

LAPORAN TUGAS AKHIR

IMPLEMENTASI DAN STUDI PERBANDINGAN METODE KONTROL *SINGLE-PULSE* DAN PWM UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI PENGGEREMAN REGENERATIF PADA SRM



Oleh :

**Stanislaus Hans RyanDita
18.F1.0015**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS KATOLIK SOEGIJAPRANATA
SEMARANG**

2022

LAPORAN TUGAS AKHIR

IMPLEMENTASI DAN STUDI PERBANDINGAN METODE KONTROL *SINGLE-PULSE* DAN PWM UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI PENEREMAN REGENERATIF PADA SRM

**Diajukan dalam Rangka Memenuhi
Salah Satu Syarat Memperoleh
Gelar S1 Teknik Elektro**



Oleh :

**Stanislaus Hans RyanDita
18.F1.0015**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS KATOLIK SOEGIJAPRANATA
SEMARANG**

2022

FAKULTAS TEKNIK
Program Studi Teknik Elektro

Jl. Pawiyatan Luhur IV/1 Bendan Duwur Semarang 50234
Telp : (024) 8441555 (hunting) Fax : (024) 8415429 – 8445265
Email : tu.elektro@unika.ac.id



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 "*IMPLEMENTASI DAN STUDI PERBANDINGAN METODE KONTROL SINGLE-PULSE DAN PWM UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI Pengereman Regeneratif pada SRM*", 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,

STANISLAUS HANS RYANDITA

NIM. 18.F1.0015



HALAMAN PENGESAHAN

Judul Tugas Akhir: : IMPLEMENTASI DAN STUDI PERBANDINGAN METODE KONTROL
SINGLE-PULSE DAN PWM UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI
PENEREMAN REGENERATIF PADA SRM

Diajukan oleh : Stanislaus Hans Ryandita

NIM : 18.F1.0015

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.F1.0015

HALAMAN PERNYATAAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Stanislaus Hans RyanDita
Program Studi : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Karya Tugas Akhir

Menyetujui memberikan kepada Universitas Katolik Soegijapranata Semarang Hak Bebas Royalti Non-eksklusif atas karya ilmiah yang berjudul **“IMPLEMENTASI DAN STUDI PERBANDINGAN METODE KONTROL *SINGLE-PULSE* DAN PWM UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI PENEREMAN REGENERATIF PADA SRM”**. Dengan Hak Bebas Royalti Non Eksklusif 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,



Stanislaus Hans RyanDita

18.F1.0015

ABSTRAK

Switched Reluctance Machine (SRM) merupakan penggerak listrik yang sering digunakan pada kendaraan listrik. Pada kendaraan listrik, pengereman regeneratif dibutuhkan untuk meminimalisir energi yang terbuang pada pengereman konvensional sehingga energi yang terbuang dapat dimanfaatkan untuk pengisian baterai. Pengereman regeneratif pada SRM memanfaatkan torka negatif pada rotor ketika menjauh dari belitan stator, sehingga dibutuhkan metode kontrol yang tepat untuk mendapatkan nilai optimum dari pengereman regeneratif. Metode *single-pulse* dan Metode *PWM control* merupakan metode pengereman regeneratif pada SRM yang biasa digunakan. Pada metode operasi *PWM control* mencakup mode *magnetizing-freewheeling* dan *magnetizing-demagnetizing*. Metode *single-pulse* adalah metode yang memberikan satu buah pulsa pada saat eksitasi, kemudian metode *PWM control* adalah metode yang dilakukan dengan memberikan sinyal *PWM* pada saat eksitasi. Kedua metode ini memiliki karakteristik yang sangat berbeda. Pada paper ini akan disajikan hasil uji coba perbandingan kedua metode *single-pulse* dan *PWM control* pada variasi kecepatan yang berbeda yaitu ketika RPM 1200, 1500, dan 1800 untuk menentukan efisiensi penggunaan pengereman regeneratif pada SRM.

