

Strategi Optimalisasi Kecepatan dan Torka pada SRM Berbasis Deteksi Rotary Encoder dan FPGA

ARIFIN WIBISONO, SLAMET RIYADI, RONALDO WISNU BRILLIANTO

Teknik Elektro Universitas Katolik Soegijapranata Semarang, Indonesia
Email: arifin@unika.ac.id

Received 11 Mei 2022 | *Revised* 10 Juni 2022 | *Accepted* 6 Juli 2022

ABSTRAK

Switched Reluctance Motor (SRM) banyak digunakan pada dunia industri saat ini karena memiliki kelebihan, faktor kelebihan SRM yaitu magnet permanen yang digantikan oleh rotor inti besi dan stator berupa belitan sehingga lebih efisien dalam perawatannya. Tujuan penelitian ini untuk memaksimalkan kinerja SRM dengan meningkatkan kecepatan, meningkatkan kepresisian pada sudut penyalaan, meningkatkan torka, menghaluskan bentuk gelombang tegangan dan arus. Metode yang digunakan adalah perangkat kontrol jenis Field Programmable Gate Array (FPGA), sensor hall effect dan rotary encoder digunakan untuk mendeteksi posisi rotor, informasi posisi rotor digunakan sebagai pedoman penentuan sudut penyalaan oleh FPGA. Hasil pengujian pertama, sensor hall effect menghasilkan kecepatan 1935 RPM, pengujian kedua yang menggunakan rotary encoder menghasilkan performa lebih baik pada kecepatan 2210 RPM. Gelombang osiloskop yang dihasilkan oleh rotary encoder juga menunjukkan hasil lebih presisi dibandingkan dengan hall effect, dapat disimpulkan bahwa strategi optimalisasi SRM lebih optimal menggunakan rotary encoder.

Kata kunci: FPGA, Hall Effect, Rotary Encoder, Switched Reluctance Motor, Torka

ABSTRACT

Switched Reluctance Motor (SRM) is widely used in the industrial world today because it has advantages. The aim of this research is to maximize SRM performance by increasing speed, increasing precision at ignition angle, increasing torque, smoothing voltage and current waveforms. The method used is a Field Programmable Gate Array (FPGA) type control device, a hall effect sensor and a rotary encoder are used to detect the rotor position, the rotor position information is used to determine the ignition angle by the FPGA. The results of the first test, the hall effect sensor produces a speed of 1935 RPM, the second test using a rotary encoder produces better performance at a speed of 2210 RPM. The oscilloscope waveform produced by the rotary encoder also shows more precise results than the hall effect, it can be concluded that the SRM optimization strategy is more optimal using a rotary encoder.

Keywords: FPGA, Hall Effect, Rotary Encoder, Switched Reluctance Motor, Torque

1. PENDAHULUAN

Pada zaman modern ini motor listrik dalam dunia industri mengalami kemajuan yang sangat pesat, banyak industri modern yang menggunakan sistem pengendalian digital (**Dominguez, dkk, 2018**). Tuntutan pasar menjadi salah satu hal yang mempengaruhi sektor industri, untuk melakukan evaluasi berkala guna meningkatkan produksi yang akan berpengaruh ke sektor pendapatan industri tersebut. Industri yang menggunakan motor listrik harus bisa bersaing pada zaman ini dengan kinerja alat-alatnya yang mumpuni, efisien dan maksimal (**Siadatan, dkk, 2018**).

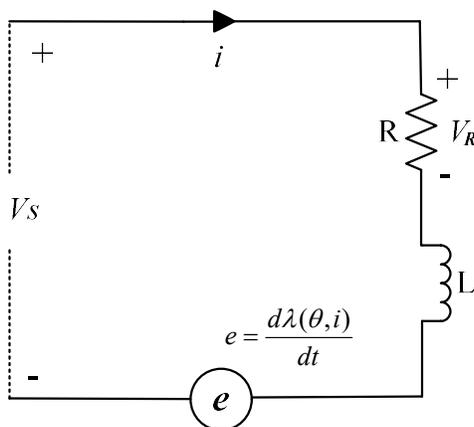
Switched Reluctance Motor (SRM) adalah salah satu jenis dari motor listrik (**Zan, dkk, 2020**), Motor AC dan DC kini banyak digantikan oleh motor listrik jenis SRM (**Gong, dkk, 2017**), motor ini banyak diminati karena lebih sederhana, yaitu tidak mengimplementasikan magnet tetap atau permanen. Rotor terbuat dari inti besi dan statornya berupa belitan, yang tentu saja akan memudahkan dalam perawatan dan meminimalisir biaya belanja komponen (**Allahyari, dkk, 2019**). Saat pengoperasian SRM, posisi rotor harus diketahui sebagai penentuan sudut fasa. Keterbatasan yang ada di sensor *hall effect* disempurnakan menggunakan *rotary encoder* (**Riyadi, 2018**).

