

**LAPORAN TUGAS AKHIR**  
**OPTIMASI Pengereman Regeneratif**  
**PADA MESIN SWITCHED RELUCTANCE**  
**DENGAN METODE MAGNETIZING-DEMAGNETIZING**



**Oleh:**

**Fransiscus Xaverius Rivos Santoso**

**18.F1.0007**

**TEKNIK ELEKTRO**

**TEKNIK**

**UNIVERSITAS KATOLIK SOEGIJAPRANATA**

**SEMARANG**

**2022**

**LAPORAN TUGAS AKHIR**  
**OPTIMASI Pengereman Regeneratif**  
**PADA MESIN SWITCHED RELUCTANCE**  
**DENGAN METODE MAGNETIZING-DEMAGNETIZING**

**Diajukan dalam Rangka Memenuhi**  
**Salah Satu Syarat Memperoleh**  
**Gelar Sarjana Teknik Elektro**



**Oleh:**

**Fransiscus Xaverius Rivos Santoso**

**18.F1.0007**

**TEKNIK ELEKTRO**

**TEKNIK**

**UNIVERSITAS KATOLIK SOEGIJAPRANATA**

**SEMARANG**

**2022**

**PERNYATAAN**  
**KEASLIAN LAPORAN TUGAS AKHIR (SKRIPSI)**

Memperhatikan Surat Keputusan Rektor Universitas Katolik Soegijapranata Nomor.:0047/SK.Rek/X/2013 tanggal 07 Oktober 2013, tentang Pernyataan Laporan Tugas Akhir, maka bersama ini Laporan Tugas Akhir Saya yang berjudul “*OPTIMASI Pengereman Regeneratif pada Mesin Switched Reluctance dengan Metode Magnetizing-Demagnetizing*“, tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu Perguruan Tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Apabila di kemudian hari ternyata terbukti bahwa Tugas Akhir ini sebagian atau seluruhnya merupakan hasil plagiasi, maka saya rela untuk dibatalkan, dengan segala akibat hukumnya sesuai peraturan yang berlaku pada Universitas Katolik Soegijapranata dan / atau peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Semarang, 21 OKTOBER 2022

Yang menyatakan,



**FX. RIVOS SANTOSO**

**NIM. 18.F1.0007**



## HALAMAN PENGESAHAN

Judul Tugas Akhir: : OPTIMASI Pengereman Regeneratif pada Mesin Switched Reluctance dengan Metode Magnetizing-Demagnetizing

Diajukan oleh : Fx. Rivos Santoso

NIM : 18.F1.0007

Tanggal disetujui : 21 Oktober 2022

Telah setuju oleh

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Slamet Riyadi M.T.

Penguji 1 : Dr. Leonardus Heru Pratomo S.T., M.T.

Penguji 2 : Dr. Ir. Florentinus Budi Setiawan M.T.

Penguji 3 : Prof. Dr. Ir. Slamet Riyadi M.T.

Ketua Program Studi : Dr. Leonardus Heru Pratomo S.T., M.T.

Dekan : Prof. Dr. Ir. Slamet Riyadi M.T.

Halaman ini merupakan halaman yang sah dan dapat diverifikasi melalui alamat di bawah ini.

[sintak.unika.ac.id/skripsi/verifikasi/?id=18.F1.0007](http://sintak.unika.ac.id/skripsi/verifikasi/?id=18.F1.0007)

## HALAMAN PERNYATAAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Fransiscus Xaverius Rivos Santoso

Program Studi : Teknik Elektro

Fakultas : Teknik

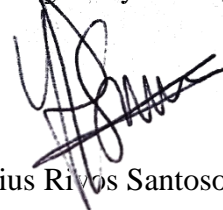
Jenis Karya : Laporan Tugas Akhir

Menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Katolik Soegijapranata Semarang Hak Bebas Royalti Noneksklusif atas karya ilmiah berjudul "***OPTIMASI PENEREMAN REGENERATIF PADA MESIN SWITCHED RELUCTANCE DENGAN METODE MAGNETIZING-DEMAGNETIZING***" beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Katolik Soegijapranata berhak menyimpan, mengalihkan media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir ini selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis / pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Semarang, 21 Oktober 2022

Yang menyatakan,



Fransiscus Xaverius Rivos Santoso

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis haturkan kepada Tuhan Yesus atas berkat dan kebaikan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan baik. Skripsi yang berjudul **OPTIMASI Pengereman Regeneratif pada Mesin Switched Reluctance dengan Metode Magnetizing-Demagnetizing** ini disusun untuk memenuhi persyaratan kurikulum strata-1 (S-1) pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Soegijapranata.

Penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan baik secara langsung maupun tidak langsung kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir dan penyusunan skripsi ini. Secara khusus, rasa terimakasih penulis berikan kepada:

1. Tuhan Yesus, karena atas berkat dan kebaikan-Nya yang diberikan kepada penulis sehingga penulis dapat melaksanakan tugas akhir serta menyelesaikan skripsi dengan baik.
2. Orang tua dan kedua saudara yang selalu memotivasi, mendoakan dan mendukung penulis.
3. Prof. Dr. Ir. Slamet Riyadi, M.T., selaku dosen pembimbing tugas akhir, yang telah bersedia meluangkan waktu membimbing dan memberikan arahan serta memotivasi penulis dalam pelaksanaan tugas akhir.

4. Dr. Leonardus Heru Pratomo, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro yang telah mengizinkan dan menyediakan fasilitas untuk penggunaan laboratorium yang digunakan untuk menyelesaikan tugas akhir.
5. Dr. Florentinus Budi Setiawan, S.T., M.T., IPM., selaku dosen Program Studi Teknik Elektro, yang telah memberikan ilmu dan motivasi kepada penulis.
6. Arifin Wibisono, S.T., M.T., selaku dosen Program Studi Teknik Elektro, yang telah memberikan ilmu dan dukungan kepada penulis.
7. Fransiska Tri Retno selaku Tata Usaha Teknik Elektro yang telah membantu dalam mengurus administrasi dan informasi saat masa perkuliahan.
8. Seluruh Karyawan Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Katolik Soegijapranata
9. Andhika, Ivan, Mayang, Mikhael, Ryan selaku rekan satu tim bimbingan yang telah memberikan bantuan dan semangat dalam melaksanakan tugas akhir.
10. Teman-teman Teknik Elektro angkatan 2018 yang telah menjadi teman seperjuangan dan banyak membantu dalam perkuliahan.
11. Kakak tingkat serta alumni Teknik Elektro yang telah memberikan semangat dan masukan kepada penulis.
12. Seluruh pihak yang telah membantu dan mendukung penulis dalam menyelesaikan tugas akhir beserta laporan yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa tulisan ini masih kurang sempurna, sehingga penulis mengharapkan kritik dan saran dari berbagai pihak sebagai penunjang

