

Perbandingan Penyalaan Sudut Fasa pada SRG Guna Meningkatkan Kinerja untuk Memaksimalkan Keluaran Daya

Rizky Adhitya Nugroho¹, Slamet Riyadi¹, Leonardus Heru Pratomo³, Florentinus Budi Setiawan⁴
^{1,2,3,4} Program Studi Teknik Elektro, Universitas Katolik Soegijapranata Semarang

Jl. Pawiyatan Luhur Sel. IV No.1, Bendan Duwur, Kec. Gajahmungkur, Kota Semarang, Jawa Tengah 50234
e-mail: rizkyadhinug@gmail.com

Abstrak— Dewasa ini teknologi energi terbarukan banyak dikembangkan, salah satunya Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). PLTB membutuhkan generator untuk menghasilkan energi listrik. Salah satu generator yang sedang dikembangkan pada PLTB adalah Switched Reluctance Generator (SRG). SRG dipilih karena memiliki desain yang sederhana dan perawatan yang mudah. SRG memiliki konstruksi rotor yang terbuat dari inti besi, sehingga membutuhkan parameter lain agar dapat menghasilkan energi listrik. Metode agar SRG dapat menghasilkan energi listrik adalah dengan menjadikan inti besi pada rotor sebagai magnet sementara. Metode single pulse yaitu mengoperasikan konverter asymmetric untuk menyuplai arus pada stator agar menginduksi rotor. Metode ini dilakukan dengan cara mengatur sudut penyalaan fasa pada belitan stator. Pengoperasian SRG membutuhkan informasi impuls arus untuk melihat profil induktansi guna menentukan sudut penyalaan. Pada penelitian ini dilakukan pengaturan sudut penyalaan fasa untuk mengetahui daya keluaran yang optimal. Verifikasi menggunakan perangkat lunak Simulink MATLAB dan pengujian perangkat keras.

Kata kunci: *Switched Reluctance Generator, MATLAB, SIMULINK, single pulse, asymmetric, renewable energy*

Abstract — Nowadays a lot of the renewable energy developed, one of them is Wind Power Generator. It needs generator to produce electricity. One of the generators developed on wind power generator is SRG which is chosen because of its simple design and easy to maintain. SRG has rotor construction made of iron core, therefore it needs another parameter to produce electricity. The method applied in SRG that it can produce electricity is temporarily magnifying iron core on the rotor (Single Pulse). Single Pulse is operating the asymmetric converter to supply the stream on starter for inducing rotor. This method is implemented by adjusting the angle of phase ignition on the starter coil. SRG operation requires stream impulse information to see the profile induction in order to determine ignition angle. In this research, angle phase ignition adjustment is required to identify the optimized output energy. The verification uses the software of Simulink MATLAB & hardware assessments.

Keywords: *Switched Reluctance Generator, MATLAB, SIMULINK, single pulse, asymmetric, renewable energy*

I. PENDAHULUAN

PLTB adalah salah satu energi terbarukan yang tidak menimbulkan polusi. Pada perkembangan teknologi energi terbarukan tidak terlepas dari generator, salah satunya adalah *Switched Reluctance Generator* (SRG). SRG memiliki kelebihan yaitu konstruksi yang sederhana karena rotor terbuat dari inti besi dan dapat bekerja pada kecepatan tinggi. Untuk kendali pada SRG menggunakan konverter *asymmetric* 3 fasa dengan IGBT sebagai saklar statis [1]. Dalam menentukan penyalaan sudut fasa membutuhkan informasi impuls arus untuk melihat profil induktansi guna menentukan sudut penyalaan. Metode pengoperasian SRG pada kecepatan tinggi menggunakan metode *single pulse*, di mana penentuan sudut penyalaan fasa mempengaruhi daya keluaran generator [2].

