

# Metode Pergeseran Sudut Fasa *Switched Reluctance Motor* menggunakan *Rotary Encoder* dan *Field Programmable Gate Array*

Arifin Wibisono<sup>1</sup>, Slamet Riyadi<sup>2</sup>, dan Guntur Sumartin<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> 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: arifin@unika.ac.id

**Abstrak**—Penggerak listrik banyak digunakan pada aplikasi industri maupun kendaraan listrik. *Switched Reluctance Motor (SRM)* merupakan salah satu dalam perkembangan kendaraan listrik berbasis digital karena memiliki banyak kelebihan, seperti memiliki rasio torka yang tinggi serta konstruksi sederhana berupa inti besi pada rotor dan belitan stator. Dalam mengoperasikan *SRM* dibutuhkan informasi posisi rotor. *Rotary encoder* digunakan sebagai alat pendeteksi posisi rotor karena memiliki tingkat kepresisian yang tinggi serta posisi sudut penyalan pada rotor yang dapat diatur guna mendapatkan torka yang optimal dalam kinerja *SRM*. Pada penelitian ini, guna meningkatkan kecepatan putar pada *SRM* dapat menggunakan metode pergeseran sudut rotor yang dikonversi menjadi nilai pulsa penyalan. Nilai pulsa penyalan tersebut digunakan sebagai data masukan *Field Programmable Gate Arrays (FPGA)* sebagai kontrol digital. Hasil pengolahan data dari *FPGA* diteruskan menuju konverter *asymmetric* untuk memberikan arus eksitasi pada stator. Guna mendukung penelitian ini maka dilakukan uji laboratorium sebagai validasi penelitian. Hasil pengujian menunjukkan kondisi yang optimal jika nilai pulsa penyalan berada pada saat induktansi mulai meningkat

**Kata kunci:** *FPGA, Konverter asymmetric, Rotary encoder, SRM, Sudut fasa*

**Abstract**—*Electric drives are widely used in industrial applications and electric vehicles. Switched Reluctance Motor (SRM) is one in the development of digital-based electric vehicles because it has many advantages, including having a high torque ratio and a simple construction in the form of an iron core in the rotor and stator winding. In operating the SRM required information on the rotor position. Rotary encoder is used as a rotor position detection tool because it has a high level of precision and the ignition angle position on the rotor can be adjusted to get optimal torque in SRM performance. In this study, in order to increase the rotational speed of the SRM, it is possible to use the rotor angle shift method which is converted to the ignition pulse value. The value of the ignition pulse is used as input data for Field Programmable Gate Arrays (FPGA) as a digital control. The results of data processing from the FPGA are forwarded to the asymmetric converter to provide current excitation to the stator. In order to support this research, laboratory tests were carried out as research validation. The test results show optimal conditions if the value of the ignition pulse is at the time the inductance begins to increase*

**Keywords:** *FPGA. Converter asymmetric. Rotary encoder. SRM. Phase angle*

## I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi motor listrik berbasis digital mengalami kemajuan yang pesat, karena tidak menimbulkan asap pembakaran seperti motor bakar yang dapat menyebabkan polusi udara [1]. Dibandingkan dengan motor listrik yang lainnya, *SRM* memiliki keunggulan rasio torka yang tinggi serta konstruksi yang sederhana berupa rotor yang tidak memiliki belitan atau magnet permanen, sehingga menjadikannya lebih ekonomis dalam segi perawatan [2].

*SRM* dapat dikontrol dengan beberapa metode kontrol loop tertutup seperti, kontrol arus, kontrol tegangan, dan kontrol kecepatan, yang digunakan untuk meminimalkan riak torka pada *SRM*. Metode yang digunakan untuk

meminimalkan riak pada torka dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain arus referensi, tegangan, kecepatan, serta penentuan sudut fasa ( $\theta_{on}$  dan  $\theta_{off}$ ) pada eksitasi stator. Proses penentuan sudut fasa dengan cara membuka ( $\theta_{on}$ ) dan menutup sudut fasa ( $\theta_{off}$ ) yang benar dapat menghasilkan torka yang besar.