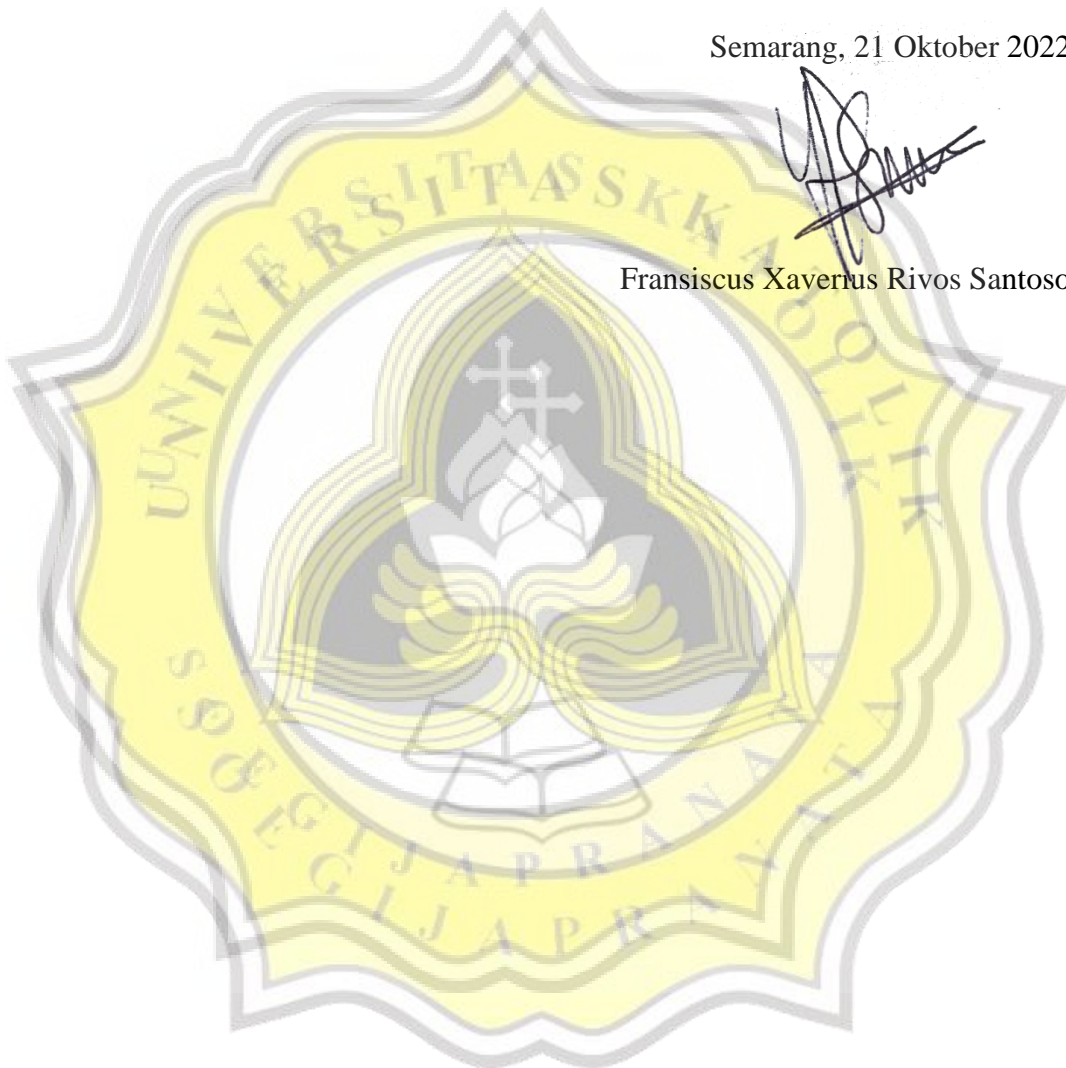
perbaikan serta kemajuan. Penulis juga mohon maaf apabila terdapat kata-kata yang kurang berkenan dalam penulisan skripsi ini.

Besar harapan penulis semoga tugas akhir dan skripsi ini dapat menjadi referensi bagi kemajuan teknologi di Indonesia.

Semarang, 21 Oktober 2022



Fransiscus Xaverius Rivos Santoso





## ABSTRAK

*Switched Reluctance Machine* (SRM) merupakan salah satu jenis mesin yang banyak digunakan untuk aplikasi kendaraan listrik karena beberapa keunggulannya, antara lain strukturnya yang sederhana tanpa pemasangan belitan pada rotor dan tanpa menggunakan magnet permanen pada rotornya. Sisa energi pada pengereman konvensional terbuang menjadi panas, sehingga pengereman regeneratif diperlukan untuk mengurangi energi yang terbuang saat pengereman. Ada beberapa metode pengereman regeneratif untuk SRM, tetapi diperlukan metode yang tepat untuk meningkatkan efisiensi pengereman di kecepatan rendah. Metode pengereman regeneratif menggunakan PWM *magnetizing-demagnetizing* dengan pengaturan *duty cycle* digunakan dalam penelitian ini. Dengan nilai eksitasi yang tepat pada belitan stator SRM, dan pengaturan *duty cycle* yang tepat untuk metode *magnetizing-demagnetizing*, pengereman regeneratif yang optimal dapat diperoleh. Metode ini dapat mengoptimalkan kecepatan pengereman dan arus pengisian ke baterai bahkan pada kecepatan rendah. Eksperimen laboratorium telah dilakukan untuk menunjukkan dampak perubahan *duty cycle* pada pengereman regeneratif.

**Kata Kunci:** SRM, kendaraan listrik, pengereman regeneratif, *magnetizing-demagnetizing*, *duty cycle*

## DAFTAR ISI

<b>PERNYATAAN KEASLIAN LAPORAN TUGAS AKHIR (SKRIPSI)</b>	ii
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b>	iii
<b>HALAMAN PERNYATAAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS</b>	iv
<b>KATA PENGANTAR</b>	v
<b>ABSTRAK</b>	viii
<b>DAFTAR ISI</b>	ix
<b>DAFTAR GAMBAR</b>	xii
<b>DAFTAR TABEL</b>	xv
<b>BAB I</b>	1
<b>PENDAHULUAN</b>	1
1. 1. Latar Belakang	1
1. 2. Perumusan Masalah	2
1. 3. Pembatasan Masalah	2
1. 4. Tujuan dan Manfaat	3
1. 5. Metodologi Penelitian	3
1. 6. Sistematika Penulisan	4
<b>BAB II</b>	6
<b>DASAR TEORI</b>	6
2. 1. Pendahuluan	6
2. 2. Karakteristik <i>Switched Reluctance Machine</i>	7

