

LAMPIRAN - LAMPIRAN

E50S Series

Diameter ø50mm Shaft type Incremental Rotary Encoder

Line-up

Features

- 12-24VDC power supply of line driver output(Line-up)
- Suitable for measuring angle, position, revolution, speed, acceleration and distance
- Power supply : 5VDC, 12-24VDC ±5%

Applications

- Various tooling machinery, packing machine and general industrial machinery etc.

⚠ Please read "Caution for your safety" in operation manual before using.



Ordering information (Former name : ENB)

E50S	8	8000	3	N	24	
Series	Shaft diameter	Pulse/1Revolution	Output phase	Output	Power supply	Cable
ø50mm, shaft type	ø8mm	Refer to resolution	2: A, B 3: A, B, Z 4: A, B, Z 5: A, B, Z, Z	T: Totem pole output N: NPN open collector output V: Voltage output L: Line driver output	5 : 5VDC ±5% 24: 12-24VDC ±5%	No mark: Cable type C: Connector cable type (C) CR: Axial connector type CS: Radial connector type

x: Standard : E50S8-8000-3-N-24

※ Cable length: 250mm

Specifications

Item	Specifications		
Resolution (P/RV)*1	Diameter ø50mm shaft type of incremental rotary encoder *1: 1, 2, 5, 10, 12, 15, 20, 23, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 75, 100, 120, 125, 150, 180, 200, 240, 240, 250, 300, 360, 400, 500, 512, 600, 800, 1000, 1024, 1200, 1500, 1800, 2000, 2048, 2500, 3000, 3600, 5000, 6000, 8000		
Output phase	A, B, Z phases (Line driver : A, B, Z, Z phases)		
Phase difference of output	Phase difference between A and B : $\frac{1}{4} \pm \frac{1}{8}$ (1 = 1 cycle of A phase)		
Control output	Totem pole output	• Low - Load current: Max. 30mA, Residual voltage : Max. 0.4VDC • High - Load current: Max. 10mA, Output voltage (Power voltage 5VDC) : Min. (Power voltage-2.0)VDC, Output voltage (Power voltage 12-24VDC) : Min. (Power voltage-3.0)VDC	
	NPN open collector output	Load current : Max. 30mA, Residual voltage : Max. 0.4VDC	
	Voltage output	Load current : Max. 30mA, Residual voltage : Max. 0.4VDC	
	Line driver output	• Low - Load current : Max. 20mA, Residual : Max. 0.5VDC • High - Load current : Max. 20mA, Output voltage (Power voltage 5VDC) : Min. 2.5VDC, Output voltage (Power voltage 12-24VDC) : Min. (Power voltage-3.0)VDC	
Response time (Rise/Fall)	Totem pole output	• Measuring condition - Cable length : 2m, I sink = 25mA	
	NPN open collector output		Max. 1µs
	Voltage output		Max. 0.5µs
	Line driver output		Max. 0.5µs
Max. Response frequency	300kHz		
Power supply	• 5VDC ±5% (Ripple P-P : Max. 5%) • 12-24VDC ±5% (Ripple P-P : Max. 5%)		
Current consumption	Max. 80mA (disconnection of the load), Line driver output : Max. 50mA (disconnection of the load)		
Insulation resistance	Min. 100MΩ (at 500VDC megger between all terminals and case)		
Dielectric strength	750VAC 50/60Hz for 1 minute (Between all terminals and case)		
Connection	Cable type, 250mm connector cable type, Connector type (Axial, Radial)		
Mechanical specification	Starting torque	Max. 70g·cm (0.007N·m) ^{※1} / Max. 800g·cm (0.08N·m) ^{※2}	
	Moment of inertia	Max. 80g·cm ² (8·10 ⁻⁶ kg·m ²) ^{※1} / Max. 400g·cm ² (4·10 ⁻⁶ kg·m ²) ^{※2}	
	Shaft loading	Radial : 10kgf, Thrust : 2.5kgf	
Max. allowable revolution ^{※3}	5000rpm		
Vibration	1.5mm amplitude or 300m/s ² at frequency of 10 to 55Hz (for 1 min.) in each of X, Y, Z directions for 2 hours		
Shock	Approx. Max. 75G		
Environment	Ambient temperature	-10 to 70°C, storage : -25 to 85°C	
	Ambient humidity	35 to 85%RH, storage : 35 to 90%RH	
Protection	Cable type, Connector cable type: IP50 (IEC standard) ^{※4} , Connector type: IP65 (IEC standard)		
Cable	ø5, 5-wire, Length : 2m, Shield cable (Line driver output : ø5, 8-wire) (AWG 24, Core diameter : 0.08mm, Number of cores : 40, Insulator out diameter : ø1)		
Accessory	ø8mm coupling, bracket		
Approval	Cable type (Except for line driver output)		
Unit weight	Approx. 275g, Connector type : 180g		

※1: " " pulse is only for A, B phase (Line driver output is for A, B, Z, Z phase). ※2: This value is for Cable type, Connector cable type (Protection: IP50)

※3: This value is for Cable type, Connector cable type (Protection: IP64) / Connector type (Protection: IP65)

※4: Make sure that max. response revolution should be lower than or equal to max. allowable revolution when selecting the resolution.

$$\left[\text{Max. response resolution (rpm)} = \frac{\text{Max. response frequency}}{\text{Resolution}} \times 60 \text{ sec} \right]$$
 ※5: Cable type, Connector cable type is option as IP64 protection.

※6: Environment resistance is rated at no freezing or condensation.

This chapter describes the electrical and switching characteristics for Cyclone[®] IV devices. Electrical characteristics include operating conditions and power consumption. Switching characteristics include transceiver specifications, core, and periphery performance. This chapter also describes I/O timing, including programmable I/O element (IOE) delay and programmable output buffer delay.