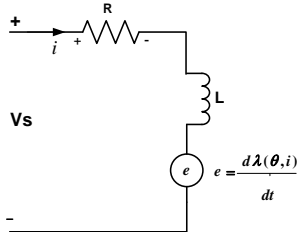
Pengoperasian *SRM* membutuhkan informasi posisi rotor. *Rotary encoder* digunakan dalam proses mendeteksi posisi rotor pada *SRM* [3]. Alat ini memiliki tingkat kepresisian yang tinggi serta sudut penyalan yang dapat disesuaikan. Proses menentukan sudut penyalan secara tepat dapat mempengaruhi kinerja *SRM* [4]. Kinerja *SRM* yang baik adalah menghasilkan torka positif yang lebih besar dari torka negatif. Pada penelitian ini telah dirancang

proses menentukan sudut penyalan menggunakan *rotary encoder* sebagai deteksi posisi rotor serta *FPGA* sebagai kontrol digital agar dapat menghasilkan kecepatan putar yang optimum [5]. Untuk mendukung penelitian ini maka dilakukan validasi pengujian laboratorium.

II. METODE

A. Karakteristik *Switched Reluctance Motor*

*Switched Reluctance Motor (SRM)* merupakan motor listrik yang dapat dioperasikan pada kecepatan serta temperatur yang tinggi, selain itu *SRM* juga memiliki torka awal yang besar sehingga memiliki tingkat efisiensi yang lebih jika dibandingkan dengan motor listrik lainnya [6]. Pada konstruksi *SRM* jika belitan stator dialiri arus maka akan menghasilkan *back-emf (electromotive force)* [7].

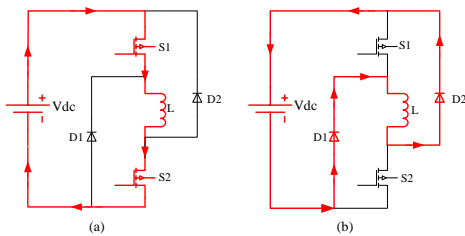


Gambar 1. Rangkaian ekuivalen *SRM*

Rangkaian ekuivalen yang ditunjukkan pada Gambar 1 terdiri dari resistansi (*R*), induktansi (*L*), dan *Electromotive force (EMF)* [8]. Belitan stator pada *SRM* akan menghasilkan *back-EMF* atau tegangan balik yang memiliki polaritas tegangan yang berbanding terbalik dengan sumber. Persamaan tegangan *SRM* pada setiap fasa dapat disajikan pada (1).

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

di mana *V* tegangan, *i* arus fasa, *R* hambatan, *L* induktansi,  $\theta$  posisi rotor, dan  $\omega$  kecepatan motor.



Gambar 2. (a) Proses magnetizing (b) Proses demagnetizing

Konverter *asymmetric* digunakan dalam pengoperasian *SRM* untuk memberi arus eksitasi pada stator *SRM*. Pengoperasian *SRM* dengan konverter *asymmetric* dapat menggunakan mode operasi *magnetizing* dan *demagnetizing*. Mode operasi *magnetizing* merupakan proses pemberian arus eksitasi pada belitan stator dengan cara mengaktifkan saklar *S1* dan *S2* secara bersamaan sehingga menghasilkan magnet pada stator [9]. Mode operasi *demagnetizing* terjadi setelah proses *magnetizing* pada belitan stator. Proses *demagnetizing* dilakukan dengan mematikan saklar *S1* dan *S2* secara bersamaan sehingga arus akan tersimpan pada belitan stator yang akan mengalir

kembali melalui dioda *D1* dan *D2*. Keseluruhan mode operasi ditunjukkan pada Gambar 2.