Pada penelitian ini menyajikan perbandingan dua kondisi sudut penyalaan fasa, Kondisi I dengan interval 30°

dan Kondisi II 31.5°. Kondisi II mengalami kondisi *overlap* karena saklar antar fasa saling bertabrakan. Selain perbandingan sudut, perubahan pada berbagai variasi kecepatan putar rotor juga disajikan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membandingkan penyalaan sudut fasa untuk meningkatkan kinerja pada SRG. Guna membantu penelitian maka dilakukan simulasi menggunakan MATLAB/SIMULINK. Hasil simulasi akan digunakan sebagai parameter implementasi alat sehingga dapat meningkatkan kinerja pada SRG.

II. METODE

A. Prinsip Kerja

Pada dasarnya SRG tidak dapat menghasilkan energi listrik hanya dengan diputar oleh energi kinetik, karena rotor terbuat dari inti besi [3]. Metode magnetisasi pada rotor dapat digunakan agar SRG dapat menghasilkan energi

listrik. Persamaan tegangan pada setiap fasa disajikan pada (1)

$$V = R_{ph}i_{ph} + L_{ph} \frac{di_{ph}}{dt} + \omega r \frac{d\phi_{ph}}{d\theta} \quad (1)$$

di mana V , R_{ph} , i_{ph} , L_{ph} , θ dan ω adalah tegangan, resistansi, arus fasa, induktansi fasa, posisi rotor dan kecepatan putaran rotor.

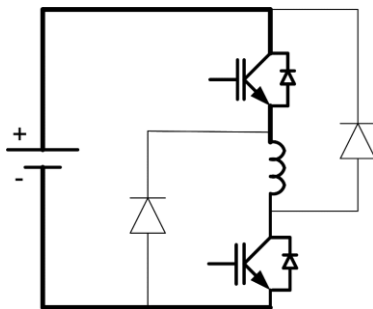
Inti besi dari rotor akan terinduksi setelah diberikan injeksi arus sehingga menghasilkan fluksi. Persamaan *back-EMF* (*electromotive force*) dapat ditunjukkan pada Persamaan (2):

$$e = \omega i_{ph} \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

di mana e , i_{ph} , ω dan $d\phi/dt$ adalah *back-EMF*, arus fasa, kecepatan rotor dan perubahan fluksi terhadap waktu[4]. Untuk dapat bekerja SRG membutuhkan konverter untuk memberikan eksitasi pada belitan stator. Konverter yang digunakan merupakan konverter *asymmetric*. Konverter *asymmetric* berkerja menggunakan dua mode operasi yaitu *magnetizing* dan *demagnetizing* yang akan dijelaskan sebagai berikut :

B. Magnetizing

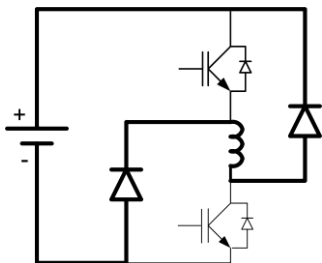
Magnetizing merupakan proses di mana rotor pada SRG dijadikan sebagai magnet sementara. Mode ini dilakukan dengan mengaktifkan kedua saklar secara bersamaan, sehingga belitan stator akan menerima *supply* dari sumber *Direct Current* (DC) [5]. Mode *magnetizing* disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Proses *Magnetizing* pada SRG

C. Demagnetizing

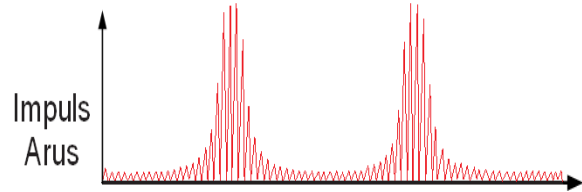
Demagnetizing terjadi setelah proses *magnetizing* pada belitan stator. Mode ini dilakukan dengan mematikan kedua saklar secara bersamaan, sehingga energi yang tersimpan pada belitan stator dapat mengalir ke beban melalui dioda[6]. Mode *demagnetizing* ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Proses *Demagnetizing* pada SRG

D. Impuls Arus Untuk Menentukan Profil Induktansi

Dalam menentukan sudut penyalaan pada belitan stator dibutuhkan profil induktansi pada SRG. Profil induktansi dapat diketahui dengan melihat impuls arus yang dihasilkan melalui pemberian pulsa *Pulse Width Modulation* (PWM) berfrekuensi tinggi pada salah satu belitan fasa. Sinyal impuls arus menghasilkan nilai yang berbanding terbalik dengan karakteristik profil induktansi[7]. Impuls arus pada SRG ditunjukkan pada Gambar 3.



