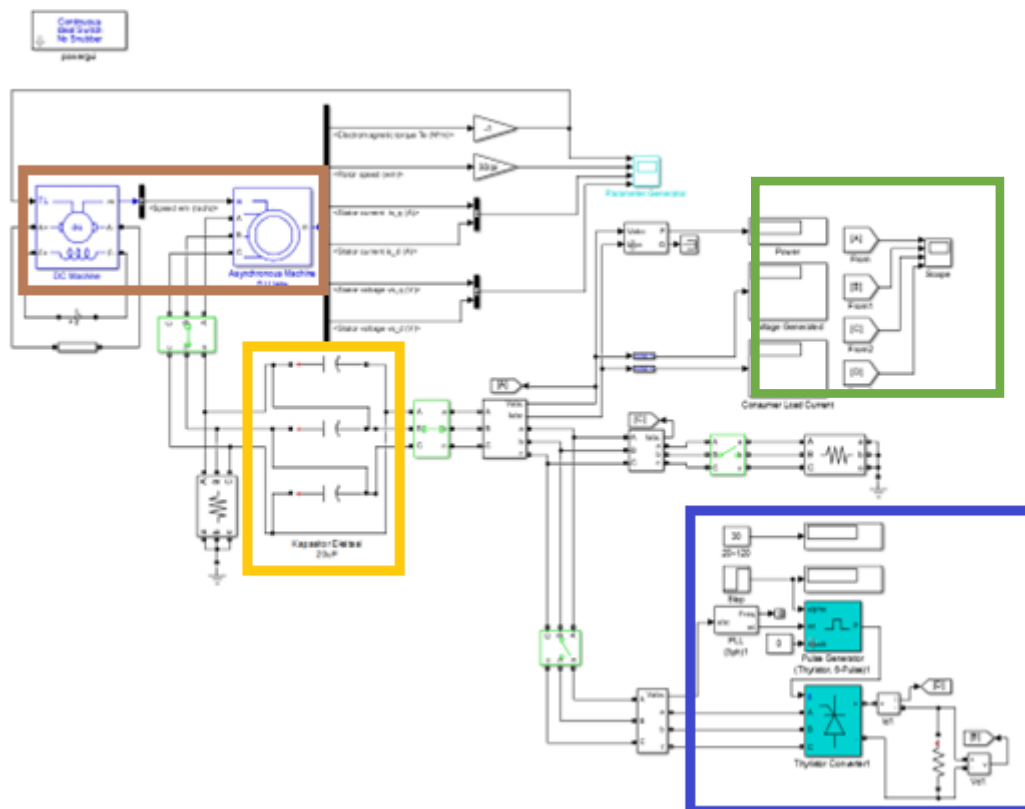
Pengujian saturasi pada mesin induksi penting untuk memahami bagaimana mesin merespons terhadap tingkat magnetisasi yang berbeda. Ini dilakukan dengan mengukur fluks magnetik yang dihasilkan oleh mesin saat berbagai tingkat arus medan diberikan. Dalam banyak kasus, fluks magnetik (ϕ) berbanding lurus dengan arus medan (I_f) dengan rumus sederhana $\phi = k * I_f$, di mana (k) adalah konstanta magnetisasi. Kurva yang dihasilkan membantu menggambarkan bagaimana mesin bereaksi terhadap tingkat magnetisasi yang berbeda.

Parameter Generator induksi

Untuk mendapatkan parameter generator induksi, peneliti mengumpulkan data dari pengujian saturasi pada mesin induksi. Data ini kemudian dimasukkan ke dalam model simulasi MATLAB/Simulink untuk *asynchronous motor*, yang mewakili generator induksi dalam simulasi. Dengan menggunakan data tersebut, peneliti dapat membuat model yang akurat untuk menganalisis kinerja generator dalam berbagai kondisi operasi.