This chapter includes the following sections:

- "Operating Conditions" on page 1-1
- "Power Consumption" on page 1-15
- "Switching Characteristics" on page 1-16
- "I/O Timing" on page 1-37
- "Glossary" on page 1-38

Operating Conditions

When Cyclone IV devices are implemented in a system, they are rated according to a set of defined parameters. To maintain the highest possible performance and reliability of Cyclone IV devices, you must consider the operating requirements described in this chapter.

Cyclone IV devices are offered in commercial, industrial, and automotive grades. Cyclone IV E devices offer -6 (fastest), -7, -8, -8L, and -9L speed grades for commercial devices, -7 and -8L speed grades for industrial devices, and -7 speed grade for automotive devices. Cyclone IV GX devices offer -6 (fastest), -7, and -8 speed grades for commercial devices and -7 speed grade for industrial devices.

For more information about the supported speed grades for respective Cyclone IV devices, refer to the [Cyclone IV FPGA Device Family Overview](#) chapter.

Cyclone IV E devices are offered in core voltages of 1.0 and 1.2 V. Cyclone IV E devices with a core voltage of 1.0 V have an 'L' prefix attached to the speed grade.

In this chapter, a prefix associated with the operating temperature range is attached to the speed grades; commercial with a "C" prefix, industrial with an "I" prefix, and automotive with an "A" prefix. Therefore, commercial devices are indicated as C6, C7, C8, C8L, or C9L per respective speed grade. Industrial devices are indicated as I7, I8, or I8L. Automotive devices are indicated as A7.

TLP250

Transistor Inverter
 Inverter For Air Conditionor
 IGBT Gate Drive
 Power MOS FET Gate Drive

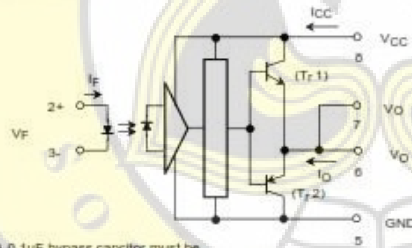
The TOSHIBA TLP250 consists of a GaAlAs light emitting diode and a integrated photodetector.
 This unit is 8-lead DIP package.
 TLP250 is suitable for gate driving circuit of IGBT or power MOS FET.

- Input threshold current: $I_F=5\text{mA}(\text{max.})$
- Supply current (I_{CC}): $11\text{mA}(\text{max.})$
- Supply voltage (V_{CC}): $10\text{--}35\text{V}$
- Output current (I_O): $\pm 1.5\text{A}(\text{max.})$
- Switching time (t_{pLH}/t_{pHL}): $1.5\mu\text{s}(\text{max.})$
- Isolation voltage: $2500\text{V}_{\text{rms}}(\text{min.})$
- UL recognized: UL1577, file No. E67349
- Option (D4) type
 VDE approved: DIN VDE0884/06.92, certificate No. 76823
 Maximum operating insulation voltage: 630V_{pk}
 Highest permissible over voltage: 4000V_{pk}

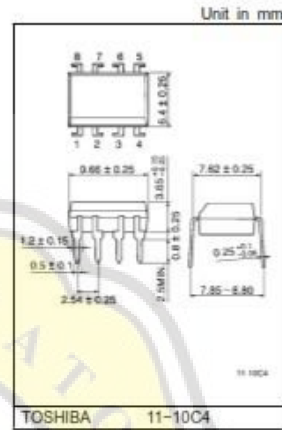
(Note) When a VDE0884 approved type is needed, please designate the "option (D4)"

- Creepage distance: $6.4\text{mm}(\text{min.})$
- Clearance: $6.4\text{mm}(\text{min.})$

Schematic

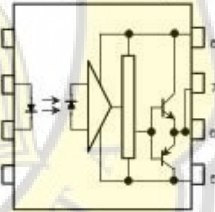


A 0.1 μF bypass capacitor must be connected between pin 5 and 5 (See Note 5).



TOSHIBA 11-10C4
 Weight: 0.54 g

Pin Configuration (top view)



- 1 : N.C.
- 2 : Anode
- 3 : Cathode
- 4 : N.C.
- 5 : GND
- 6 : V_O (Output)
- 7 : V_Q
- 8 : V_{CC}

Truth Table

	Tr1	Tr2
Input LED On	On	Off
Input LED Off	Off	On

Current Transducer HX 03 ... 50-P

For the electronic measurement of currents: DC, AC, pulsed..., with galvanic separation between the primary and the secondary circuit.

$I_{PN} = 3 \dots 50 \text{ A}$



RoHS

cULUS



Electrical data

Type	Primary nominal RMS current I_{PN} (A)	Primary current measuring range I_{PR} (A)	Primary conductor diameter x turns (mm)
HX 03-P	3	±9	0.6 d × 20 T
HX 05-P	5	±15	0.8 d × 12 T
HX 10-P	10	±30	1.1 d × 6 T
HX 15-P	15	±45	1.4 d × 4 T
HX 20-P	20	±60	1.6 d × 3 T
HX 25-P	25	±75	1.6 d × 2 T
HX 50-P	50	±150	1.2 × 6.3 × 1 T

U_{out}	Output voltage (Analog) @ $I_{PR}, R_L = 10 \text{ k}\Omega, T_A = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	±4	V
R_L	Load resistance	≥ 10	k Ω
R_{int}	Output internal resistance	< 50	Ω
U_C	Supply voltage (±5 %) ¹⁾	±15	V
I_C	Current consumption	< ±15	mA

Features

- Open loop technology current transducer using the Hall effect
- Insulated voltage 3000 V
- Extended measuring range (3 x I_{PN})
- Power supply from ±12 V to ±15 V
- Insulating plastic case recognized according to UL 94-V0.