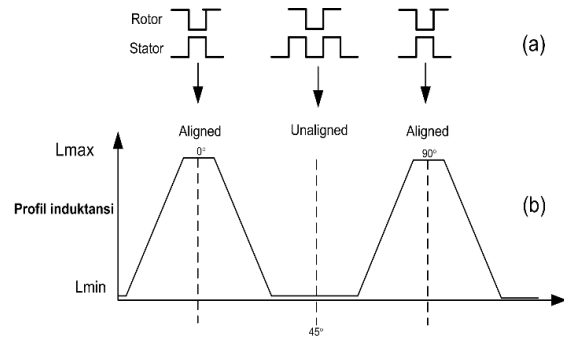
Gambar 3. Impuls arus pada SRG

Nilai impuls arus dapat dihasilkan dengan persamaan (3), (4).

$$L_{ph} = V_{dc} \frac{\Delta t_{on}}{i_{imp}} \quad (3)$$

$$i_{imp} = \frac{V_{dc}}{L_{ph}} \Delta t_{on} \quad (4)$$

Di mana L_{ph} , V_{DC} , i_{imp} dan Δt_{on} adalah induktansi, sumber tegangan, impuls arus dan waktu pemberian pulsa



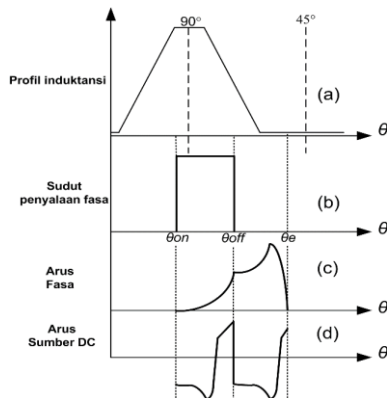
Gambar 4. Posisi rotor dan stator SRG (a) dan profil induktansi (b)

Pada Gambar 4 menunjukkan posisi rotor dan stator SRG (a), profil induktansi (b). SRG beroperasi ketika induktansi menurun dimana posisi rotor sejajar (*aligned*) akan meninggalkan stator pada posisi tidak sejajar (*unaligned*). Dalam satu putaran SRG menghasilkan empat profil induktansi karena satu putaran diwakilkan 360° mekanik dan terdapat empat rotor pada konstruksi generator sehingga setiap profil induktansi sebesar 90° mekanik[8].

E. Penentuan Sudut Penyalaan Fasa SRG

Penentuan sudut penyalaan yang tepat sangat penting untuk mendapatkan daya keluaran yang optimal. Sudut penyalaan

fasa, arus fasa dan arus sumber DC (*Direct Current*) disajikan pada Gambar 5



Gambar 5. (a) Profil Induktansi (b) sudut penyalan fasa, (c) arus fasa, (d) arus sumber DC

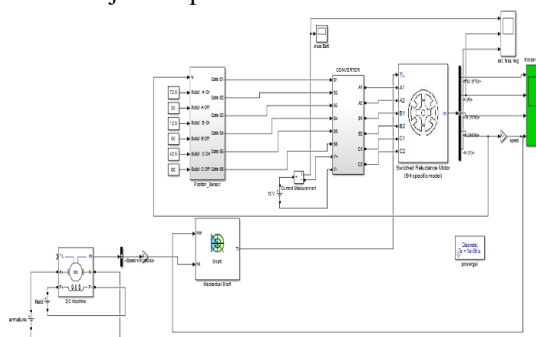
Energi dari sumber DC akan membuat fluksi magnet selama magnetisasi, $\theta_{on} \leq \theta \leq \theta_{off}$ lalu mengirimkan energi kembali dari penggerak ke sumber DC selama *generating*, $\theta_{off} \leq \theta \leq \theta_e$ [9]. Kemiringan arus fasa setelah kondisi saklar dimatikan menghasilkan nilai *back-EMF* yang lebih besar maka ini menandakan keluaran daya pada SRG bekerja secara optimal[10].