Tingkat kepresisian pada *rotary encoder* memiliki akurasi yang lebih tinggi (**Gong, dkk, 2019**). Metode injeksi pulsa digunakan untuk sinkronisasi posisi rotor dengan pulsa *rotary encoder* dan proses komputasi alat ini menggunakan FPGA. Pulsa penyalaan yang tepat dan posisi rotor didapatkan dengan cara injeksi pulsa (**Maksoud, 2020**). Kinerja dan performa SRM yang optimal adalah tujuan dari penelitian ini.

2. METODOLOGI

2.1 Konstruksi dan Prinsip Kerja SRM

Pada penelitian ini menggunakan motor listrik jenis SRM karena mempunyai konstruksi minimalis pada bagian rotor berupa inti besi dan stator berupa belitan (**Lan, dkk, 2021**). Ketika fasa diberi arus, maka stator akan menghasilkan medan elektromagnetik untuk menarik rotor yang ada di dekatnya (**Wardani, dkk, 2021**). Konstruksi SRM yang digunakan pada penelitian ini memiliki 12 stator dan 8 rotor. Dari prinsip kerja SRM yang telah dijabarkan di atas maka didapatkan rangkaian ekuivalen setiap fasanya yang ditunjukkan oleh Gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian Ekuivalen SRM

Rangkaian ekivalen *SRM* yang ditunjukkan oleh Gambar 1, yaitu terdiri dari resistansi (R), induktansi (L), dan *Electromotive Force (EMF)*. Ketika motor berputar belitan pada *SRM* akan menghasilkan *back-EMF* atau tegangan balik yang memiliki polaritas tegangan yang berbanding terbalik dengan sumber. Persamaan (1) menunjukkan tegangan di setiap fasanya.

$$V = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + \omega \cdot i \frac{dL}{d\theta} \quad (1)$$

Di mana V adalah tegangan, R adalah resistansi, I adalah arus fasa, L adalah induktansi, θ adalah posisi rotor dan ω adalah dan kecepatan putaran rotor.

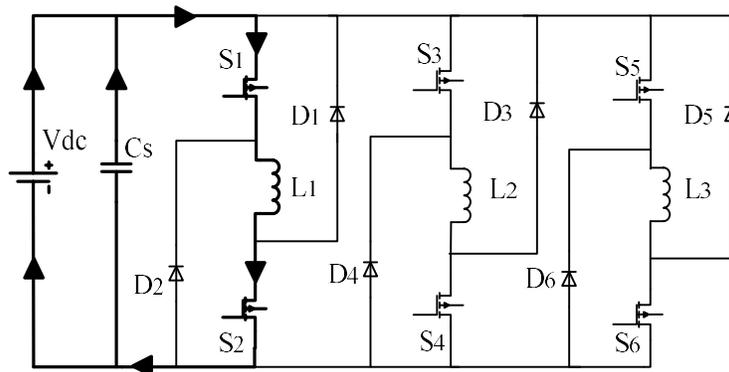
Pada penelitian ini torka dipengaruhi oleh gradien induktansi belitan pada stator. Torka positif didapatkan dengan cara memberikan eksitasi arus saat gradien induktansinya positif, begitu juga dengan hasil dari torka negatif yang didapatkan dengan memberikan eksitasi arus saat gradien induktansinya pada posisi negatif. Persamaan (2) menunjukkan torka yang digunakan.

$$T = \frac{1}{2} i_{ph}^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (2)$$

Di mana T adalah torka, i_{ph} adalah arus fasa, L adalah induktansi, θ adalah posisi rotor.

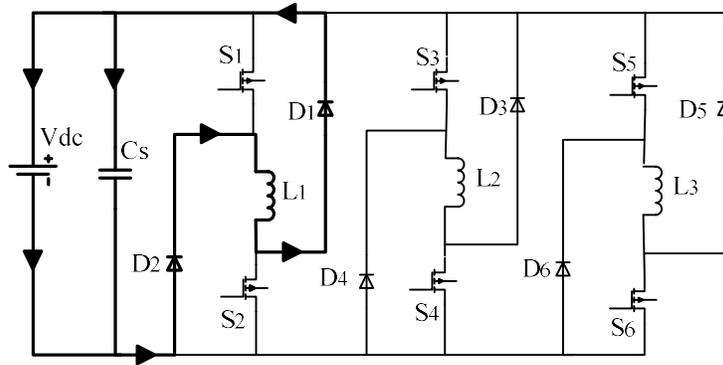
2.2 Pemberian Eksitasi Stator oleh Konverter *Asymmetric*