Pemodelan Generator induksi Terintegrasi ELC

Pemodelan generator induksi terintegrasi dengan *Electronic Load Controller* (ELC) melibatkan ELC untuk mengarahkan kelebihan daya ke dumpload, menjaga keseimbangan sistem agar tetap efisien dan stabil. Dengan rumus $P_{generator} = P_{load} + P_{dumpload}$, di mana P_{load} adalah total daya yang dikonsumsi oleh beban pengguna, $P_{generator}$ adalah kapasitas daya generator, dan $P_{dumpload}$ adalah daya yang disalurkan ke $P_{dumpload}$ oleh ELC. Integrasi ELC memastikan bahwa generator tetap dapat menghasilkan daya sesuai kebutuhan, dan mengoptimalkan kinerja keseluruhan sistem.



Gambar 2. Model Generator Induksi Terintegrasi dengan ELC

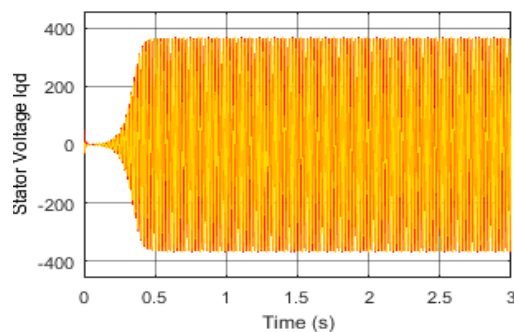
Pada Gambar 2 dapat disimpulkan bahwa mesin DC dan mesin Asinkron (bagian coklat) berfungsi sebagai penggerak atau pembangkit. Energi yang dihasilkan dari mesin DC dan Asinkron di alirkan ke kapasitor bank (bagian kuning) yang berfungsi sebagai penyimpan sementara dan pengstabil tegangan. Pada *Converter AC-DC* (bagian biru) yang menggunakan pengontrol sinyal pada komponen *Pulse Generator* yang berfungsi untuk mengatur operasi dari komponen *Thyristor Converter*. Bentuk Output yang dikeluarkan berupa tegangan, arus, daya serta keluaran dari konverter dapat dilihat pada komponen scope (bagian hijau).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan pembahasan ini akan menyoroti uji simulasi pada Generator Induksi dengan *Electronic Load Controller* (ELC). Peneliti akan mengulas variasi nilai kapasitor eksitasi dan beban resistif, serta mengevaluasi penggunaan ELC dalam menjaga stabilitas dan efisiensi generator.

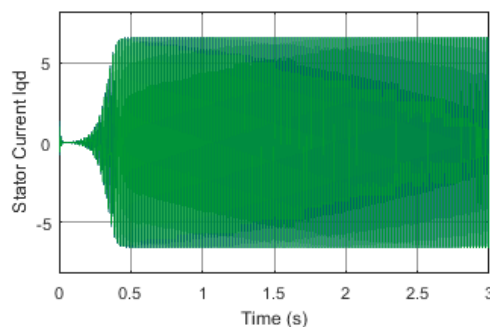
Pembangkitan Tegangan Generator Induksi

Pembangkitan tegangan pada generator induksi dengan menggunakan kapasitor eksitasi merupakan suatu proses penting dalam menciptakan medan magnet yang diperlukan untuk menghasilkan tegangan.



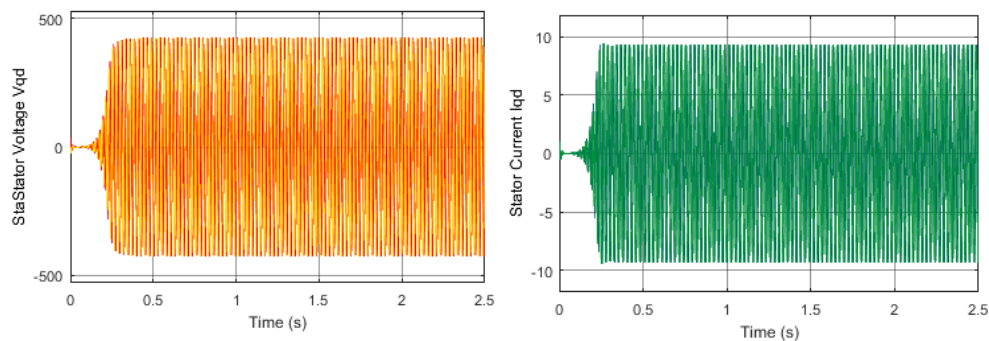
Gambar 3. Output Tegangan Dengan Kapasitor Eksitasi $20\mu\text{F}$

Pada gambar di atas, yang menunjukkan pembangkitan tegangan dengan kapasitor eksitasi $20\mu\text{F}$, proses dimulai dengan arus listrik yang berubah mengalir melalui gulungan stator generator saat berputar.