Advantages

- Low insertion losses
- Low power consumption
- Easy to mount with automatic handling system
- Small size and space saving
- Only one design for wide current ratings range
- High immunity to external interference.

Accuracy - Dynamic performance data

ϵ	Error @ $I_{PR}, T_A = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ (excluding offset)	< ±1	% of I_{PN}
ϵ_L	Linearity error (0 ... ± I_{PR})	< ±1	% of I_{PN}
U_{off}	Electrical offset voltage @ $T_A = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	< ±40	mV
U_{off}	Hysteresis offset voltage @ $I_P = 0$, after an excursion of $1 \times I_{PN}$	±15 (typ)	mV
TCU_{off}	Temperature coefficient of U_{off}	< ±1.5	mV/K
TCU_{out}	Temperature coefficient of U_{out} (% of reading)	±0.1	%/K
t_{90}	Delay time to 90 % of I_{PR}	≤ 3	μs
BW	Frequency bandwidth (-3 dB) ²⁾	50	kHz

Applications

- AC variable speed drives and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Switched Mode Power Supplies (SMPS)
- Power supplies for welding applications.

General data

T_A	Ambient operating temperature	-25 ... +85	$^\circ\text{C}$
T_s	Ambient storage temperature	-25 ... +85	$^\circ\text{C}$
m	Mass	8	g
	Standard	EN 50178: 1997	

Notes: ¹⁾ Also operate at $U_C = \pm 12 \text{ V}$, with measuring range reduced to $\pm 2.5 \times I_{PN}$
²⁾ Small signal only to avoid excessive heating of the magnetic cores.

Application domain

Kendali Kecepatan *Switched Reluctance Motor* Berbasis *FPGA*

Arifin Wibisono

Program Studi teknik Elektro,
Fakultas teknik
Universitas Katolik Soegijapranata
Jl. Pawiyatan Luhur IV/1 Bendan
Dhuwur Semarang, Indonesia
arifin@unika.ac.id

Slamet Riyadi

Program Studi teknik Elektro,
Fakultas teknik
Universitas Katolik Soegijapranata
Jl. Pawiyatan Luhur IV/1 Bendan
Dhuwur Semarang, Indonesia
riyadi@unika.ac.id

Sulaiman

Program Studi teknik Elektro,
Fakultas teknik
Universitas Katolik Soegijapranata
Jl. Pawiyatan Luhur IV/1 Bendan
Dhuwur Semarang, Indonesia
17f10009@student.unika.ac.id

Abstract-- Renewable drive technology is developing in the current era, one of which is electric transportation. The Switched Reluctance Motor (SRM) was chosen for the transportation development because it has many advantages, including not using permanent magnets and simple construction in the form of an iron core in the rotor and stator windings. SRM works based on the reluctance phenomenon, namely, if the stator is energized, the stator will attract the nearby rotor, this is based on the tendency of the rotor poles to align with the stator excitation poles. SRM requires high speed switching control to operate and requires correct rotor position to operate. Maximum switching and good accuracy can use Field-Programmable Gate Array (FPGA) and rotary encoder as input for rotor position information. To use SRM in electric transport, it is necessary to adjust the speed with ease and precision. With the Pulse Width Modulation (PWM) technique, the size of the excitation depends on the size of the current, the size of the current is determined by the input voltage to the SRM. In this control, the PWM width can be changed by setting the carrier set and modulation set in the FPGA program. In this study, it is proposed to control the SRM speed by adjusting the PWM of the rotary encoder to produce the desired RPM. To support the achievement of this research, hardware testing was carried out in the laboratory.

Keywords-- Duty cycle, FPGA, PWM, Reluctance, Switched Reluctance Motor.

I. PENDAHULUAN

Switched reluctance motor (SRM) menjadi kandidat kuat untuk transportasi elektrik karena strukturnya yang sederhana, kokoh, biaya rendah, kemampuan toleransi kesalahan kecil, dan keandalan tinggi. Aplikasi untuk kendaraan listrik *hybrid (HEVs)* atau kendaraan listrik (*EVs*) membutuhkan kemampuan pengembangan torka tinggi [1][2]. Untuk mengatur kecepatan pada motor bisa menggunakan mikrokontroler untuk pengaturan lebar pulsanya, akan tetapi *Field Programmable Gate Array (FPGA)* dipilih untuk pengoperasian SRM karena memiliki kecepatan kerja yang tinggi dibanding mikrokontroler. *FPGA* digunakan sebagai kendali utama SRM karena dapat diprogram/dikonfigurasi di lapangan, untuk melakukan perancangan program menggunakan aplikasi berbahasa *VHDL (VHSIC Hardware Description Language)*. Dengan metode *digital pulse with modulation*, besar kecilnya torka dipengaruhi oleh arus, besar kecilnya arus didapatkan dari masukan tegangan. Metode tersebut menggabungkan blok khusus berfrekuensi tinggi yang

terdapat pada *FPGA* seperti *delay locked-loop* yang dapat mengkalikan frekuensi *clock*[3]. Pengoperasian SRM menggunakan konverter asimetris tiga fasa untuk melakukan proses eksitasi dan dibantu dengan *rotary encoder* sebagai pembaca posisi rotornya. Motor ini beroperasi karena fenomena reluctance dimana saat rotor dan stator berada pada posisi sejajar maka belitan stator mengalami reluctance minimum dan induktansi maksimum. Sementara itu, induktansi minimum dicapai ketika mereka berada dalam posisi tidak sejajar. Teknik modulasi yang mengubah lebar pulsa dengan frekuensi dan amplitudo tetap untuk mengontrol sirkuit *analog* dengan *output digital* mikroprosesor dikenal sebagai *Pulse Width Modulation (PWM)*. Untuk mengaturnya yaitu dengan mengubah sinyal modulasi pada sinyal *carrier*, makin besar nilai sinyal modulasi maka sinyal *PWM* makin lebar dan sebaliknya. Dengan mengatur *PWM* pada pensaklaran tiap fasa SRM kecepatan motor dapat berubah sesuai *duty cycle* yang diberikan.