Konverter *asymmetric* akan memberikan eksitasi pada belitan stator jika *SRM* pada penelitian ini ingin dioperasikan. Mode pada konverter *asymmetric* yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari dua mode kerja yaitu *magnetizing* dan *demagnetizing*. Pada rangkaian ekivalen konverter *asymmetric* mode *magnetizing* ini dijelaskan bahwa sumber dc (V_{dc}), kapasitor (C_s), saklar (S), belitan stator fasa (L) dan dioda (D). Mode *magnetizing* adalah proses eksitasi yang diberikan pada belitan fasa dilakukan dengan menyalakan saklar (S_1) dan (S_2) secara bersamaan (Gan, dkk, 2018). Mode operasi *magnetizing* ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Proses *Magnetizing* pada Koverter *Asymmetric*

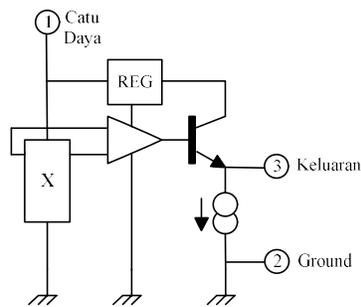
Mode operasi berikutnya adalah *Demagnetizing*, Pada rangkaian ekivalen konverter *asymmetric* mode *demagnetizing* ini dijelaskan bahwa sumber dc (V_{dc}), kapasitor (C_s), saklar (S), belitan stator fasa (L) dan dioda (D). Mode ini bekerja saat saklar satu (S_1) dan saklar dua (S_2) dimatikan dengan cara bersamaan, energi akan menuju ke beban (L_1) dan mengalir melalui dioda (D_1 & D_2) dari belitan pada stator. Mode operasi *demagnetizing* dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Proses *Demagnetizing* pada Konverter *Asymmetric*

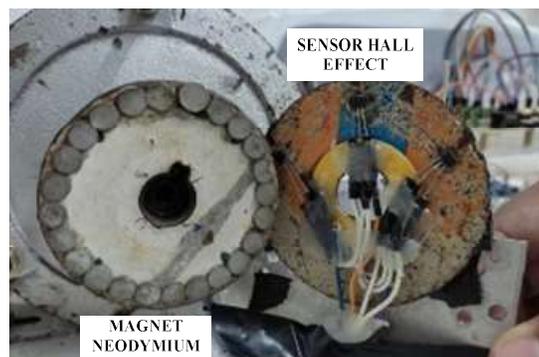
2.3 Deteksi Posisi Rotor dengan Sensor *Hall Effect*

Metode untuk mengetahui posisi rotor terhadap stator yaitu dengan sensor *hall effect* sebagai penentu interval eksitasi *SRM*. Sensor *hall effect* memiliki cara kerja dengan mengubah informasi magnetik menjadi sinyal listrik, sensor ini tergolong komponen jenis transduser (Paun, dkk, 2013). Sensor *hall effect* memiliki rangkaian seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Sensor *Hall Effect*

Sensor jenis ini mulai ditinggalkan karena memiliki kepresisian yang kurang maksimal. Konstruksi sensor yang diterapkan yaitu dengan menempelkan magnet jenis *Neodymium* sebanyak 24 buah ke piringan yang terhubung dengan *shaft* motor dan menggunakan tiga buah sensor *hall effect* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.