Gambar 4. Output Arus Dengan Kapasitor $30\mu\text{F}$

Arus ini menciptakan medan magnet yang berubah, yang kemudian memicu arus pada gulungan rotor dan menghasilkan tegangan pada terminal generator. Kapasitor eksitasi berperan penting dalam proses ini dengan menyediakan medan magnet tambahan yang stabil untuk mendukung pembangkitan tegangan.

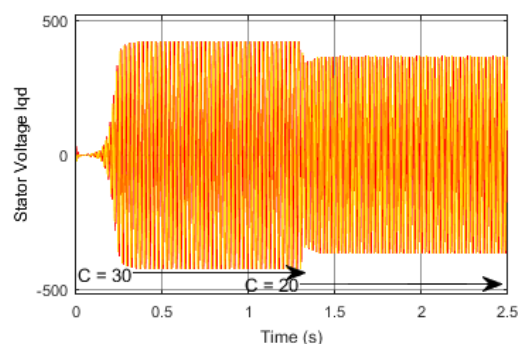


Gambar 5. keluaran Generator Induksi Pada Kapasitor Eksitasi 30uF

Gambar 5, menggambarkan pembangkitan tegangan dengan kapasitor eksitasi 30uF. Peningkatan nilai kapasitor eksitasi dari 20uF menjadi 30uF menyebabkan peningkatan kapasitas penyimpanan muatan listrik oleh kapasitor. Sebagai akibatnya, medan magnet yang dihasilkan oleh kapasitor menjadi lebih kuat. Hal ini mengakibatkan arus yang lebih besar mengalir pada gulungan rotor, yang pada gilirannya menghasilkan tegangan yang lebih tinggi pada terminal generator. Dengan demikian, urutan gambar menggambarkan bagaimana peningkatan nilai kapasitor eksitasi menyebabkan peningkatan dalam pembangkitan tegangan oleh generator.

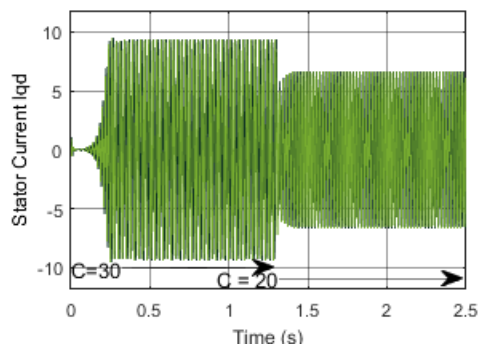
Perubahan Nilai Kapasitor Eksitasi

Perubahan nilai kapasitor eksitasi pada generator induksi dapat memengaruhi pembangkitan tegangan dan arus.



Gambar 6. Tegangan Generator Induksi Pada Perubahan Nilai Kapasitor

Ketika nilai kapasitor eksitasi dikurangi dari 30uF menjadi 20uF setelah beberapa waktu, terjadi penurunan tegangan pada terminal generator. Hal ini dapat dijelaskan dengan teori bahwa kapasitor eksitasi berperan dalam menyediakan medan magnet tambahan yang diperlukan untuk menghasilkan tegangan. Dengan mengurangi nilai kapasitor eksitasi, jumlah muatan listrik yang tersedia untuk menyediakan medan magnet juga berkurang. Sebagai hasilnya, medan magnet yang dihasilkan menjadi lebih lemah, yang mengakibatkan penurunan arus induksi pada gulungan rotor dan, akhirnya, penurunan tegangan pada terminal generator.