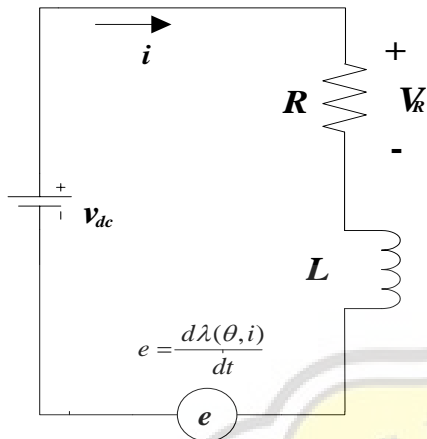
Dalam penelitian ini penulis bermaksud untuk mengatur kecepatan putaran motor dengan kendali *PWM* pensaklaran tiap fasa untuk menghasilkan RPM yang sesuai pengaturan *duty cycle* yang diberikan. Dengan metode pengaturan *PWM* tiap fasa, perubahan speed motor elektrik SRM dapat diketahui dengan melihat hasil kecepatan pada *tachometer* dan keluaran *PWM* tiap fasa SRM di osiloskop. Untuk memvalidasi penelitian ini maka dilakukan pengujian *hardware* secara langsung di laboratorium.

II. METODOLOGI PENELITIAN

A. PRINSIP KERJA SRM

SRM merupakan motor listrik yang mempunyai konstruksi sederhana pada bagian rotor yaitu berupa inti besi dan stator berupa belitan[4]. Pada bagian rotor yang tidak terdapat magnet dan belitan membuat motor ini dapat berputar dengan kecepatan tinggi[5][6]. SRM memiliki torka awal yang tinggi sehingga memiliki efisiensi yang tinggi dibandingkan motor listrik lainnya. Motor ini beroperasi karena fenomena reluctance. Ketika stator dan rotor berada pada posisi sejajar (*aligned*), belitan stator memiliki induktansi maksimum dan reluctance minimum. Sementara itu, induktansi minimum dicapai ketika mereka berada dalam posisi tidak sejajar (*unaligned*)[7][8].

Rangkaian ekuivalen yang ditunjukkan pada Gambar 1 yang terdiri dari hambatan atau resistansi (R), induktansi (L), dan *Electromotive force* (*EMF*). Pada saat motor berputar, belitan stator *SRM* menghasilkan *back-EMF* atau memiliki polaritas tegangan yang berbanding terbalik dengan sumber[9].



Gambar 1. Rangkaian ekuivalen *SRM*

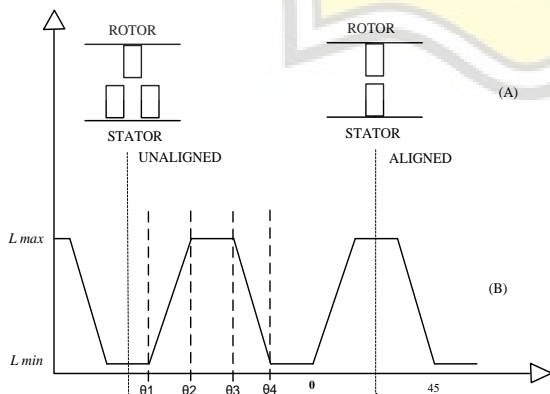
Dari rangkaian Gambar 1 ekuivalen di atas, maka didapatkan persamaan tegangan pada *SRM* sebagai berikut:

$$V_{dc} = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + e \quad (1)$$

$$V \cdot d = i \cdot R + L \frac{di}{dt} + \omega \cdot i \frac{dL}{d\theta} \quad (2)$$

di mana V sebagai tegangan, i arus fasa, R hambatan, L induktansi, θ posisi rotor, dan ω kecepatan motor. Dengan menambahkan d sebagai *duty cycle* pada ekuivalen motor maka besaran tegangan sebenarnya pada *SRM* berbasis *PWM* dapat diketahui.

SRM yang digunakan menggunakan konstruksi dua belas stator dan delapan rotor, setiap belitan statornya menghasilkan karakteristik induktansi terkait dengan posisi rotornya.



Gambar 2. (a) posisi rotor terhadap stator (b) profil induktansi

Gambar 2 menunjukkan bahwa *SRM* beroperasi pada saat meningkatnya induktansi, hal ini didasari pada

posisi rotor yang tidak sejajar (*unaligned*) dengan stator di posisi sejajar (*aligned*). *SRM* memiliki hasil empat profil induktansi pada setiap putarannya karena diwakili dengan mekanik 360° serta ada delapan rotor pada konstruksi motor, sehingga menghasilkan mekanik 45° disetiap induktansinya. Pada Gambar 2 menunjukkan interval yang berbeda-beda, $0 \leq \theta \leq \theta_1$ dan $\theta_4 \leq \theta \leq \theta_5$ yaitu interval pertama yang kutub rotor dan stator berada di posisi *unaligned*, pada kondisi ini memiliki induktansinya kecil karena torsi rendah. Tumpang tindih posisi kutub rotor dimulai pada interval kedua $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$ karena kutub rotor mulai *overlap* dan nilai induktansi maksimum. Interval ketiga $\theta_2 \leq \theta \leq \theta_3$ kutub rotor dan statornya dalam posisi *aligned*, maka nilai induktansi menjadi maksimum. Pada interval keempat $\theta_3 \leq \theta \leq \theta_4$ kutub rotor mulai berjauhan dengan stator. Setiap sudutnya dapat dihitung dengan persamaan dibawah ini:

$$\theta_1 = \frac{1}{2} \left[\frac{2\pi}{Pr} - \beta_s + \beta_r \right] \quad (3)$$

$$\theta_2 = \theta_1 + \beta_s \quad (4)$$

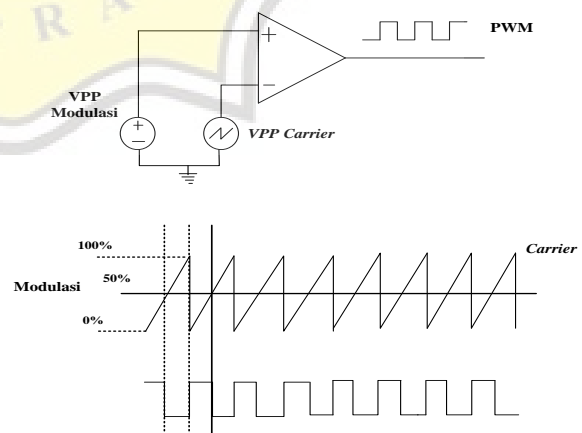
$$\theta_3 = \theta_2 + (\beta_r - \beta_s) \quad (5)$$

$$\theta_4 = \theta_3 + \beta_s \quad (6)$$

di mana θ sudut rotor, β_r sudut lengkungan rotor, β_s sudut lengkungan stator, dan Pr jumlah kutub rotor.

B. KENDALI KECEPATAN

Pulse Width Modulation (*PWM*) yaitu suatu cara untuk mengatur lebar sempit suatu pulsa penyalan pada setiap fasa *SRM*[10]. Salah satu cara untuk mengaturnya yaitu dengan mengatur sinyal modulasi pada sinyal *carrier*, makin besar nilai sinyal modulasi maka sinyal *PWM* makin lebar dan kecepatan motor akan berputar kencang, dan begitu juga sebaliknya[11][12].

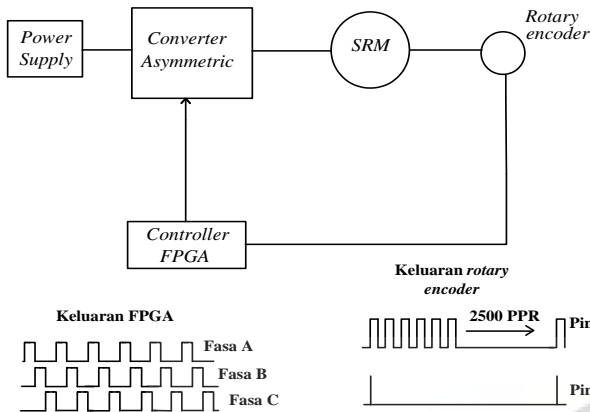


Gambar 3. Pengaturan *PWM*

Sinyal pulsa untuk penentuan posisi rotor yang dihasilkan *rotary encoder* akan dikirimkan ke kendali utama *FPGA* dan di program dengan mengatur lebar

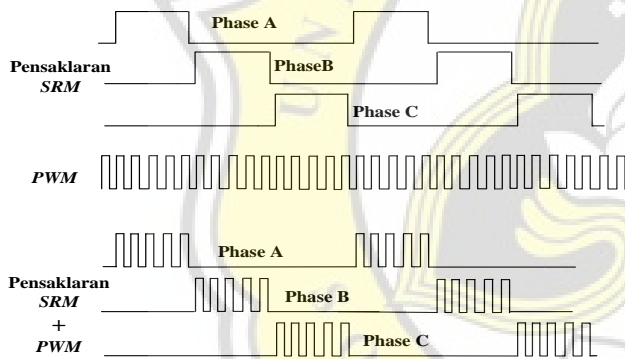
Kendali Kecepatan *Switched Reluctance Motor* Berbasis *FPGA*

sinyal menggunakan pengaturan *duty cycle*. Jika VPP modulasi lebih lebar dari VPP carrier maka kondisi saklar penyalan *SRM* akan hidup, dan begitu pula sebaliknya.



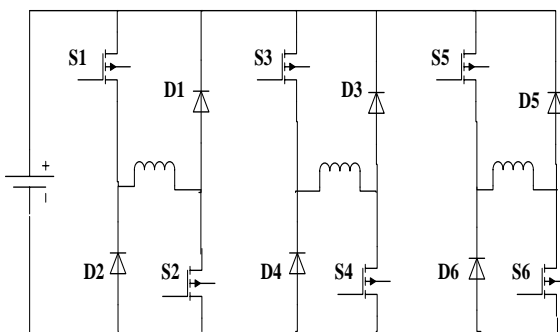
Gambar 4. Diagram blok *hardware SRM*

Pada saat *PWM* pensaklaran berjalan T_{on} fasa A, B dan C didalamnya terdapat *PWM* pengatur kecepatan, sehingga waktu penyalan akan diatur dengan sinyal *duty cycle*. Berikut bentuk sinyal penyalan *SRM* yang sudah diatur *PWM* ditampilkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 5. Pensaklaran *SRM* dengan pengaturan *PWM*

Pada Gambar 5 keluaran *PWM* dengan pengaturan *duty cycle* 50%, menghasilkan lebar T_{on} yang sebanding dengan lebar T_{off} . Hasil dari perubahan lebar pulsa nantinya akan digunakan untuk sinyal penyalan pada *switching driver* asimetris.