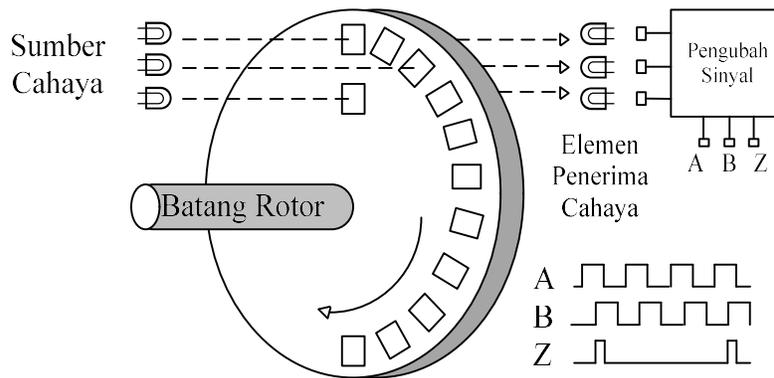


Gambar 5. Implementasi Sensor *Hall Effect*

2.4 Deteksi Posisi Rotor dengan *Rotary Encoder*

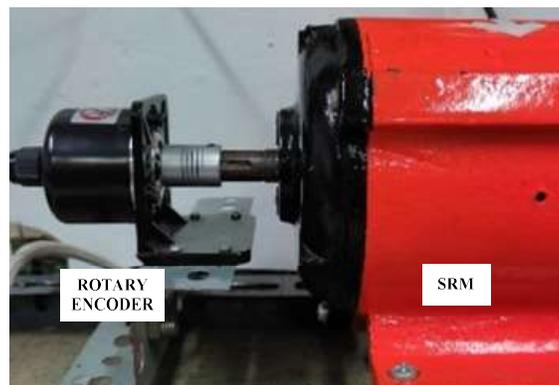
Rotary encoder pada penelitian ini menggunakan tipe *incremental encoder* yang memiliki cara kerja *Single-Ended*. Deteksi posisi dan gerakan adalah tujuan diciptakannya *rotary encoder*. sensor untuk mendapatkan serial pulsa adalah sensor optik (Gong, dkk, 2019). Kode digital yang dihasilkan akan menjadi sebuah informasi untuk diolah dan diteruskan oleh rangkain kendali.

Motor listrik yang digunakan saat ini harus mampu dioperasikan seefisien dan semaksimal mungkin, kepresisian adalah salah satu kunci untuk meningkatkan efisiensi kinerja *SRM*. Teknologi modern yang digunakan adalah *rotary encoder* untuk menggantikan sensor *hall effect*. Susunan pada *rotary encoder* merupakan sebuah piringan yang berlubang. *Photo-transistor* akan mendeteksi cahaya LED yang diletakkan pada salah satu sisi piringan lainnya. Piringan dikopel dengan poros atau *shaft* motor yang berputar untuk dapat terdeteksi posisinya, sehingga saat *shaft* dari motor telah berputar, piringan pada *rotary encoder* akan ikut berputar. Cahaya yang dipancarkan LED bisa menjangkau *photo-transistor* melewati lubang pada piringan, lalu *photo-transistor* menjadi suatu pulsa gelombang persegi. Konstruksi dari *rotary encoder* ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Incremental Rotary Encoder

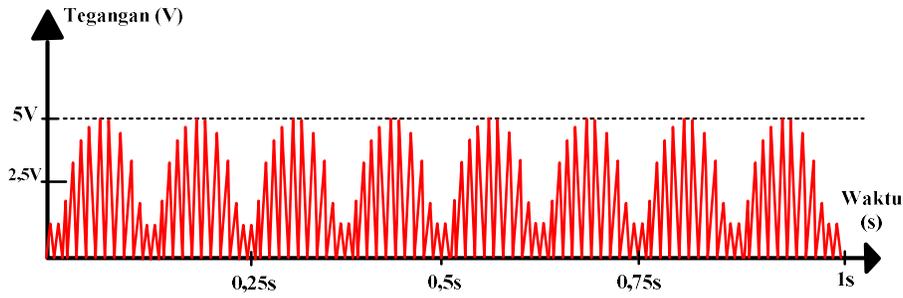
Gambar 7 adalah implementasi alat deteksi *rotary encoder* yang dikopel secara sejajar pada *shaft SRM*.



Gambar 7. Implementasi Rotary Encoder pada SRM

2.5 Impuls Arus untuk Mendeteksi Posisi Rotor dan Profil Induktansi

Hasil yang ditunjukkan pada Gambar 8 adalah impuls arus *SRM*, injeksi pulsa adalah metode yang digunakan untuk mengetahui profil induktansinya dengan pemberian *Pulse Width Modulation (PWM)* yang memiliki frekuensi tinggi (Zhang & Liu, 2020). Frekuensi 10 kHz dan tegangan 5 Volt diberikan pada masing-masing jalur fasa motor untuk deteksi posisi rotor dan stator yang dinamakan metode injeksi pulsa. Profil induktansi akan menghasilkan nilai yang berbanding terbalik dibandingkan impuls arus (Cai, dkk, 2017).



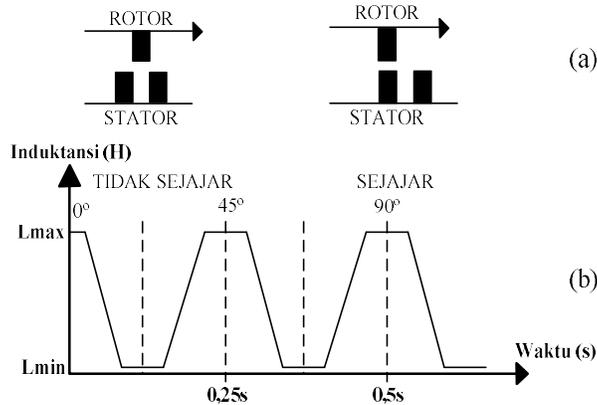
Gambar 8. Hasil Impuls Arus *SRM*

Nilai impuls arus dihasilkan dari Persamaan (3) dan (4).