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan metode penelitian maka dilakukan simulasi menggunakan perangkat lunak Simulink. Hasil simulasi akan dijadikan parameter implementasi *prototype*

A. Hasil Simulasi

Pada simulasi ini mencakup SRG, konverter jenis *asymmetric* 3 fasa, sensor posisi, *mechanical shaft* dan mesin DC sebagai pengganti energi kinetik. Rangkaian simulasi ditunjukkan pada Gambar 6.



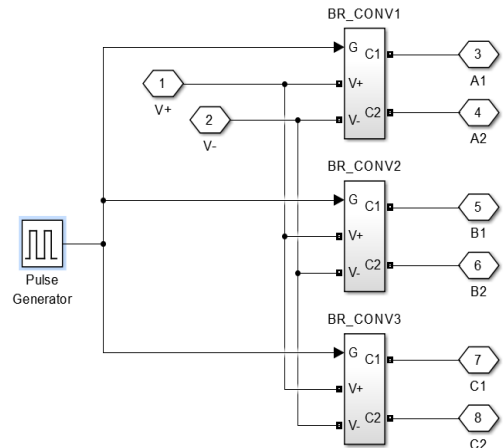
Gambar 5. Rangkaian SRG SIMULINK

Parameter yang digunakan pada simulasi disajikan pada Tabel 1

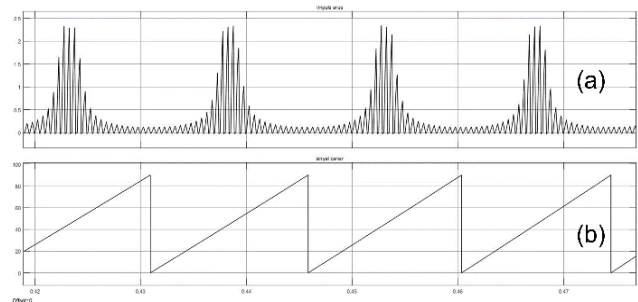
Tabel 1. Parameter simulasi SRG

Parameter	Nilai	Satuan
Stator	6	-
Rotor	4	-
Resistansi	3.3	Ohm
Induktansi	1.4	mH
Tegangan	12	volt

Dalam menentukan profil induktansi dengan melihat impuls arus pada salah satu fasa, diberikan pulsa 10 kHz pada saklar. Gambar 7 disajikan rangkaian untuk mengetahui profil induktansi menggunakan *pulse generator*.



Gambar 6. Proses impuls arus pada belitan stator



Gambar 7. Hasil simulasi (a) impuls arus (b) sensor posisi

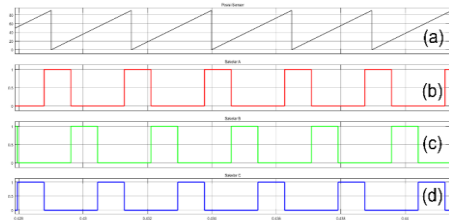
Untuk mengetahui profil induktansi pada SRG yaitu dengan mengacu pada nilai impuls arus, semakin kecil nilai impuls arus maka nilai profil induktansi semakin besar. Hal ini dibuktikan dengan letak nilai puncak pada sensor posisi semakin tinggi maka nilai induktansi semakin besar

Setelah mengetahui posisi rotor maka dapat menentukan sudut penyalan pada SRG yang tepat sehingga dapat bekerja dengan optimal. Kondisi sudut penyalan ditunjukkan pada Tabel 2.