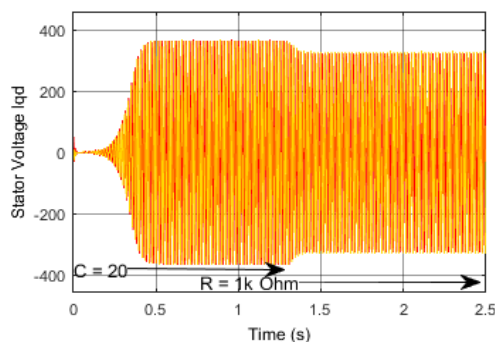


Gambar 6. Arus Stator Generator Induksi Pada Perubahan Nilai Kapasitor

Selain itu, perubahan nilai kapasitor eksitasi juga dapat memengaruhi arus yang mengalir melalui generator. Ketika nilai kapasitor eksitasi dikurangi dari 30uF menjadi 20uF, arus yang mengalir melalui gulungan stator dan rotor juga mengalami penurunan. Ini terjadi karena medan magnet yang dihasilkan oleh kapasitor eksitasi lebih lemah setelah nilai kapasitor dikurangi. Sebagai akibatnya, lebih sedikit daya listrik yang dihasilkan dan lebih sedikit arus yang diperlukan untuk menggerakkan generator.

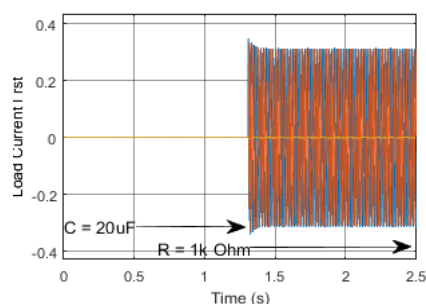
Karakteristik Keluaran Generator Induksi Berbeban

Ketika generator induksi tidak memiliki beban (beban nol), tegangan yang dihasilkan oleh generator tersebut cenderung stabil dan konstan. Hal ini disebabkan oleh aliran arus listrik yang minimal melalui gulungan stator, karena tidak ada beban yang membutuhkan daya listrik. Sebagai hasilnya, tidak ada tegangan drop yang signifikan di dalam generator, dan tegangan yang dihasilkan tetap konstan.



Gambar 7. Karakteristik Tegangan Generator Induksi Berbeban

Namun, ketika generator induksi terhubung dengan beban, terjadi fluktuasi tegangan. Ini disebabkan oleh adanya tegangan drop yang terjadi saat arus listrik mengalir melalui impedansi internal generator dan impedansi saluran distribusi.

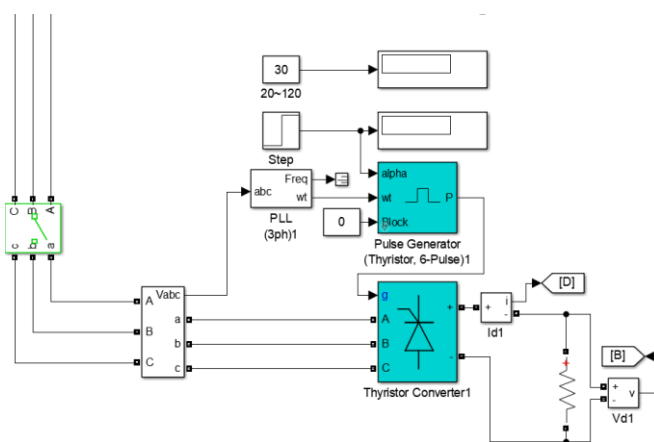


Gambar 8. Karakteristik Arus Generator Induksi Berbeban

Ketika beban terhubung, arus beban yang mengalir meningkat, menyebabkan tegangan drop yang lebih besar di dalam generator. Hal ini mengakibatkan tegangan pada terminal generator mengalami penurunan. Secara umum, semakin besar beban yang terhubung, semakin besar pula tegangan drop yang terjadi. Oleh karena itu, terjadinya fluktuasi tegangan saat generator berbeban disebabkan oleh tegangan drop yang dihasilkan oleh arus beban yang mengalir melalui impedansi internal generator dan saluran distribusi.