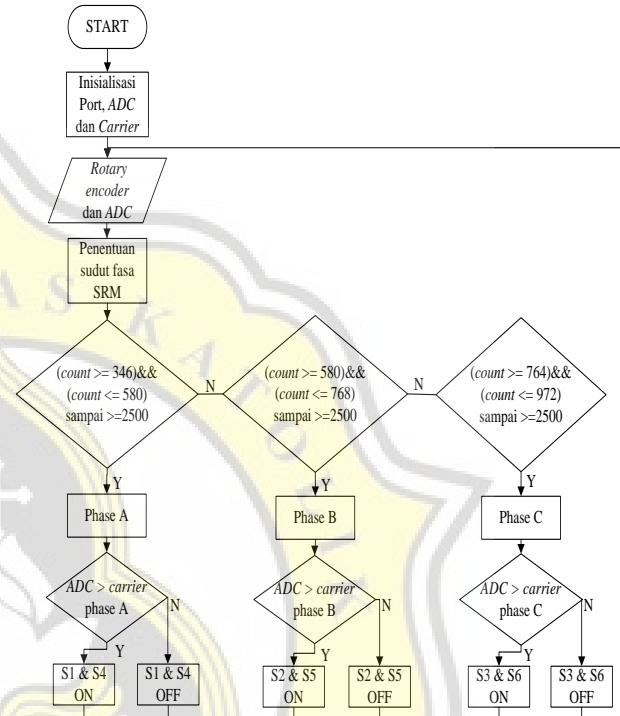


Gambar 6. Driver Asimetris

Untuk menjalankan *SRM* terdapat dua mode,

magnetizing adalah mode pertama yang pemberian eksitasinya untuk menyalakan saklar S_1 dan S_2 di belitan fasa-A. *Demagnetizing* menjadi mode kedua dengan mematikan saklar S_1 dan S_2 arus yang tersimpan pada belitan stator akan mengalir melalui D_2 dan D_1 ke sumbernya. Pada kondisi tersebut tegangan di belitan fasa-A sama dengan masukan V_{dc} yang menghasilkan torsi positif jika diberikan pada saat induktansi fasa-A bertambah [13][14][15].

Berikut *flowchart* sistem kendali kecepatan *SRM* berbasis *FPGA*.

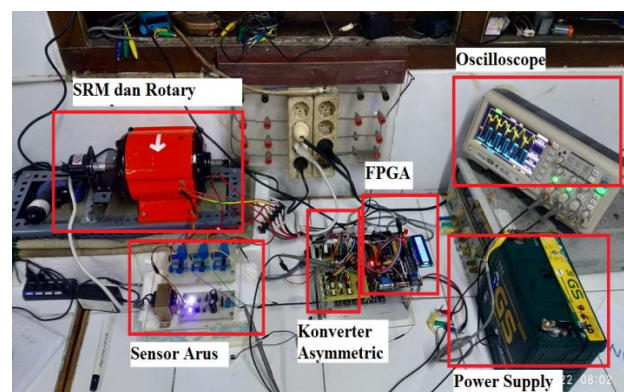


Gambar 7. *Flowchart* urutan penyalan sistem kendali kecepatan *SRM*

Dari *flowchart* diatas dapat digunakan sebagai parameter pengujian *hardware switched reluctance motor*.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Guna mendukung penelitian ini maka dilakukan uji laboratorium sebagai validasi. Berdasarkan metode penelitian yang sudah ada pada sistem kendali kecepatan *SRM*, maka dilakukan pengujian pada *hardware SRM* di laboratorium.



Gambar 8. *Hardware* untuk pengambilan data

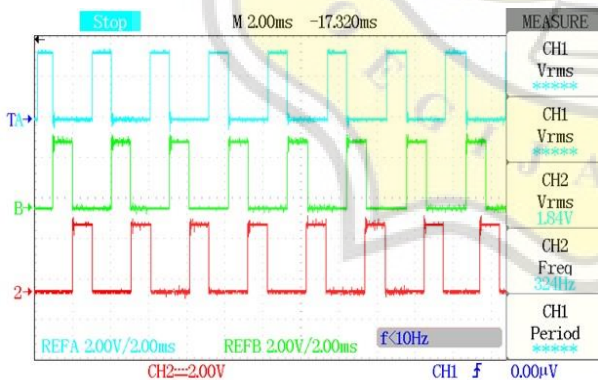
Kendali Kecepatan *Switched Reluctance Motor* Berbasis *FPGA*

Pada Gambar 8 merupakan *hardware* kendali kecepatan motor yang terdiri dari *SRM* tiga fasa, *rotary encoder*, *FPGA*, konverter asimetris, rangkaian daya MOSFET. Dibawah ini adalah parameter *hardware switch reluctance motor* yang digunakan pada pengujian laboratorium disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter alat penelitian *SRM*

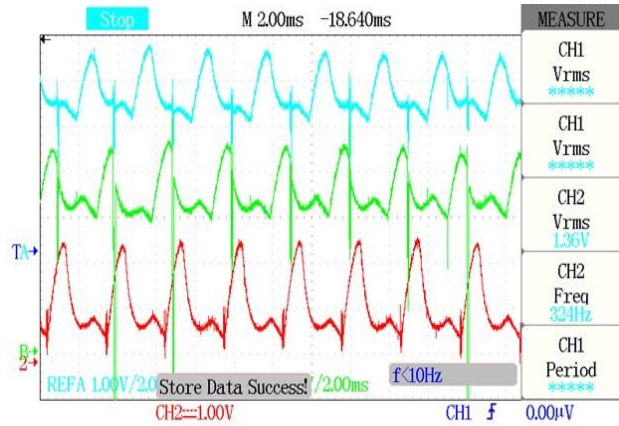
PARAMETER	NILAI	SATUAN
Motor		
Stator	12	-
Rotor	8	-
Resistansi	4.5	Ohm
Induktansi	1.4	mH
Tegangan	12	Volt
Rotary encoder single - ended		
Pin A	2500	PPR
Pin Z	1	Impuls
Tegangan	5	Volt
FPGA Cyclone IV EP4CE6E22C8N		
Clock	50	Mhz
Memori	16	Mbit
Power Supply	5	Volt
Konverter Asimetris 3 fasa		
TLP		
MOSFET IRFP 250N		
Dc Link	12	Volt

Alat uji penelitian dapat diimplementasikan dengan menambahkan pengaturan *PWM* penyalan pada tiap fasanya sesuai parameter alat *SRM* yang terdapat pada Tabel 1.