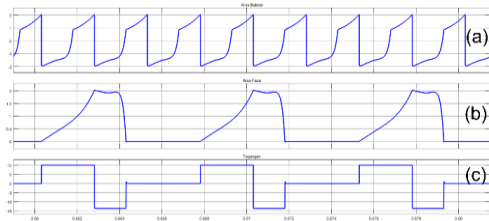
Tabel 2. Kondisi sudut penyalan pada simulasi

Kondisi	Fasa	Sudut Penyalan (°)
I	A	82-22
	B	22-52
	C	52-82
II	A	80,5-22
	B	20,5-52
	C	50,5-82

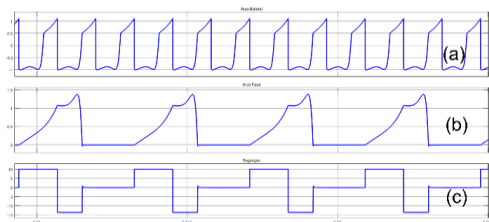
Dari Tabel 2. menunjukkan dua kondisi sudut penyalan dengan lebar pulsa kendali yang berbeda. Pada Kondisi I memiliki lebar pulsa kendali sebesar 30° mekanik sedangkan pada kondisi II memiliki 31,5° mekanik. Sudut penyalan pada Kondisi II mengalami *overlap* karena sesuai dengan analisis pada penelitian lebar pulsa kendali antar fasa sebesar 30°.



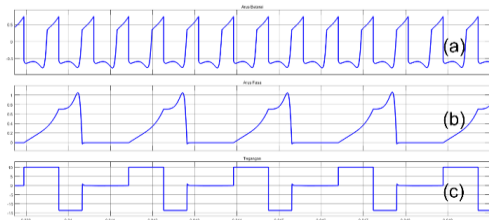
Gambar 8. Hasil simulasi gelombang (a) posisi rotor (b) sudut penyalan A (c) sudut penyalan B (d) sudut penyalan C pada kondisi I



Gambar 9. Hasil simulasi (a) arus sumber DC (b) arus fasa (c) tegangan fasa pada kondisi I dengan kecepatan rotor 2000 RPM

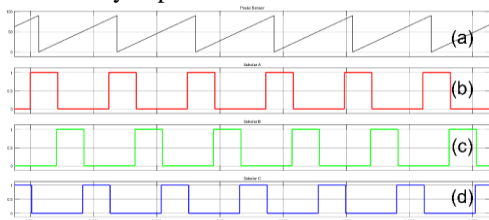


Gambar 10. Hasil simulasi (a) arus sumber DC (b) arus fasa (c) tegangan fasa pada kondisi I dengan kecepatan rotor 4000 RPM

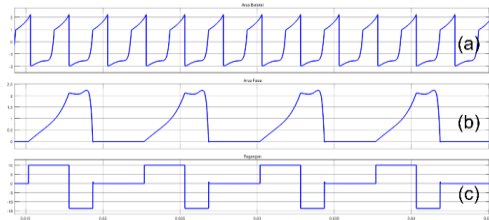


Gambar 11. Hasil simulasi (a) arus sumber DC (b) arus fasa (c) tegangan fasa pada kondisi I dengan kecepatan rotor 6000 RPM

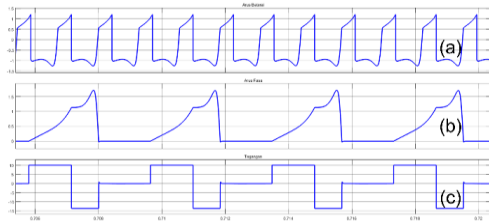
Hasil simulasi pada Kondisi I dengan kecepatan rotor yang berbeda, menghasilkan bentuk arus sumber DC dan arus fasa yang berbeda. Semakin tinggi kecepatan rotor maka semakin besar nilai *back-EMF* maka menandakan hasil keluaran daya optimal.