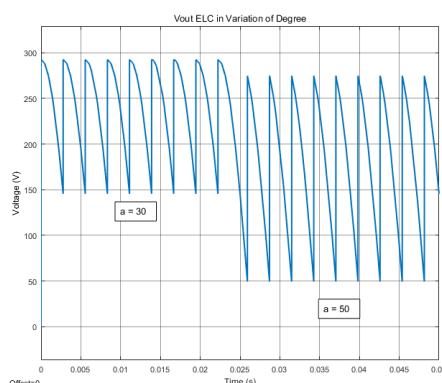
ELC Topologi AC-DC Konverter 3 fasa

Electronic Load Controller (ELC) adalah perangkat yang berfungsi untuk mengontrol tegangan generator agar tetap berada dalam rentang nilai yang diinginkan. ELC bekerja dengan cara menyesuaikan aliran daya yang disalurkan ke beban atau dumpload secara real-time, terutama ketika terjadi fluktuasi tegangan akibat pengaruh beban. Teori di balik operasi ELC melibatkan penggunaan kontroler yang dapat mendeteksi perubahan tegangan dan mengatur aliran daya yang diteruskan ke beban atau dumpload sesuai dengan kebutuhan untuk menjaga tegangan generator tetap stabil.

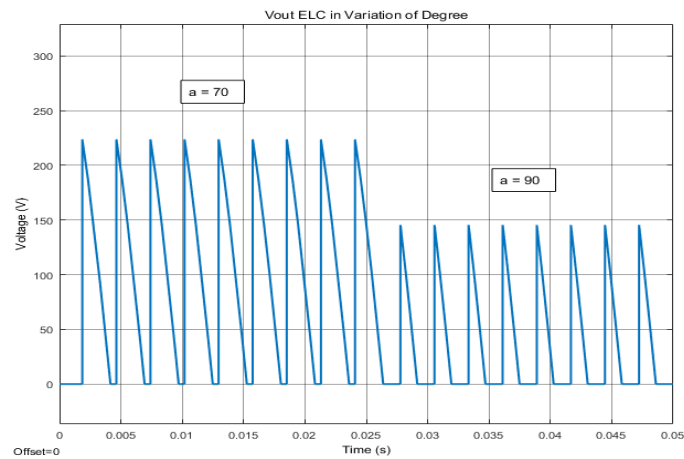


Gambar 9. Model ELC Topologi AC-DC Konverter 3 fasa

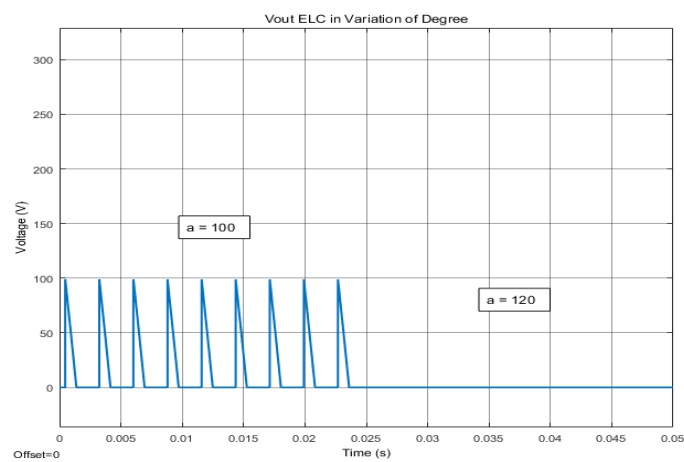
Operasi ELC juga melibatkan penggunaan AC-DC konverter 3 fasa. Konverter ini bertugas mengubah arus listrik AC menjadi arus listrik DC, yang kemudian digunakan untuk mengontrol aliran daya ke beban atau dumpload. Efektivitas AC-DC konverter 3 fasa terletak pada kemampuannya untuk menyediakan tegangan yang bervariasi sesuai dengan kebutuhan real-time ELC dalam mengatasi fluktuasi tegangan.