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

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

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

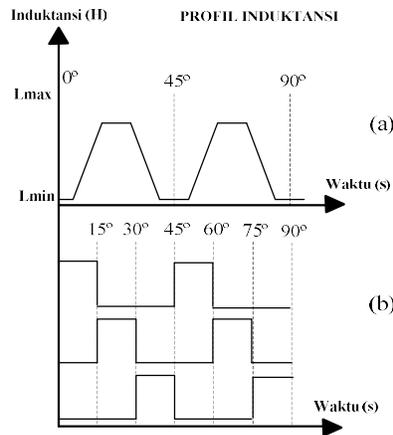


Gambar 9. (a) Posisi Rotor terhadap Stator (b) Profil Induktansi *SRM*

Gambar 9 menampilkan posisi rotor terhadap stator *SRM* (a), profil induktansi (b). *SRM* bekerja saat induktansi naik atau positif di mana rotor yang tidak sejajar (*Unaligned*) akan menuju stator menjadi posisi sejajar (*Aligned*) (Jindal & Ragavan, 2018) (Yan, dkk, 2019). Berdasarkan jumlah rotor pada *SRM* yang digunakan, maka dihasilkan delapan buah profil induktansi dalam satu putarannya, 360 derajat mekanik dibagi jumlah stator (delapan) akan menghasilkan 45 derajat mekanik pada setiap profil induktansinya.

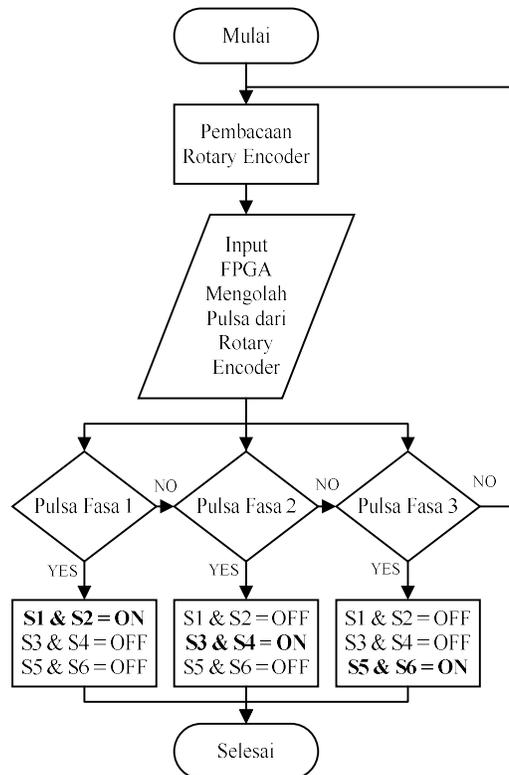
2.6 Penentuan Sudut Penyalaan pada *SRM*

Sudut penyalaan pada fasa, disajikan pada Gambar 10. Daya yang dikeluarkan oleh *SRM* didapatkan dari tepat atau tidaknya sudut penyalaan yang diberikan (**Maksoud, 2020**).



Gambar 10. (a) Profil Induktansi (b) Pulsa Penyalaan Fasa Arus

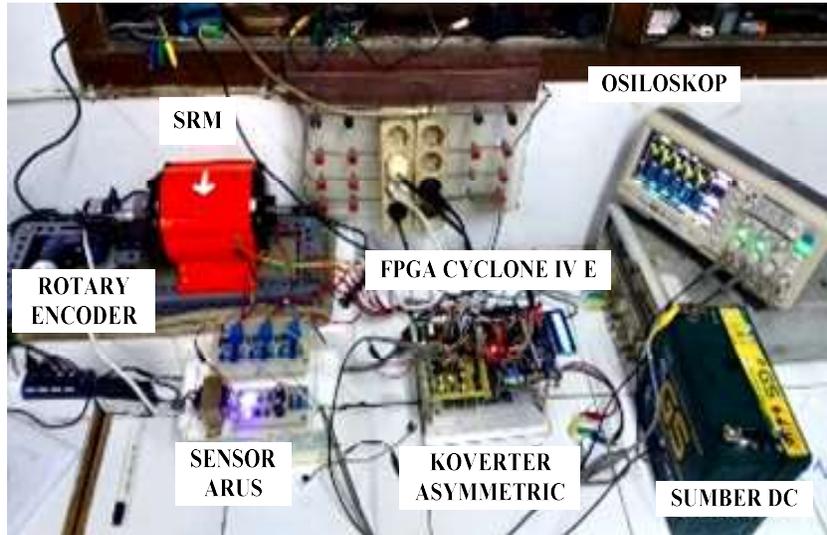
Selama magnetisasi energi yang dihasilkan oleh sumber *DC* akan menghasilkan fluksi magnet, $\theta_{on} \leq \theta \leq \theta_{off}$ (**Dexter, dkk, 2018**). *SRM* pada penelitian ini menggunakan delapan rotor, maka nilai induktansi maksimum akan terpisah pada 45 derajat mekanik dan setiap sudut penyalaan fasanya bergeser sebesar 15 derajat dengan fasa lainnya. Untuk lebih memperjelas sistem pada *prototype* ini, ditunjukkan pada *flowchart* program pada Gambar 11.