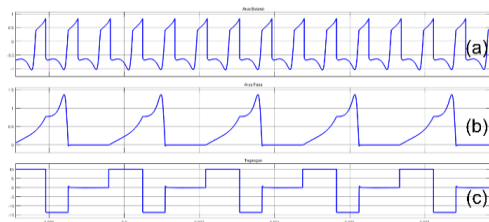
Gambar 12. Hasil simulasi (a) posisi rotor (b) sudut penyalan A (c) sudut penyalan B (d) sudut penyalan C pada kondisi II



Gambar 13. Hasil simulasi (a) arus sumber DC (b) arus fasa (c) tegangan fasa pada kondisi II dengan kecepatan rotor 2000 RPM



Gambar 14. Hasil simulasi (a) arus sumber DC (b) arus fasa (c) tegangan fasa pada kondisi II dengan kecepatan rotor 4000 RPM

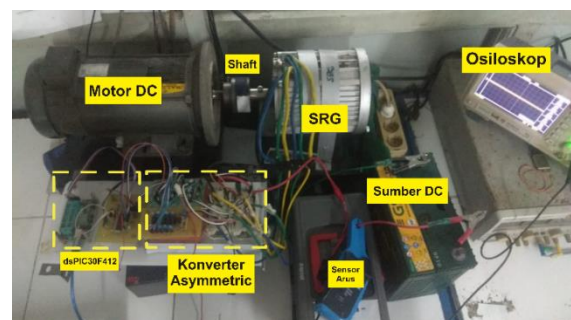


Gambar 15. Hasil simulasi (a) arus sumber DC (b) arus fasa (c) tegangan fasa pada kondisi II dengan kecepatan rotor 6000 RPM

Dari hasil keluaran gelombang pada simulasi diatas, didapat pada Kondisi II menghasilkan arus sumber DC dan arus fasa yang lebih menonjol dibanding Kondisi I. hal ini dikarenakan pada Kondisi II mengalami mengalami *overlap* dimana daerah arus yang dibangkitkan lebih luas pada Kondisi II daripada daerah arus Kondisi I, sehingga Kondisi II menghasilkan *back-EMF* lebih besar dari Kondisi I

B. Hasil Pengujian Alat Prototype

Untuk mendukung metode analisa maka dilakukan pengujian pada alat *prototype*. Pengujian alat ini berdasarkan dengan kondisi pada simulasi.



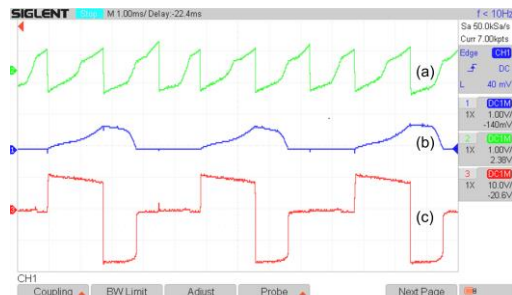
Gambar 16. *Prototype* SRG

Pengujian pada *prototype* terdiri dari SRG tiga fasa, mikrokontroler dsPIC30F4012, konverter *asymmetric* menggunakan IGBT. Berikut ini adalah parameter yang akan digunakan pada simulasi disajikan pada Tabel 3.

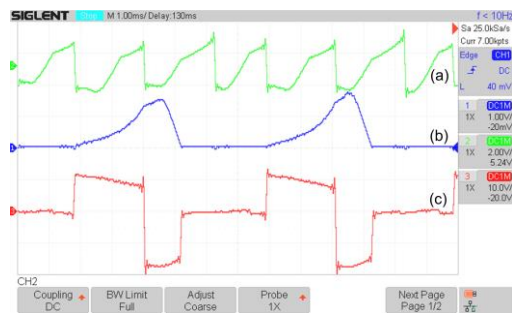
Tabel 3. Parameter *prototype* SRG

Parameter	Nilai	Satuan
Stator	12	-
Rotor	8	-
Resistansi	3.3	Ohm
Induktansi	1.4	mH
Tegangan	12	volt

Untuk mengimplementasikan *prototype* dengan sudut Kondisi I dan Kondisi II akan tetapi motor DC pada alat *prototype* hanya mampu berputar maksimal 1800 RPM.



Gambar 17. Hasil pengujian *prototype* (a) arus sumber DC (b) arus fasa (c) tegangan fasa pada kondisi I dengan kecepatan rotor 1800 RPM



Gambar 19. Hasil pengujian *prototype* (a) arus sumber DC (b) arus fasa (c) tegangan fasa pada kondisi II dengan kecepatan rotor 1800 RPM

Hasil pengujian *prototype* bentuk arus fasa berbeda dengan bentuk arus fasa simulasi. Hal ini dikarenakan kecepatan pada pengujian *prototype* lebih rendah dari nilai kecepatan simulasi.