Gambar 9. Hasil pengujian sinyal *PWM* pada sinyal modulasi 1500

Pola pensaklaran yang terdapat dari Gambar 9 menunjukkan bahwa satu putaran terdapat delapan kali proses pola pensaklaran sekuensial disetiap fasa. Dalam proses pensaklarannya mengalami pergeseran fasa 15° yang berawal dari Fasa A, Fasa B, dan Fasa C, sehingga *SRM* dapat berjalan hingga optimal.

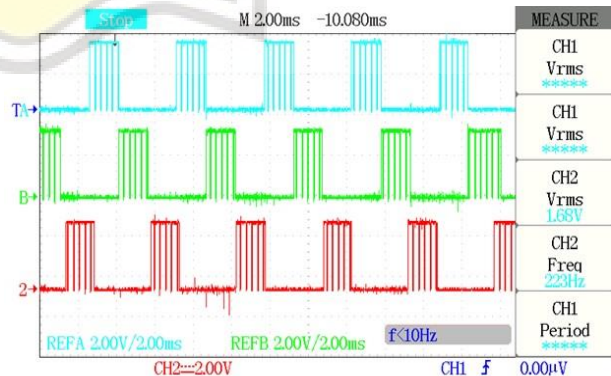


Gambar 10. Hasil pengujian arus pada sinyal modulasi 1500



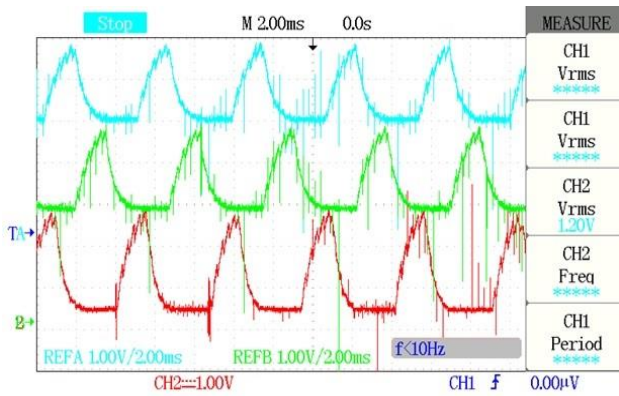
Gambar 11. Hasil pengukuran kecepatan pada sinyal modulasi 1500

Jika kecepatan putar motor semakin tinggi maka nilai *back-EMF* semakin besar nilainya, hal itu menandakan hasil keluaran daya yang dihasilkan sempurna seperti pada Gambar 10 saat *duty cycle* pada skala 100% menghasilkan arus yang tinggi dengan hasil kecepatan motor 2452 RPM.



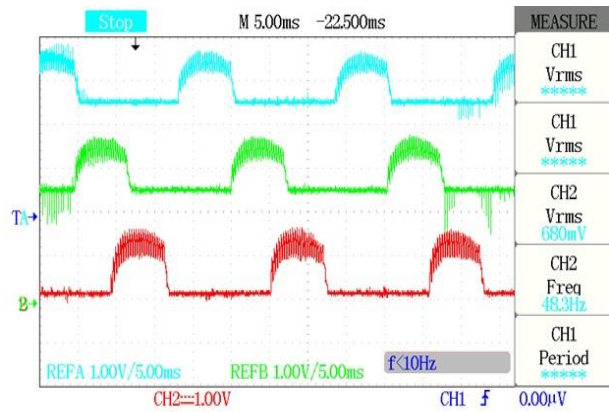
Gambar 12. Hasil pengujian sinyal *PWM* pada kondisi sinyal modulasi 1300

Kendali Kecepatan *Switched Reluctance Motor* Berbasis *FPGA*



Gambar 13. Hasil pengujian arus pada sinyal modulasi 1300

Pada Gambar 12 bentuk *PWM* pensaklaran tiap fasa mulai terisi *PWM* pengubah kecepatan, sehingga bentuk sinyal penyalan *SRM* mengalami perubahan lebar pulsa. Pada Gambar 13 bentuk arus cenderung lebih kecil karena kecepatan mulai menurun. Dengan sinyal modulasi 1300 menghasilkan kecepatan 1682 RPM.



Gambar 16. Hasil pengujian arus pada sinyal modulasi 1000

Pada percobaan ketiga dengan mengatur sinyal modulasi 1000 dari sinyal *carrier* 1500 bentuk pensaklaran *SRM* saat posisi *on*, *duty cycle* didalamnya akan semakin kecil.