B. *Rotary encoder*

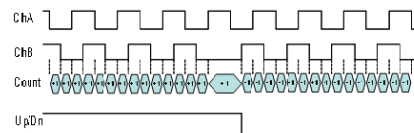
*Rotary encoder* merupakan komponen elektronik yang digunakan sebagai pendeteksi posisi rotor dalam pengoperasian *SRM*. Alat ini umumnya ditempatkan pada poros motor yang berputar, sehingga dapat menimbulkan banyak *noise*, kemudian bagian *output* diumpankan ke *low-pass filter* [10]. Jika *low-pass filter* digunakan, frekuensi *cut-off* yang digunakan umumnya ditentukan oleh jumlah lubang yang ada pada piringan dan bergantung pada seberapa cepat piringan tersebut berputar, hal tersebut dinyatakan dengan persamaan (2).

$$F_c = \frac{s_w n}{60} \tag{2}$$

Dimana *F<sub>c</sub>* merupakan frekuensi *cut-off filter*, *s<sub>w</sub>* adalah kecepatan piringan, serta *n* adalah jumlah lubang di piringan.

C. *Field Programmable Gate Array*

*Field Programmable Gate Array (FPGA)* adalah perangkat semikonduktor yang berdasarkan matriks blok logika yang dapat dikonfigurasi terhubung melalui interkoneksi yang dapat diprogram [11]. Perangkat *FPGA* dapat diprogram/dikonfigurasi untuk melakukan perancang menggunakan aplikasi yang dijelaskan dengan menggunakan bahasa *Verilog HDL (Hardware Description Language)* dengan alat pemrograman desain lainnya seperti simulator yang terdapat pada berbagai macam platform [12].



Gambar 3. *Quadrature decoder*

*Quadrature Decoder* merupakan bagian yang terdapat dalam *rotary encoder* yang berfungsi sebagai penghubung menuju *FPGA*. Sinyal akan dibaca dan diubah menjadi hitungan numerik dari pulsa posisi. Hitungan akan bertambah dalam satu arah dan berkurang dalam arah terbalik ketika poros berputar. *Quadrature Decoder* menentukan arah rotasi dengan melihat dua sinyal fasa yang masuk dan menghasilkan *clock* yang sesuai sebagai penghitung posisi. Dalam mode  $\times 2$ , impuls di tepi akan naik dan sinyal fasa A akan turun serta dalam mode  $\times 4$ , pulsa *clock* dihasilkan disetiap tepi fasa A dan fasa B. Penghitung posisi dapat direset secara eksternal atau dengan register pencacah maksimum yang diprogram.

Metode *Digital Pulse Width Modulation (DPWM)* digunakan untuk menggabungkan blok khusus *Delay locked-loop (DLL)* yang dapat mengkalikan frekuensi *clock* serta blok sinkron yang merupakan penghitung pencacah yang mampu bekerja dalam frekuensi tinggi. Blok ini bekerja dengan menghitung pencacah sesuai perintah siklus dan akan mematkan serta menghitung dari awal lagi jika perintah telah melebihi siklusnya [13]. Persamaan blok sinkron dinyatakan dalam:

$$resolution = \frac{F_{clk}}{F_{sw}} \quad (3)$$

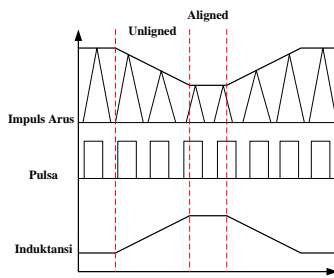
Dimana  $F_{clk}$  adalah frekuensi *clock* dan  $F_{sw}$  adalah frekuensi *switching*.

#### D. Proses Injeksi Pulsa

Untuk mengetahui posisi rotor dengan lebih mudah dapat dilakukan dengan melihat karakteristik induktansi dari *SRM* [14]. Injeksi pulsa merupakan proses untuk menentukan kurva induktansi dengan menerapkan modulasi lebar pulsa frekuensi tinggi ke salah satu belitan fasa. Pulsa arus menghasilkan nilai yang berbanding terbalik dengan kurva induktansi. Impuls arus dapat dinyatakan dengan persamaan 4 sebagai berikut:

$$i = \frac{U}{L} \Delta t \quad (4)$$

Dimana  $i$  merupakan impuls arus,  $U$  merupakan tegangan pulsa,  $L$  merupakan induktansi dan  $\Delta t$  sebagai waktu yang digunakan untuk memberikan pulsa [15]. Proses impuls arus ditampilkan pada Gambar 4.