Kata Kunci: SRM, *single-pulse*, *magnetizing-freewheeling*, *magnetizing-demagnetizing*, RPM

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yesus Kristus, atas berkat dan karunia-Nya sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik. Skripsi yang berjudul **“IMPLEMENTASI DAN STUDI PERBANDINGAN METODE KONTROL *SINGLE-PULSE* DAN PWM UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI Pengereman Regeneratif pada SRM”** ini disusun untuk memenuhi persyaratan kurikulum strata-1 (S-1) pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Soegijapranata Semarang.

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya atas bantuan yang diberikan, baik bantuan secara langsung maupun bantuan yang secara tidak langsung selama dalam proses penyusunan Tugas Akhir ini. Secara khusus rasa ucapan terimakasih saya berikan kepada :

1. Tuhan Yesus Kristus yang senantiasa memberikan berkat, karunia, serta kekuatan dalam proses pelaksanaan Tugas Akhir dan penyusunan laporan akhir.
2. Orang tua serta kakak yang telah mendoakan dan memberikan dukungan secara moral maupun materiil kepada penulis.
3. Keluarga besar yang telah memberikan doa dan semangat kepada penulis.
4. Bapak Prof. Dr. Ign. Slamet Riyadi, M.T. Selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Katolik Soegijapranata dan sekaligus dosen pembimbing Tugas Akhir, yang telah bersedia membimbing dengan sabar dalam pelaksanaan Tugas Akhir hingga tuntas.

5. Bapak Dr. Leonardus Heru Pratomo, M.T. Selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro yang telah memberikan izin dan menyediakan fasilitas penggunaan laboratorium yang digunakan sebagai penunjang pelaksanaan Tugas Akhir.
6. Bapak Dr. Florentinus Budi Setiawan, M.T., IPM. Selaku dosen Program Studi Teknik Elektro, yang telah memberikan ilmu, semangat dan memberikan dukungan kepada penulis.
7. Bapak Arifin Wibisono, S.T., M.T., Selaku dosen Program Studi Teknik Elektro, yang telah memberikan ilmu, semangat dan memberikan dukungan kepada penulis.
8. Ibu Fransiska Tri Retno selaku Tata Usaha Teknik Elektro yang telah membantu dalam mengurus administrasi dan informasi saat masa perkuliahan.
9. Seluruh Karyawan Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Katolik Soegijapranata
10. Mikhael, Rivos, Andhika, Mayang, dan Ivan sebagai teman seperjuangan melewati masa Tugas Akhir.
11. Teman-teman Teknik Elektro angkatan 2018 yang telah menjadi teman seperjuangan dalam perkuliahan.
12. Teman-teman alumni dan adik tingkat yang selalu mendukung dan mendoakan.

13. Seluruh pihak yang telah membantu dan mendukung penulis dalam menyelesaikan tugas akhir beserta laporan yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa laporan Tugas Akhir 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 laporan Tugas Akhir ini.

Besar harapan penulis semoga laporan Tugas Akhir ini dapat menjadi referensi bagi kemajuan teknologi energi terbarukan di Indonesia.

Semarang, 21 Oktober 2022



Stanislaus Hans RyanDita

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN KEASLIAN LAPORAN TUGAS AKHIR (SKRIPSI)	iii
LEMBAR PENGESAHAN	iv
HALAMAN PERNYATAAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	v
ABSTRAK	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xviii
BAB I	1
PENDAHULUAN	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
BAB II	6
LANDASAN TEORI	6
2.1 Pendahuluan	6