Gambar 11. Flowchart Program Verilog HDL FPGA

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Rangkaian *prototype* penggerak *SRM* ditunjukkan pada Gambar 12, dari metode penelitian di atas maka dilakukan perakitan dan pengujian terhadap *prototype* penggerak *SRM* tiga fasa, kontrol *FPGA CYCLONE VI E*, *rotary encoder* dan konverter *asymmetric*.



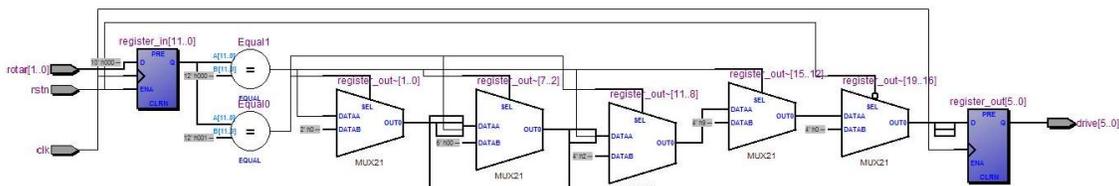
Gambar 12. Rangkaian *Prototype* Penggerak *SRM*

Parameter *SRM* disajikan pada Tabel 1, yang merupakan parameter pengujian alat dan telah diimplementasikan untuk membuktikan metode yang diusulkan dapat bekerja.

Tabel 1. Parameter *Switched Reluctance Motor*

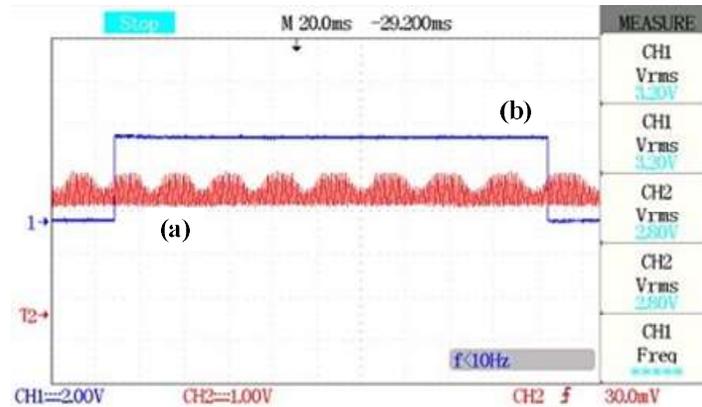
Parameter	Nilai	Satuan
Jumlah Stator	12	Blok belitan
Jumlah Rotor	8	Kutub
Resistansi	3,3	Ohm
Induktansi	1,4	mh
Tegangan	12	Volt

Register Transfer Logic (RTL) pada kontrol *FPGA* ditunjukkan pada Gambar 13. Kontrol *FPGA Cyclone VI E* digunakan untuk menghasilkan nilai sudut penyalaan dalam pemberian eksitasi stator. Sinyal *rotary encoder* masuk ke komparator yang kemudian diproses oleh sistem *multiplexer*, keluaran *multiplexer* akan menentukan konfigurasi pensaklaran pada konverter *asymmetric*.



Gambar 13. Register Transfer Logic pada *FPGA*

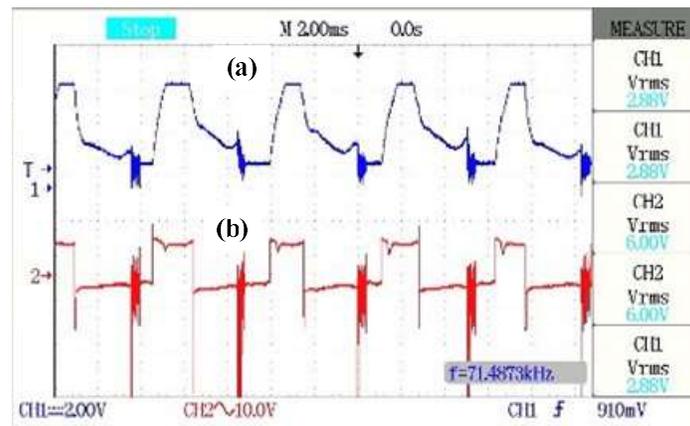
Hasil gelombang yang dihasilkan oleh pulsa pin Z *rotary encoder* dan impuls arus fasa ditunjukkan oleh Gambar 14. Posisi rotor dan profil induktansinya dapat diketahui dari gelombang impuls arus yang dihasilkan.