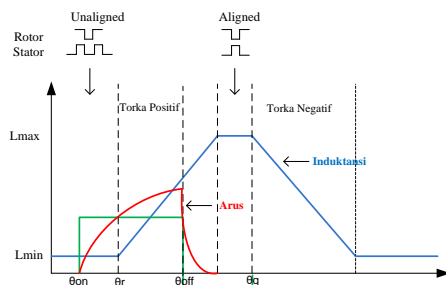


Gambar 4. Proses injeksi pulsa

#### E. Pergeseran Sudut Fasa Pada Arus

Pergeseran sudut penyalan pada fasa berpengaruh terhadap kinerja *SRM*. Arus fasa dan bentuk gelombang tegangan *SRM* yang diletakkan saat posisi rotor mendekati stator atau induktansi minimum menuju maksimum disajikan pada Gambar 5.

Saat sudut penyalan ( $\theta_{on}$ ) berada di interval induktansi minimum, arus fasa akan naik hingga posisi rotor mendekati stator ( $\theta_r$ ). Posisi ini menghasilkan torka positif dan induktansi menuju nilai maksimum hingga sudut fasa dimatikan ( $\theta_{off}$ ). Saat sudut fasa dimatikan ( $\theta_{off}$ ) arus yang tersimpan akan terus menurun sebelum memasuki wilayah torka negatif ( $\theta_q$ ) atau induktansi menuju nilai minimum sehingga menghasilkan tegangan negatif [16].



Gambar 5. Keluaran gelombang tegangan dan arus fasa pada penyalan sudut fasa

Jika penyalan sudut fasa berada pada kemiringan induktansi yang meningkat, maka akan menghasilkan torka positif dan arus fasa akan turun. Sebaliknya jika penyalan sudut fasa berada pada kemiringan induktansi menurun, maka akan menghasilkan torka negatif dan arus fasa akan naik.

#### F. Penyalan Sudut Fasa Menggunakan *Rotary encoder*

Penyalan sudut fasa dapat diketahui dengan induktansi *SRM* saat posisi stator dan rotor *unaligned* (tidak sejajar) maka dalam kondisi ini *SRM* mengalami induktansi minimum [17]. Ketika posisi rotor mendekati stator, maka induktansi *SRM* mulai meningkat hingga posisi rotor dan stator *aligned* (sejajar). Induktansi akan menurun saat rotor mulai menjauh dari stator.

Dalam penentuan sudut fasa *SRM* dibutuhkan *rotary encoder* sebagai pendeteksi posisi rotor. Dalam satu putaran *rotary encoder* menghasilkan 2500 pulsa, persamaan untuk menentukan pulsa pada *rotary encoder* disajikan pada persamaan 5.

$$N_p = \frac{J_p \theta_{on}}{360} \quad (5)$$

di mana,

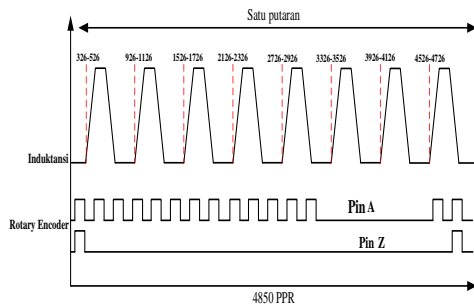
- $N_p$  = Nilai pulsa
- $J_p$  = Jumlah pulsa
- $\theta_{on}$  = Nilai sudut penyalan
- 360 = Sudut mekanik dalam satu putaran

Jumlah pulsa yang dihasilkan *rotary encoder* dalam satu putaran adalah 2500 pulsa serta sudut mekanik dalam satu putaran bernilai  $360^\circ$ . Hasil deteksi dari *rotary encoder* berguna sebagai data masukan untuk diolah oleh *FPGA* yang disajikan pada Tabel 1. Pulsa yang telah diolah oleh *FPGA* digunakan untuk mengatur pensaklaran sekuensial pada konverter *asymmetric* dalam pemberian eksitasi stator *SRM* dimana setiap satu pulsa pin-A terbaca dua kali oleh *FPGA*, karena *Delay locked-loop (DLL)* yang dapat mengalikan frekuensi *clock*.