2.2.1.	SRM Sebagai Motor	8
2.2.2.	SRM Sebagai Generator	10
2.2.3.	Metode <i>Multiple Pulse</i>	11
2. 3.	Pengaturan <i>Duty Cycle</i>	13
2. 4.	Konverter <i>Asymmetric</i>	14
2. 5.	Komponen Pendukung	14
2.5.1	<i>Digital Signal Controller</i>	15
2.5.2	IGBT ( <i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> )	16
2.5.3	<i>Three-State Buffer</i>	16
2.5.4	<i>Optocoupler</i>	17
2.5.5.	Catu Daya	18
2.5.6	<i>Rotary Encoder</i>	19
2.5.7	Sensor <i>Hall</i>	20
<b>BAB III</b>		21
<b>RANCANGAN KENDALI Pengereman Regeneratif pada</b>		21
<b>SRM</b>		
3. 1.	Pendahuluan	21
3. 2.	Konstruksi SRM	22
3. 3.	Prinsip Kerja Pengereman Regeneratif SRM Menggunakan Metode <i>Magnetizing-Demagnetizing</i>	23
3. 4.	Blok Kendali	24
3. 5.	Rangkaian <i>Driver TLP 250</i>	26
3. 6.	Konverter <i>Asymmetric</i>	27

3. 7.	<i>Rotary Encoder</i>	29
3. 8.	Rangkaian Sensor Arus LEM LA 50-P	31
<b>BAB IV</b>		33
<b>PEMBAHASAN</b>		33
4. 1.	Pendahuluan	33
4. 2.	Hasil Simulasi Menggunakan Simulink	33
4. 3.	Hasil Pengujian Alat	37
4.3.1.	Hasil Pengujian Pada <i>Duty Cycle</i> 25 %	43
4.3.2.	Hasil Pengujian Pada <i>Duty Cycle</i> 50 %	44
4.3.3.	Hasil Pengujian Pada <i>Duty Cycle</i> 75 %	46
4. 4.	Pembahasan	47
<b>BAB V</b>		50
<b>PENUTUP</b>		50
5. 1.	Kesimpulan	50
5. 2.	Saran	50
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>		52
<b>LAMPIRAN</b>		57

## DAFTAR GAMBAR

Gambar-2.1.	Rangkaian ekivalen SRM	7
Gambar-2.2.	Hubungan posisi rotor dan profil induktansi SRM	8
Gambar-2.3.	Rotasi SRM ketika beroperasi sebagai motor	9
Gambar-2.4.	Pengaruh kemiringan induktansi terhadap torka SRM	11
Gambar-2.5.	Gelombang tegangan dan arus fasa pada metode <i>magnetizing-demagnetizing</i>	12
Gambar-2.6.	Pengaturan nilai <i>duty cycle</i> pada PWM	13
Gambar-2.7.	Konverter <i>asymmetric</i>	14
Gambar-2.8.	Konfigurasi <i>digital signal controller</i>	15
Gambar-2.9.	Skema konfigurasi IGBT	16
Gambar-2.10.	Konfigurasi <i>three-state buffer</i>	17
Gambar-2.11.	Konfigurasi <i>optocoupler</i>	18
Gambar-2.12.	Skema catu daya	19
Gambar-2.13.	Keluaran <i>rotary encoder</i>	19
Gambar-2.14.	Pengukuran arus menggunakan sensor <i>hall</i>	20
Gambar-3.1.	Skema pengereman regeneratif pada SRM	21
Gambar-3.2.	SRM tiga fasa	22
Gambar-3.3.	Rangkaian konverter <i>asymmetric mode magnetizing</i>	23
Gambar-3.4.	Rangkaian konverter <i>asymmetric mode demagnetizing</i>	24
Gambar-3.5.	Skema blok kendali sistem	25
Gambar-3.6.	<i>Flowchart</i> sistem blok kendali	26