2.2	<i>Switched Reluctance Machine (SRM)</i>	7
2.3	<i>Metode Single-Pulse</i>	11
2.4	<i>Metode Pulse Width Modulation (PWM) Control</i>	12
2.5	Sistem Kendali Digital	13
2.6	<i>Rotary encoder</i>	14
2.7	<i>Insulated-Gate Bipolar Transistor (IGBT)</i>	15
2.8	Catu Daya	16
2.9	<i>Photoelectric coupler</i>	17
2.10	<i>Hall Effect current sensor</i>	18
2.11	Rangkaian <i>Voltage Follower</i>	19
BAB III		20
DESAIN RANCANGAN DAN IMPLEMENTASI METODE KONTROL		
PENGEREMAN REGENERATIF PADA SRM		20
3.1	Pendahuluan	20
3.2	Konsep Pengereman Regeneratif pada SRM	21
3.3	Rangkaian Kendali pada SRM	23
3.4	Rangkaian Konverter <i>Asymmetric 3 Fasa SRM</i>	25
3.5	Rangkaian Sensor Arus LEM LA 50-P	30
3.6	Rangkaian <i>Isolated Power Supply DC-DC</i>	32
3.7	Rangkaian <i>Driver TLP 250</i>	33
BAB IV		35
HASIL DAN PEMBAHASAN		35
4.1	Pendahuluan	35

4.2	Hasil Pengujian Alat	35
4.3	Hasil Pengujian dengan Metode <i>Single-Pulse</i>	37
4.3.1	Hasil Pengujian Alat pada Kecepatan 1200 RPM	40
4.3.2	Hasil Pengujian Alat pada Kecepatan 1500 RPM	42
4.3.3	Hasil Pengujian Alat pada Kecepatan 1800 RPM	43
4.4	Hasil Pengujian dengan Metode <i>PWM Control</i>	44
4.4.1	Hasil Pengujian Alat pada Kecepatan 1200 RPM dengan Metode <i>Magnetizing-Freewheeling</i>	45
4.4.2	Hasil Pengujian Alat pada Kecepatan 1500 RPM dengan Metode <i>Magnetizing-Freewheeling</i>	46
4.4.3	Hasil Pengujian Alat pada Kecepatan 1800 RPM dengan Metode <i>Magnetizing-Freewheeling</i>	47
4.4.4	Hasil Pengujian Alat pada Kecepatan 1200 RPM dengan Metode <i>Magnetizing-Demagnetizing</i>	48
4.4.5	Hasil Pengujian Alat pada Kecepatan 1500 RPM dengan Metode <i>Magnetizing-Demagnetizing</i>	49
4.4.6	Hasil Pengujian Alat pada Kecepatan 1800 RPM dengan Metode <i>Magnetizing-Demagnetizing</i>	50
4.5	Pembahasan	51
	BAB V	53
	PENUTUP	53
5.1	Kesimpulan	53
5.2	Saran	53

DAFTAR PUSTAKA

54

LAMPIRAN

59



DAFTAR GAMBAR

Gambar-2. 1 Konstruksi SRM 12/8	7
Gambar-2. 2 Rangkaian ekivalen SRM	9
Gambar-2. 3 Profil Induktansi SRM	10
Gambar-2. 4 Metode <i>Single-Pulse</i>	11
Gambar-2. 5 Metode <i>PWM Control</i>	13
Gambar-2. 6 Diagram blok sistem digital	14
Gambar-2. 7 Konstruksi <i>rotary encoder</i>	14
Gambar-2. 8 <i>Insulated-Gate Bipolar Transistor</i> (IGBT)	16
Gambar-2. 9 Diagram blok <i>DC power supply</i>	17
Gambar-2. 10 <i>Photoelectric coupler</i>	17
Gambar-2. 11 Diagram blok <i>pin out</i> dari <i>Hall Effect current sensor</i>	18
Gambar-2. 12 Rangkaian <i>Voltage Follower</i>	19
Gambar-3. 1 Skema kendali pada SRM	20
Gambar-3. 2 Konsep pengereman regeneratif	21
Gambar-3. 3 <i>Flowchart</i> dari proses pengereman regeneratif	22
Gambar-3. 4 <i>Wiring</i> mikrokontroler dsPIC30F4012 ke IC <i>buffer</i> 74HC541N	24
Gambar-3. 5 Konverter <i>asymmetric</i> 3 fasa SRM	26
Gambar-3. 6 Mode <i>Magnetizing</i>	27
Gambar-3. 7 Mode <i>Freewheeling</i>	28
Gambar-3. 8 Mode <i>Demagnetizing</i>	29
Gambar-3. 9 Rangkaian sensor arus LEM LA 50-P	31
Gambar-3. 10 Sensor arus clamp	31