Tabel 1. Perhitungan sudut menggunakan *rotary encoder*

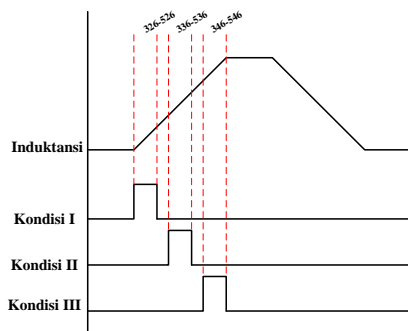
Sudut <sup>o</sup>	Pulsa	Fasa A	Fasa B	Fasa C
5-20	326-526	ON	OFF	OFF
20-35	526-726	OFF	ON	OFF
35-50	726-926	OFF	OFF	ON
50-65	926-1126	ON	OFF	OFF
65-80	1126-1326	OFF	ON	OFF
80-95	1326-1526	OFF	OFF	ON
95-110	1526-1736	ON	OFF	OFF
110-125	1726-1926	OFF	ON	OFF
125-140	1926-2126	OFF	OFF	ON
140-155	2126-2326	ON	OFF	OFF
155-170	2326-2526	OFF	ON	OFF
170-185	2526-2726	OFF	OFF	ON
185-200	2726-2926	ON	OFF	OFF
200-215	2926-3126	OFF	ON	OFF
215-230	3126-3326	OFF	OFF	ON
230-245	3326-3526	ON	OFF	OFF
245-260	3526-3726	OFF	ON	OFF

260-275	3726-3926	OFF	OFF	ON
275-290	3926-4126	ON	OFF	OFF
290-305	4126-4326	OFF	ON	OFF
305-320	4326-4526	OFF	OFF	ON
320-335	4526-4726	ON	OFF	OFF
335-350	4726-126	OFF	ON	OFF
350-5	126-326	OFF	OFF	ON



Gambar 6. Proses pendeteksian sudut fasa dengan rotary encoder dalam satu putaran

Dalam Gambar 6 penentuan sudut fasa menggunakan dua sinyal keluaran pada rotary encoder yaitu Pin-A yang menghasilkan 4850 pulsa setiap satu putaran dan Pin-Z menghasilkan satu pulsa setiap satu putaran. SRM yang digunakan memiliki delapan rotor, sehingga dalam satu putaran menghasilkan delapan kali nilai induktansi maksimum. Setiap nilai induktansi maksimum terpisah pada 45° mekanik atau 600 pulsa rotary encoder (4850 dibagi jumlah kutub rotor). Pada setiap awal pulsa penyalan SRM saling bergeser sebesar sepuluh pulsa yang ditunjukkan oleh Gambar 7

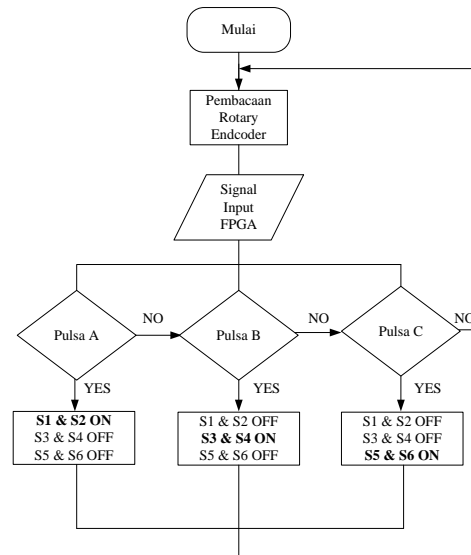


Gambar 7. Start penyalan ketiga kondisi

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan metode penelitian, maka dilakukan pengujian laboratorium. Berikut ini merupakan cara kerja pada SRM akan disajikan pada Gambar 8. Keseluruhan proses penggunaan rotary encoder untuk menentukan sudut fasa SRM ditunjukkan pada flowchart pada Gambar 6. Saat SRM bekerja, rotary encoder mendeteksi posisi rotor untuk menghasilkan pulsa penyalan yang disajikan pada Tabel-1 yang kemudian akan diproses oleh FPGA untuk

menghasilkan sudut eksitasi menuju belitan stator melalui koverter asymmetric.