Gambar-3.7.	Skema rangkaian <i>driver</i> TLP 250	27
Gambar-3.8.	Skema rangkaian konverter <i>asymmetric</i> menggunakan dua buah IGBT	28
Gambar-3.9.	Pola pensaklaran <i>magnetizing-demagnetizing</i>	29
Gambar-3.10.	<i>Rotary encoder</i> Autonics E50S8-2500-3-V-5	30
Gambar-3.11.	Pemetaan pulsa <i>rotary encoder</i>	31
Gambar-3.12.	Skema rangkaian sensor arus LEM LA 50-P	32
Gambar-3.13.	Rangkaian sensor arus LEM LA 50-P yang digunakan	32
Gambar-4.1	Hasil simulasi sinyal pensaklaran tiap fasa pada <i>duty cycle</i> 25%	34
Gambar-4.2	Hasil simulasi sinyal pensaklaran tiap fasa pada <i>duty cycle</i> 50%	34
Gambar-4.3	Hasil simulasi sinyal pensaklaran tiap fasa pada <i>duty cycle</i> 75%	35
Gambar-4.4	Hasil simulasi arus fasa 1 (a), arus fasa 2 (b), arus fasa 3 (c), dan arus pengisian baterai (d) pada <i>duty cycle</i> 25%	35
Gambar-4.5	Hasil simulasi arus fasa 1 (a), arus fasa 2 (b), arus fasa 3 (c), dan arus pengisian baterai (d) pada <i>duty cycle</i> 50%	36
Gambar-4.6	Hasil simulasi arus fasa 1 (a), arus fasa 2 (b), arus fasa 3 (c), dan arus pengisian baterai (d) pada <i>duty cycle</i> 75%	37
Gambar-4.7.	Prototype sistem pengereman regeneratif	37
Gambar-4.8.	Hasil percobaan induktansi SRM setiap satu putaran <i>interrupt</i> Pin-Z (a), fasa 1 (b), fasa 2 (c), dan fasa 3 (d)	38

Gambar-4.9.	Hasil percobaan arus fasa dengan <i>single pulse</i> diwakili oleh pulsa 149-304 (a), pulsa 202-304 (b), pulsa 239-304 (c)	39
Gambar-4.10.	Hasil percobaan arus baterai dengan <i>single pulse</i> diwakili oleh pulsa 149-304 (a), pulsa 202-304 (b), pulsa 239-304 (c)	39
Gambar-4.11.	Hasil percobaan arus fasa dengan <i>single pulse</i> pada kecepatan awal 1800 RPM (a), 1500 RPM (b), 1200 RPM (c)	41
Gambar-4.12.	Hasil percobaan arus baterai dengan <i>single pulse</i> pada kecepatan awal 1800 RPM (a), 1500 RPM (b), 1200 RPM (c)	41
Gambar-4.13.	Hasil percobaan sinyal pensaklaran saklar <i>high</i> (a) dan saklar <i>low</i> (b) pada <i>duty cycle</i> 25%	43
Gambar-4.14.	Hasil percobaan tegangan fasa (a), dan arus fasa (b) menggunakan metode <i>magnetizing-demagnetizing</i> pada <i>duty cycle</i> 25%	43
Gambar-4.15.	Hasil percobaan arus fasa 1 (a), arus fasa 2 (b), arus fasa 3 (c), dan arus pengisian baterai (d) dengan menggunakan <i>duty cycle</i> 25%	44
Gambar-4.16.	Hasil percobaan sinyal pensaklaran saklar <i>high</i> (a) dan saklar <i>low</i> (b) pada <i>duty cycle</i> 50%	44

- Gambar-4.17. Hasil percobaan tegangan fasa (a), dan arus fasa (b) 45  
menggunakan metode *magnetizing-demagnetizing* pada  
*duty cycle* 50%
- Gambar-4.18. Hasil percobaan arus fasa 1 (a), arus fasa 2 (b), arus fasa 45  
3 (c), dan arus pengisian baterai (d) dengan menggunakan  
*duty cycle* 50%
- Gambar-4.19. Hasil percobaan sinyal pensaklaran saklar *high* (a) dan 46  
saklar *low* (b) pada *duty cycle* 75%
- Gambar-4.20. Hasil percobaan tegangan fasa (a), dan arus fasa (b) 46  
menggunakan mode *magnetizing-demagnetizing* pada  
*duty cycle* 75%
- Gambar-4.21. Hasil percobaan arus fasa 1 (a), arus fasa 2 (b), arus fasa 47  
3 (c), dan arus pengisian baterai (d) dengan menggunakan  
*duty cycle* 75%



## DAFTAR TABEL

Tabel-3.1. Spesifikasi SRM

22