Gambar 10. Keluaran Tegangan ELC Pada Sudut 30° dan 50°

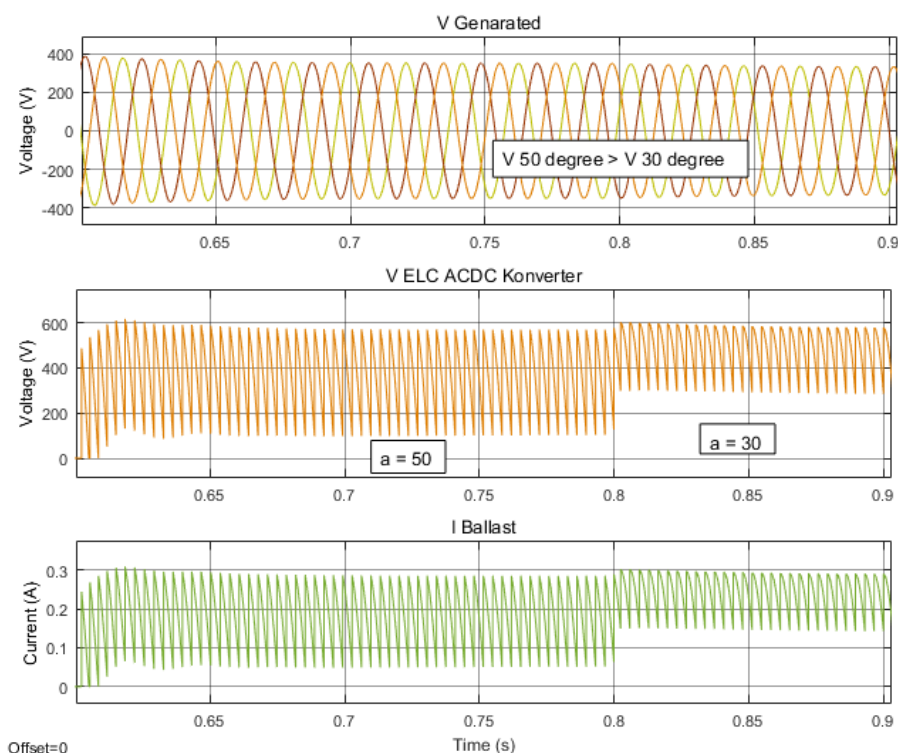


Gambar 11. Keluaran Tegangan ELC Pada Sudut 70° dan 90°

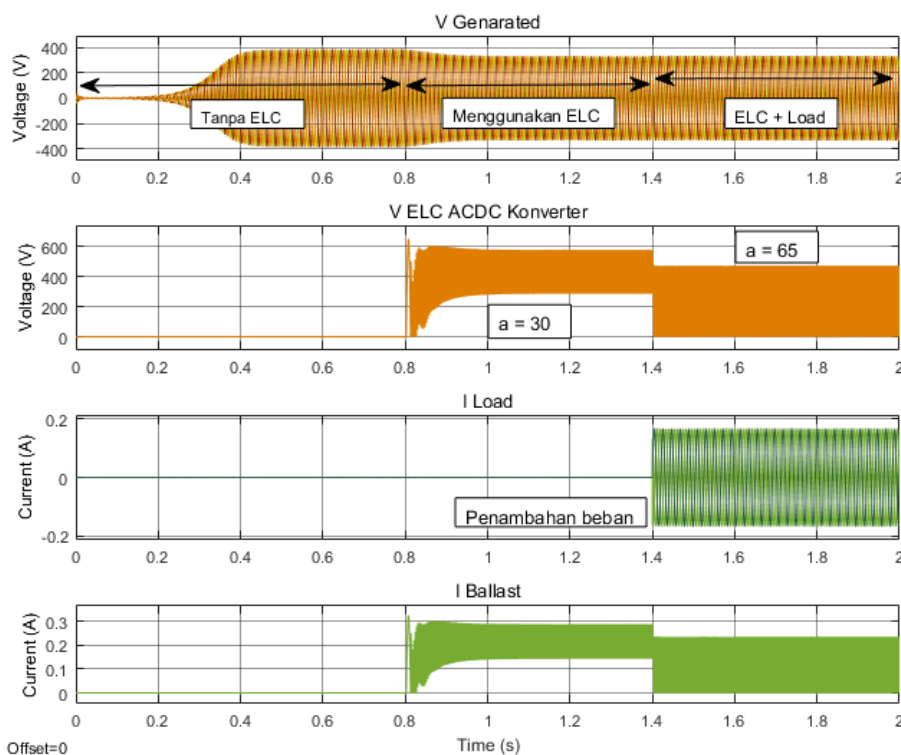


Gambar 12. Keluaran Tegangan ELC Pada Sudut 100° dan 120°

Konverter ini dapat menghasilkan tegangan yang sesuai dengan rentang regulasi yang diinginkan, dan dapat menyesuaikan outputnya secara cepat dan akurat terhadap perubahan kondisi sistem. Output ELC dalam bentuk output konverter ditampilkan dalam berbagai variasi sudut penyalaan untuk memperkuat penelitian.



Gambar 13. Keluaran ELC Pada Sudut 50 derajat dan 30 derajat Serta Pengaruh terhadap Tegangan Generator



Gambar 14. Pengontrolan Tegangan Generator Pada Berbagai Kondisi Menggunakan ELC AC-DC 3 Fasa terkendali

Gambar 14 adalah output dari generator ketika dikontrol oleh ELC memberikan gambaran visual tentang bagaimana ELC mengatur tegangan generator dalam berbagai situasi, serta efektivitasnya dalam menjaga tegangan generator tetap stabil meskipun terjadi fluktuasi beban.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan dari penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan *Electronic Load Controller* (ELC) bersama dengan AC-DC konverter 3 fasa telah membuktikan efektivitasnya dalam mengatur tegangan generator agar tetap stabil dalam rentang yang diinginkan. Harapan dari penelitian ini adalah agar dapat dijadikan referensi bagi penelitian selanjutnya dalam pengembangan teknologi kontrol tegangan yang lebih canggih dan efisien. Dengan demikian, diharapkan penelitian-penelitian mendatang dapat memanfaatkan temuan dan metodologi yang ditemukan dalam penelitian ini untuk mengoptimalkan kinerja sistem generator dalam berbagai kondisi operasional.

REFERENSI

- [1] A. Taufiqurrahman and J. Windarta, "OVERVIEW POTENSI DAN PERKEMBANGAN PEMANFAATAN ENERGI AIR DI INDONESIA," *J. Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 1, no. 3, pp. 70–78, Nov. 2021, doi: 10.14710/jebt.2020.10036.
- [2] D. A. Wicaksono, F. Fitriana, S. Ariyani, R. Nurwahyudin, and F. A. Ajie, "Peningkatan Efisiensi Panel Surya pada Instalasi Rooftop berbasis Internet Of Things (IoT)," *J. Tek. Elektro dan Komputasi*, vol. 3, no. 2, pp. 104–110, 2021, [Online]. Available: <http://jurnal.unmuhjember.ac.id/index.php/ELKOM/article/view/5869>.