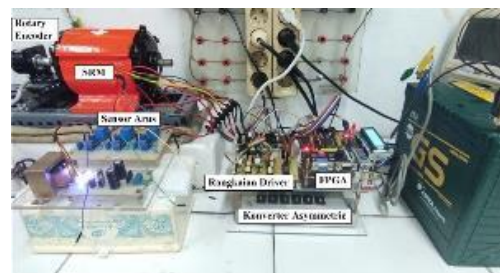


Gambar 8. Diagram sistem kerja SRM

Tabel 2. Parameter SRM

Parameter	Nilai	Satuan
Stator	12	-
Rotor	8	-
Resistansi	3.5	Ohm
Induktansi	1.4	mH
Tegangan	12	volt

Sinkronisasi posisi rotor dengan rotary encoder dapat dilakukan dengan injeksi pulsa. Hasil keluarannya berupa impuls arus pada belitan stator yang digunakan untuk penentuan profil induktansi dan posisi rotor. Impuls arus dan pulsa pin Z ditunjukkan pada Gambar 9.

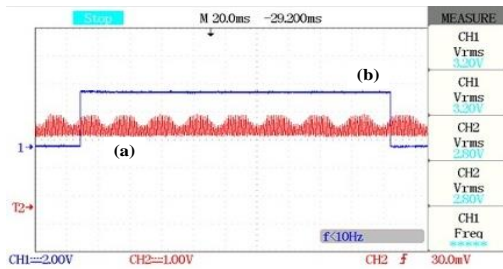


Gambar 9. (a) Hasil gelombang impuls arus (b) pulsa pin z

### Hasil Pengujian Laboratorium

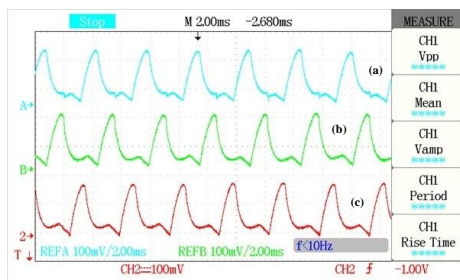
Untuk mendukung metode analisa maka dilakukan pengujian pada hardware dengan spesifikasi yang ditampilkan pada Tabel 2. Pengujian ini terbagi menjadi tiga kondisi





Gambar 10. Prototype pengujian laboratorium

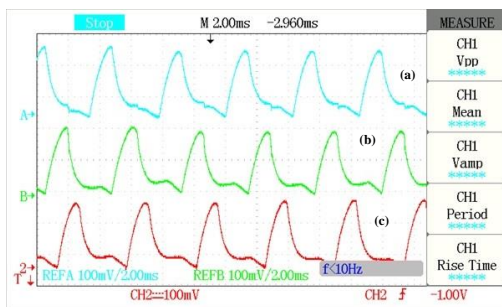
Pengujian pada laboratorium ini terdiri dari *FPGA* yang berfungsi sebagai pengolah sinyal masukan dari *rotary encoder*, konverter *asymmetric* menggunakan 12 *MOSFET* sebagai pensaklaran statis dan *rotary encoder* sebagai pendeteksi posisi rotor pada stator. Pulsa keluaran dari *rotary encoder* pin A dan pin Z digabungkan untuk menghasilkan pulsa yang merepresentasikan posisi rotor terhadap stator. Pulsa tersebut akan digunakan sebagai acuan eksitasi.