Gambar 14. Gelombang (a) Impuls Arus (b) Pin Z Rotary Encoder

Posisi pulsa penyalaan pada *SRM* dapat diputuskan setelah mengetahui posisi rotornya, sehingga kinerja motor dapat bekerja secara maksimal. Berikut adalah perbandingan hasil arus, tegangan dan kecepatan *SRM* yang menggunakan sensor *hall effect* dan *rotary encoder*.

Pengujian pertama yang dilakukan bertujuan untuk mendapatkan hasil gelombang arus, gelombang tegangan dan kecepatan pada *SRM* yang menggunakan deteksi sensor *hall effect*. Hasil gelombang osiloskop dari pengujian *SRM* yang menggunakan metode sensor *hall effect* yaitu, berupa hasil gelombang tegangan dan arus seperti ditunjukkan pada Gambar 15 yang menghasilkan kecepatan 1935 RPM yang ditunjukkan pada Gambar 16.

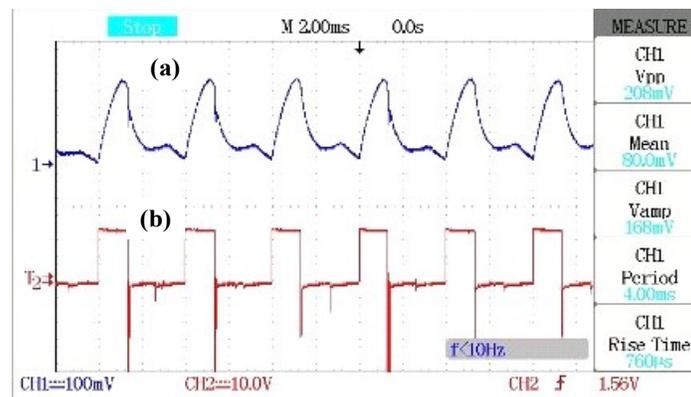


Gambar 15. Hasil Gelombang (a) Arus Fasa (b) Tegangan pada Fasa SRM Menggunakan Deteksi Sensor Hall Effect



Gambar 16. Hasil Pengukuran Kecepatan *SRM* dengan Deteksi Sensor *Hall Effect*

Pengujian kedua yang dilakukan adalah mendapatkan hasil gelombang dan kecepatan pada *SRM* yang menggunakan metode *rotary encoder*. Gambar 17 adalah hasil gelombang osiloskop tegangan dan arus dari pengujian *prototype SRM* yang menggunakan metode *rotary encoder*.



Gambar 17. Hasil Gelombang (a) Arus Fasa (b) Tegangan pada Fasa *SRM* Menggunakan Deteksi *Rotary Encoder*

Kecepatan yang dihasilkan dari pengujian *prototype SRM* yang menggunakan metode *rotary encoder* adalah 2210 RPM yang ditunjukkan pada Gambar 18.



Gambar 18. Hasil Pengukuran Kecepatan *SRM* dengan Deteksi *Rotary Encoder*

4. KESIMPULAN

Hasil pengujian pertama pada *prototype* penggerak *SRM* dengan menggunakan *hall effect* memiliki kelemahan, deteksi sudut yang terbatas hanya terbaca pada sudut tertentu, hal tersebut mempengaruhi hasil pulsa penyalaan dan kinerja motor. Kecepatan yang dihasilkan oleh deteksi *hall effect* yaitu 1935 RPM, menghasilkan bentuk arus juga tegangan yang tidak halus dan tidak presisi sehingga torka yang dihasilkan dan kinerja *SRM* tidak bisa optimal. Kecepatan yang dihasilkan oleh deteksi *rotary encoder* yaitu 2210 RPM yang artinya memiliki kecepatan lebih tinggi karena *rotary encoder* bisa mendeteksi sudut motor lebih halus, maka gelombang arus dan tegangan yang dihasilkan juga lebih halus, hal tersebut dapat meningkatkan torka motor dan kinerja *SRM* lebih optimal. Berdasarkan keunggulan dari *rotary encoder* di atas, penggunaan *rotary encoder* merupakan strategi yang tepat dalam optimalisasi kinerja *SRM* dibandingkan menggunakan sensor *hall effect*. *FPGA* yang bekerja secara paralel dalam mengolah program menghasilkan sudut penyalaan yang presisi, hal tersebut juga berpengaruh dalam optimalisasi kinerja *SRM*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh skema Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi (PTUPT) tahun 2021 dengan nomor kontrak 312/SP2H/LT/DRPM/2021.