- [3] P. G. Chamdareno and E. Dermawan, "Peningkatan Efisiensi Generator Induksi Dengan Beban Kapasitif," pp. 1–5, 2018.
- [4] S. Alim, Z. Arifin, N. R. Ardian, A. Rahindra, U. Islam, and N. Ulama, "Aplikasi Motor Induksi Sebagai Generator Pada Sistem," vol. 10, pp. 107–129, 2019.
- [5] N. Win Aung, "Microcontroller Based Electrical Parameter Monitoring System of Electronic Load Controller Used in Micro Hydro Power Plant," *J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 3, no. 5, p. 97, 2015, doi: 10.11648/j.jeee.20150305.11.
- [6] "sistem eksitasi berbeban."
- [7] M. Erdyan Setyo W, Mochammad Rif'an, ST., MT., Teguh Utomo, Ir., "Perancangan electronic load controller (elc) sebagai penstabil frekuensi pada pembangkit listrik tenaga mikrohidro (pltmh)," vol. 4, no. 2, pp. 0–5, 2018.
- [8] E. A. Hakim, R. Pandunengsih, D. Suhardi, and N. Setyawan, "Kontrol Tegangan Self-Excited Induction Generator dengan Electronic Load Controller Terkontrol PID-GA," *IJEIS (Indonesian J. Electron. Instrum. Syst.)*, vol. 10, no. 1, p. 41, 2020, doi: 10.22146/ijeis.54197.
- [9] T. Utomo, L. Ardhenta, and R. Y. At Tamimi, "Rancang Bangun ELC (Electronic Load Controller) sebagai Pengendali Beban PLTMH (Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro) Kali Jari," *J. EECCIS (Electrics, Electron. Commun. Control. Informatics, Syst.)*, vol. 15, no. 2, pp. 36–42, 2022, doi: 10.21776/jeeccis.v15i2.1541.
- [10] A. P. Hakim, S. S. Suprpto, and M. N. Farid, "Pengaruh Beban dan Filter pada Penyearah AC-DC Terkendali untuk Rangkaian Pengisi Li-ion Berbasis Bridge Rectifier dan Buck Converter Menggunakan Metode CC/CV," *JTT (Jurnal Teknol. Terpadu)*, vol. 9, no. 1, pp. 88–98, 2021, doi: 10.32487/jtt.v9i1.1118.
- [11] M. Ardianto, J. Pratilastiarso, and ..., "Electric Load Controller Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro," ... *dan Infrastruktur*, vol. 2, pp. 1–6, 2019, [Online]. Available: <https://pro.unitri.ac.id/index.php/sentikuin/article/download/139/107>.
- [12] D. Nongdhar, "Design of Electronic Load Controllers of Induction Generators used in Micro Hydro Power Schemes," *ADBU J. Electr. ...*, vol. 1, no. 1, pp. 24–27,