Gambar 11. Hasil pengujian laboratorium (a) arus fasa A (b) arus fasa B (c) arus fasa C pada Kondisi-1



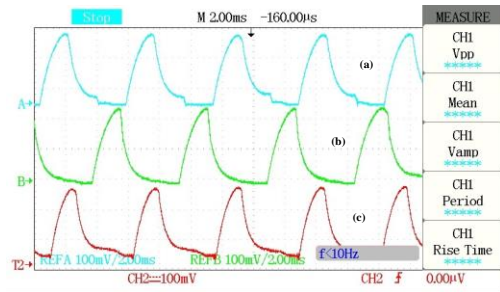
Gambar 12. Hasil pengujian laboratorium kecepatan putaran rotor pada Kondisi-1



Gambar 13. Hasil pengujian laboratorium (a) arus fasa A (b) arus fasa B (c) arus fasa C pada Kondisi-2



Gambar 14. Hasil pengujian laboratorium kecepatan putaran rotor pada Kondisi-2



Gambar 15. Hasil pengujian laboratorium (a) arus fasa A (b) arus fasa B (c) arus fasa C pada Kondisi-3



Gambar 16. Hasil pengujian laboratorium kecepatan putaran rotor pada Kondisi-3

Dari hasil pengujian laboratorium pada Kondisi-1 menghasilkan kecepatan 2141 RPM seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 12 dengan gelombang arus yang lebih rapat lebih rapat seperti yang tujunkan oleh Gambar 11. Hal ini disebabkan karena penentuan sudut penyalaan digeser hingga mendekati induktansi maksimum. Pada kondisi ini sudut penyalaan berada pada posisi induktansi mulai meningkat, maka arus pada belitan stator akan naik sehingga *SRM* akan menghasilkan torka positif pada interval ini, hingga sebelum sudut fasa dimatikan sebelum mengalami penurunan induktansi, agar arus yang tersimpan pada belitan stator tidak memasuki interval torka negatif.

Gambar 13 menunjukkan gelombang arus hasil pergeseran pulsa penyalaan dengan kecepatan 2068 RPM yang ditunjukkan oleh Gambar 14. Kondisi-2 memiliki posisi sudut penyalaan yang berada pada induktansi minimum, sehingga arus pada belitan stator akan naik dengan cepat dan tidak menghasilkan kecepatan yang lebih tinggi dari Kondisi-1.

Kondisi-3 menunjukkan hasil gelombang arus yang renggang seperti pada Gambar 15 dan menghasilkan kecepatan 1910 RPM yang ditunjukkan oleh Gambar 16. Hal ini terjadi karena pada saat kondisi ini pulsa penyalaan

berada pada induktansi maksimum dan sudut fasa dimatikan pada posisi induktansi menurun sehingga arus yang mengalir pada belitan stator akan hingga memasuki interval induktansi minimum, yang mengakibatkan kecepatan putar *SRM* cenderung rendah. Hasil pengujian prototipe disajikan pada tabel 3.

Tabel 3. Hasil kecepatan pada *SRM*

Kondisi	Kecepatan (RPM)
1	2141
2	2068
3	1910

#### IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium yang menggunakan metode pergeseran sudut fasa dapat disimpulkan bahwa pemberian sudut fasa yang tepat dapat menghasilkan kinerja yang maksimal pada *SRM*. Pergeseran sudut fasa pada tiga kondisi, mendapatkan kecepatan yang optimum. Jika penyalan sudut fasa digeser mendekati nilai induktansi maksimum hingga minimum sebelum memasuki interval sudut fasa dimatikan sehingga menghasilkan performa optimal pada *SRM* yang ditunjukkan dengan kecepatan yang mencapai 2141 RPM..