Gambar 14. Hasil pengukuran kecepatan pada sinyal modulasi 1300



Gambar 17. Hasil pengukuran kecepatan pada sinyal modulasi 1000

IV. KESIMPULAN

Pada pengujian ini dapat disimpulkan, bahwa pengaturan *PWM* pada pensaklaran dapat mempengaruhi kecepatan *SRM*. Proses kendali kecepatan *SRM* yaitu dengan mengatur *duty cycle* terjadi pada saat T_{on} pensaklaran. Percobaan pada kondisi 1 dengan mengatur sinyal modulasi 1500 pada sinyal *carrier* 1500 atau *duty cycle* 100% dihasilkan kecepatan 2454 RPM, pada kondisi 2 sinyal modulasi 1300 pada sinyal *carrier* 1500 atau *duty cycle* 85% dihasilkan kecepatan 1682 RPM, lalu pada kondisi ke 3 dengan sinyal modulasi 1000 dan sinyal *carrier* 1500 atau *duty cycle* 65% dihasilkan kecepatan 610 RPM. Hal ini menunjukkan bahwa semakin kecil nilai sinyal modulasi dari kendali *FPGA* maka semakin rendah *duty cycle* dan RPM yang dihasilkan, dan sebaliknya semakin besar nilai sinyal modulasi maka semakin tinggi *duty cycle* dan RPM yang dihasilkan.

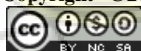
UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh skema Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi (PTUPT) tahun 2022.

REFERENSI

- [1] H. Cheng, Z. Wang, S. Yang, J. Huang, and X. Ge, "An Integrated SRM Powertrain Topology for Plug-In Hybrid Electric Vehicles with Multiple Driving and Onboard Charging Capabilities," *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 6, no. 2, pp. 578–591, 2020, doi: 10.1109/TTE.2020.2987167.
- [2] C. Gan, J. Wu, Q. Sun, W. Kong, H. Li, and Y. Hu, "A Review on Machine Topologies and Control Techniques for Low-Noise Switched Reluctance Motors in Electric Vehicle Applications," *IEEE Access*, vol. 6, no. c, pp. 31430–31443, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2837111.
- [3] 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.
- [4] Y. Lan *et al.*, "Switched reluctance motors and drive systems for electric vehicle powertrains: State of the art analysis and future trends," *Energies*, vol. 14, no. 8, 2021, doi: 10.3390/en14082079.
- [5] A. D. Wardani, S. Riyadi, L. H. Pratomo, and F. B. Setiawan, "Peningkatan Efisiensi Kinerja Switched Reluctance Motor dengan Metode Pergeseran Sudut Fasa," *Teknik*, vol. 42, no. 1, pp. 253–259, 2021, doi: 10.14710/teknik.v42i1.33970.
- [6] A. P. Khedkar and P. S. Swami, "Comparative study of asimetris bridge and split AC supply konverter for switched reluctance motor," *6th Int. Conf. Comput. Power, Energy, Inf. Commun. ICCPEIC 2017*, vol. 2018-Janua, pp. 522–526, 2018, doi: 10.1109/ICCPEIC.2017.8290421.
- [7] 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.
- [8] G. D. Wahyu and S. Riyadi, "PWM Control Strategy of Regenerative Braking to Maximize the Charging Current into the Battery in SRM Drive," *Proc. - 2019 Int. Semin. Appl. Technol. Inf. Commun. Ind. 4.0 Retrospect. Prospect. Challenges, iSemantic 2019*, pp. 523–527, 2019, doi: 10.1109/ISEMANTIC.2019.8884342.
- [9] 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/aeec.v16i3.2545.
- [10] Shihab, B. M., Che, H. S., & Hew, W. P. Symmetrical six-phase PWM methods using similar and dissimilar zero-sequence signals injection. 4th IET Clean Energy and Technology Conference (CEAT 2016) . doi:10.1049/cp.2016.1335
- [11] X. Zan, Z. Jiang, K. Ni, W. Zhang, Y. Gong, and N. Wu, "Modular battery management for SRM drives in hybrid vehicles based on a novel modular konverter," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 136296–136306, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3011451.
- [12] M. Kulon, K. Majalengka, K. Majalengka, and J. Barat, "Analisis pengaruh dutycycle dan frekuensi terhadap kecepatan motor listrik," no. 103, 2020.
- [13] R. A. Nugroho, "Perbandingan Penyalaan Sudut Fasa Pada SRG Guna Meningkatkan Kinerja Untuk Memaksimalkan Keluaran Daya," *Cyclotron*, vol. 4, no. 2, pp. 13–17, 2021, doi: 10.30651/cl.v4i2.7451.
- [14] R. AMALIA, S. RIYADI, F. B. SETIAWAN, and L. H. PRATOMO, "Peningkatan Kinerja Switched Reluctance Generator dengan Pergeseran Sudut Penyalaan," *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 9, no. 3, p. 690, 2021, doi: 10.26760/elkomika.v9i3.690.
- [15] N. Kusumaningrum, S. Riyadi, L. H. Pratomo, and F. B. Setyawan, "Optimalisasi Pengereman Regeneratif dengan Perubahan Sudut Eksitasi pada Pulsa Tunggal," *J. Tek. Elektro*, vol. 13, no. 1, pp. 1–9, 2021, doi: 10.15294/jte.v13i1.28600.

Copyright ©2016 PROtek : Jurnal Ilmiah Teknik Elektro



lisensi Creative Commons Attribution 4.0 International Licensi

PAPER NAME

17.F1.0009_Sulaiman

AUTHOR

Sulaiman Sulaiman

WORD COUNT

4728 Words

CHARACTER COUNT

29551 Characters

PAGE COUNT

42 Pages

FILE SIZE

3.2MB

SUBMISSION DATE

Jun 23, 2022 12:42 PM GMT+7

REPORT DATE

Jun 23, 2022 12:43 PM GMT+7

● 19% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

- 18% Internet database
- 0% Publications database
- Crossref database
- Crossref Posted Content database
- 3% Submitted Works database

● Excluded from Similarity Report

- Bibliographic material
- Quoted material
- Cited material
- Small Matches (Less than 10 words)
- Manually excluded text blocks