- 2017.
- [13] I. P. Surya *et al.*, “Perancangan Dan Analisis Back To Back Thyristor Untuk Regulasi Tegangan Ac Satu Fasa,” *Kitektro*, vol. 2, no. 2, pp. 24–29, 2017.
 - [14] A. Elahi, “Frequency Control Capability of Micro Hydro Power Plants,” vol. 10, no. 1, pp. 511–514, 2019.
 - [15] Rachmat Sutjipto, Heri Sungkowo, and Epiwardi Epiwardi, “Analisis Kinerja Generator Induksi 3 Fasa Berdasarkan Regulasi Tegangannya,” *J. Tek. Ilmu Dan Apl.*, vol. 3, no. 2, pp. 90–97, 2022, doi: 10.33795/jtia.v3i1.89.
 - [16] A. I. Agung, “Potensi Sumber Energi Alternatif Dalam Mendukung Kelistrikan Nasional,” *J. Pendidik. Tek. Elektro*, vol. 2, no. 2, pp. 892–897, 2013.
 - [17] M. Kevin, “JTEV (JURNAL TEKNIK ELEKTRO DAN VOKASIONAL) Sistem Pengendali Tegangan Berbasis Mikrokontroler Arduino UNO,” vol. 06, no. 01, pp. 134–144, 2020, [Online]. Available: <http://ejournal.unp.ac.id/index.php/jtev/index>.
 - [18] F. Baskoro, H. W. Fahruri, M. Widyartono, and ..., “MONITORING ARUS, TEGANGAN, DAN SUHU PADA PROTOTYPE THERMOELECTRIC GENERATOR BERBASIS IoT,” *J. Tek. ...*, vol. 10, no. 1, pp. 137–144, 2021, [Online]. Available: <https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/JTE/article/view/36876%0Ahttps://ejournal.unesa.ac.id/index.php/JTE/article/download/36876/32821>.
 - [19] H. Haryanto and R. Munarto, “Analisis Karakteristik Motor Induksi Tiga Fasa XYZ Standar NEMA,” *Setrum Sist. Kendali-Tenaga-elektronika-telekomunikasi-komputer*, vol. 3, no. 1, p. 35, 2016, doi: 10.36055/setrum.v3i1.496.
 - [20] Y. T. K. Priyanto, A. A. Matarru, M. R. Dewanto, and R. Wahyudi, “Desain dan Simulasi Konverter Tiga Fasa AC – DC pada Pico Hydro,” *J. Sistim Inf. dan Teknol.*, vol. 5, no. 1, pp. 57–67, 2023, doi: 10.37034/jsisfotek.v5i1.194.