#### REFERENSI

- [1] A. A. Memon, U. Yasir, and M. A. Uquali, "Calculation of converter losses for switched reluctance motor," *2017 20th Int. Conf. Electr. Mach. Syst. ICEMS 2017*, no. c, 2017, doi: 10.1109/ICEMS.2017.8056533.
- [2] A. Shehada, S. Member, and R. Krishnan, "Low-Cost Single-Switch Variable-Speed Switched Reluctance Motor Drive," doi: 10.1109/IEMDC.2015.7409180.
- [3] J. Cai, L. Lu, Z. Liu, H. Jia, X. Zhao, and F. Xu, "An inductive position sensor with switched reluctance motor structure," *2017 20th Int. Conf. Electr. Mach. Syst. ICEMS 2017*, pp. 12–15, 2017, doi: 10.1109/ICEMS.2017.8056495.
- [4] L. E. B. R., P. F. T. H.A., and W. S., "Multiphase induction motor drives-a technology status review," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 1, no. 5, pp. 643–656, 2007, doi: 10.1049/iet-epa.
- [5] Y. Saleem and T. Izhar, "Control of torque in switched reluctance motor," *2nd Int. Conf. Electr. Eng. ICEE*, no. March, pp. 8–11, 2008, doi: 10.1109/ICEE.2008.4553904.
- [6] S. Riyadi, *Konverter Statis untuk Penggerak Motor Switched Reluctance*. 2019.
- [7] S. Riyadi, "Control strategy for switched reluctance motor with rotary encoder based rotor position detection," *Adv. Electr. Electron. Eng.*, vol. 16, no. 3, pp. 261–270, 2018, doi: 10.15598/aece.v16i3.2545.
- [8] S. Riyadi, "A simple method to control the excitation angle for switched reluctance motor," *Indones. J. Electr. Eng. Informatics*, vol. 9, no. 2, pp. 384–393, 2021, doi: 10.52549/ijeei.v9i2.2814.
- [9] T. Wasita Febriandi and S. Riyadi, "Pengaturan Kecepatan Motor Switched Reluctance Dengan Konverter Asymmetric Pada Mode Magnetizing Dan Demagnetizing," pp. 269–276, 2019, doi: 10.5614/sniko.2018.32.
- [10] V. Wijaya and S. Riyadi, "Implementation of Input Capture Method on Switched Reluctance Motor to Obtain Precise Commutation Signals," *CENCON 2019 - 2019 IEEE Conf. Energy Convers.*, vol. 2019-Janua, pp. 110–114, 2019, doi: 10.1109/CENCON47160.2019.8974776.
- [11] I. Marouf, M. M. Asad, A. Bakhuraibah, and Q. A. Al-haija, "Adders Using Altera Cyclone IV FPGA Kit," pp. 8–11, 2017, doi: 10.1109/ICECTA.2017.8252011.
- [12] Q. A. Al-Haija, M. Al-Ja'Fari, and M. Smadi, "A comparative study up to 1024 bit Euclid's GCD algorithm FPGA implementation and synthesizing," *Int. Conf. Electron. Devices, Syst. Appl.*, 2017, doi: 10.1109/ICEDSA.2016.7818535.
- [13] S. C. Huerta, A. de Castro, O. García, and J. A. Cobos, "FPGA-based digital pulsewidth modulator with time resolution under 2 ns," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 6, pp. 3135–3141, 2008, doi: 10.1109/TPEL.2008.2005370.
- [14] L. Zhang and C. Liu, "A Sensorless Techniques for Switched Reluctance Motor Considering Mutual Inductances," *Proc. 2020 IEEE 5th Inf. Technol. Mechatronics Eng. Conf. ITOEC 2020*, no. Itoec, pp. 1425–1428, 2020, doi: 10.1109/ITOEC49072.2020.9141636.
- [15] E. Ofori, T. Husain, Y. Sozer, and I. Husain, "A Pulse-Injection-Based Sensorless Position Estimation Method for a Switched Reluctance Machine Over a Wide Speed Range," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 5, pp. 3867–3876, 2015, doi: 10.1109/TIA.2015.2420618.
- [16] Y. Nakazawa, K. Ohyama, H. Fujii, H. Uehara, and Y. Hyakutake, "Improvement of efficiency of switched reluctance motor by single pulse control based on linear torque equation," *2013 15th Eur. Conf. Power Electron. Appl. EPE 2013*, 2013, doi: 10.1109/EPE.2013.6634418.
- [17] A. D. Wardani, S. Riyadi, L. H. Pratomo, and F. B. Setiawan, "Peningkatan Efisiensi Kinerja Switched Reluctance Motor dengan Metode Pergeseran Sudut Fasa," vol. 42, no. 3, pp. 253–259, 2021, doi: 10.14710/teknik.v42i3.