IV. KESIMPULAN

Hasil simulasi dan pengujian alat *prototype* menunjukkan dengan menggunakan profil induktansi sebagai referensi penentuan sudut penyalaan dan kecepatan putaran rotor SRG dapat menghasilkan daya yang optimal.

Hal ini dibuktikan dengan nilai *back-EMF* yang lebih besar hal itu dapat dilihat hasil keluaran arus sumber DC. Sesuai dengan pengujian bahwa penyalaan sudut fasa lebih optimal ketika kondisi penyalaan sudut fasa mengalami *overlap*. Sudut penyalaan yang optimal adalah $80,5-22^\circ$ dengan kecepatan 6000 RPM. Hasil simulasi yang optimal dapat digunakan sebagai parameter dalam pengimplementasian *prototype*.

REFERENSI

- [1] D. A. Torrey, "Switched reluctance generators and their control," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 1, pp. 3–14, 2002, doi: 10.1109/41.982243.
- [2] P. Kerdtuad and S. Kittiratsatcha, "Study of maximum power conversion of a switched-reluctance generator," *ECTI-CON 2011 - 8th Electr. Eng. Electron. Comput. Telecommun. Inf. Technol. Assoc. Thail. - Conf. 2011*, no. 1, pp. 633–636, 2011, doi: 10.1109/ECTICON.2011.5947919.
- [3] S. Sartori, M. Basu, M. Farrell, and A. Tortella, "Simulation and analysis of switched reluctance generator for renewable energy applications," *Proc. - 2016 51st Int. Univ. Power Eng. Conf. UPEC 2016*, vol. 2017–Janua, pp. 1–6, 2016, doi: 10.1109/UPEC.2016.8114081.
- [4] S. Mapa, R. Maheswari, and G. Bhuvaneshwari, "Maximum Power Point Tracking Using a Novel Current Control Strategy in an SRG Based Variable Speed Wind Energy Conversion System," *India Int. Conf. Power Electron. IICPE*, vol. 2018–Decem, pp. 1–5, 2018, doi: 10.1109/IICPE.2018.8709471.
- [5] M. Korkosz and A. Powrózek, "The influence of control parameters on energy efficiency of switched reluctance generator for vehicle applications," *E3S Web Conf.*, vol. 14, 2017, doi: 10.1051/e3sconf/20171401037.
- [6] M. Amanullah, S. Farooq, and S. Viswanathan, "Modeling and simulation of a biofilter," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 38, no. 7, pp. 2765–2774, 1999, doi: 10.1021/ie9807708.
- [7] S. S. Ahmad and G. Narayanan, "Modeling of Single-Pulse Operated Switched Reluctance Generator and Its Verification," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 56, no. 5, pp. 4966–4976, 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.3005586.
- [8] L. J. Lemes, V. Regis Bernardeli, L. C. Gomes, D. Alves De Andrade, G. P. Viajante, and M. Antonio Arantes De Freitas, "Dynamic Analysis of Self-excited SRG Operating in Open Loop," *2019 IEEE 15th Brazilian Power Electron. Conf. 5th IEEE South. Power Electron. Conf. COBEP/SPEC 2019*, 2019, doi: 10.1109/COBEP/SPEC44138.2019.9065484.
- [9] V. Nasirian, S. Kaboli, and A. Davoudi, "Output power maximization and optimal symmetric freewheeling excitation for switched reluctance generators," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 3, pp. 1031–1042, 2013, doi: 10.1109/TIA.2013.2253438.
- [10] P. C. Buck, B. Fahimi, and P. T. Balsara, "A Phase Current Peak Prediction Technique to Increase the Output Power of Switched Reluctance Generators for Wind Turbines," *2019 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2019*, pp. 5244–5250, 2019, doi: 10.1109/ECCE.2019.8912691.