DAFTAR RUJUKAN

- Allahyari, A., Mousavi, S., & Nazarpour, D. (2019). Analysis of Different Rotor and Stator Structures in Order to Optimize Two-Phase Switch Reluctance Motor Torque Characteristics. *2019 10th International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference, PEDSTC 2019*, (pp. 28–33).
<https://doi.org/10.1109/PEDSTC.2019.8697296>
- Cai, J., Lu, L., Liu, Z., Jia, H., Zhao, X., & Xu, F. (2017). An inductive position sensor with switched reluctance motor structure. *2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2017*, (pp. 12–15).
<https://doi.org/10.1109/ICEMS.2017.8056495>
- Dexter, J., Huang, L., Zhu, Z. Q., & Vinamata, X. (2018). Comparison of Frequency and Time Domain Based Current Profiling Techniques for Acoustic Noise Reduction in Switched Reluctance Machine. *ICEMS 2018 - 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems*, (pp. 1908–1913).
<https://doi.org/10.23919/ICEMS.2018.8549123>
- Dominguez-Navarro, J. A., Artal-Sevil, J. S., Pascual, H. A., & Bernal-Agustin, J. L. (2018). Fuzzy-logic strategy control for switched reluctance machine. *2018 13th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies, EVER 2018*, (pp. 1–5).
<https://doi.org/10.1109/EVER.2018.8362403>

- Gan, C., Wu, J., Sun, Q., Kong, W., Li, H., & Hu, Y. (2018). A Review on Machine Topologies and Control Techniques for Low-Noise Switched Reluctance Motors in Electric Vehicle Applications. *IEEE Access*, 6, 31430–31443.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2837111>
- Gong, C., Li, S., Habetler, T., Restrepo, J., & Soderholm, B. (2019). Direct position control for ultrahigh-speed switched-reluctance machines based on low-cost nonintrusive reflective sensors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(1), 480–489.
<https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2868037>
- Gong, C., Member, S., Habetler, T., Restrepo, J., & Soderholm, B. (2017). *Direct Position Control for Ultra-high Speed Switched Reluctance Machines Based on Non-contact Optical Sensors*.
- Jindal, A., & Ragavan, K. (2018). Sensorless Control of Switched Reluctance Motor Based on Trapezoidal Inductance Profile. *Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, PEDES 2018*, 2, 1–6.
<https://doi.org/10.1109/PEDES.2018.8707832>
- Lan, Y., Benomar, Y., Deepak, K., Aksoz, A., Baghdadi, M. El, Bostanci, E., & Hegazy, O. (2021). Switched reluctance motors and drive systems for electric vehicle powertrains: State of the art analysis and future trends. *Energies*, 14(8).
<https://doi.org/10.3390/en14082079>
- Maksoud, H. A. (2020). Torque Ripple Minimization of a Switched Reluctance Motor using a Torque Sharing Function based on the Overlap Control Technique. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 10(2), 5371–5376.
<https://doi.org/10.48084/etasr.3389>
- Paun, M. A., Sallese, J. M., & Kayal, M. (2013). Hall effect sensors design, integration and behavior analysis. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 2(1), 85–97.
<https://doi.org/10.3390/jsan2010085>
- Riyadi, S. (2018). *Control Strategy for Switched Reluctance Motor With Rotary Encoder Based Rotor Position*. 261–270. <https://doi.org/10.15598/aeee.v16i3>.
- Siadatan, A., Fatahi, N., & Sedaghat, M. (2018). Optimum Designed Multilayer Switched Reluctance Motors for use in Electric Vehicles to Increase Efficiency. *SPEEDAM 2018 - Proceedings: International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 304–308. <https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2018.8445215>
- Wardani, A. D., Riyadi, S., Pratomo, L. H., & Setiawan, F. B. (2021). *Peningkatan Efisiensi Kinerja Switched Reluctance Motor dengan Metode Pergeseran Sudut Fasa*. 42(3),

253–259. <https://doi.org/10.14710/teknik.v42i3>.

- Yan, N., Cao, X., & Deng, Z. (2019). Direct torque control for switched reluctance motor to obtain high torque-ampere ratio. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *66*(7), 5144–5152. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2870355>
- Zan, X., Jiang, Z., Ni, K., Zhang, W., Gong, Y., & Wu, N. (2020). Modular battery management for SRM drives in hybrid vehicles based on a novel modular converter. *IEEE Access*, *8*, 136296–136306. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3011451>
- Zhang, L., & Liu, C. (2020). A Sensorless Techniques for Switched Reluctance Motor Considering Mutual Inductances. *Proceedings of 2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference, ITOEC 2020, Itoec*, (pp. 1425–1428). <https://doi.org/10.1109/ITOEC49072.2020.9141636>