Gambar-3. 11 Skema rangkaian <i>isolated power supply</i> DC-DC	32
Gambar-3. 12 Rangkaian <i>driver</i> menggunakan <i>photoelectric coupler</i> TLP 250	33
Gambar-4. 1 Implementasi perangkat keras sistem pengereman regeneratif pada SRM	36
Gambar-4. 2 Hasil impuls arus satu putaran SRM (a) Pin-Z <i>rotary encoder</i> , (b) Arus fasa	37
Gambar-4. 3 Hasil pengujian arus fasa pada metode <i>single-pulse</i> dengan sudut penyalan yang sama (a) 1800 RPM, (b) 1500 RPM, (c) 1200 RPM	38
Gambar-4. 4 Hasil pengujian arus baterai pada metode <i>single-pulse</i> dengan sudut penyalan yang sama (a) 1800 RPM, (b) 1500 RPM, (c) 1200 RPM	39
Gambar-4. 5 Hasil pengujian arus fasa menggunakan metode <i>single-pulse</i> dengan sudut penyalan yang berbeda pada RPM 1800 (a) Sudut 144, (b) Sudut 202, (c) Sudut 244	39
Gambar-4. 6 Hasil pengujian arus baterai menggunakan metode <i>single-pulse</i> dengan sudut penyalan yang berbeda pada RPM 1800 (a) Sudut 144, (b) Sudut 202, (c) Sudut 244	40
Gambar-4. 7 Hasil implementasi prototipe menggunakan metode <i>single-pulse</i> pada RPM 1200 (a) Ia fasa, (b) Ib fasa, (c) Ic fasa, (d) Arus baterai	41
Gambar-4. 8 Hasil simulasi SRM pada kecepatan 1200 RPM (a) Arus baterai (b) Arus fasa (c)Tegangan fasa	41

Gambar-4. 9 Hasil implementasi prototipe menggunakan metode <i>single-pulse</i> pada RPM 1500 (a) Ia fasa, (b) Ib fasa, (c) Ic fasa, (d) Arus baterai	42
Gambar-4. 10 Hasil simulasi SRM pada kecepatan 1500 RPM (a) Arus baterai (b) Arus fasa (c) Tegangan fasa	43
Gambar-4. 11 Hasil implementasi prototipe menggunakan metode <i>single-pulse</i> pada RPM 1800 (a) Ia fasa, (b) Ib fasa, (c) Ic fasa, (d) Arus baterai	43
Gambar-4. 12 Hasil simulasi SRM pada kecepatan 1800 RPM (a) Arus baterai (b) Arus fasa (c) Tegangan fasa	44
Gambar-4. 13 Hasil implementasi prototipe menggunakan metode <i>magnetizing-freewheeling</i> pada RPM 1200 (a) Ia fasa, (b) Ib fasa, (c) Ic fasa, (d) Arus baterai	45
Gambar-4. 14 Hasil implementasi prototipe menggunakan metode <i>magnetizing-freewheeling</i> pada RPM 1500 (a) Ia fasa, (b) Ib fasa, (c) Ic fasa, (d) Arus baterai	46
Gambar-4. 15 Hasil implementasi prototipe menggunakan metode <i>magnetizing-freewheeling</i> pada RPM 1800 (a) Ia fasa, (b) Ib fasa, (c) Ic fasa, (d) Arus baterai	47
Gambar-4. 16 Hasil implementasi prototipe menggunakan metode <i>magnetizing-demagnetizing</i> pada RPM 1200 (a) Ia fasa, (b) Ib fasa, (c) Ic fasa, (d) Arus baterai	48

Gambar-4. 17 Hasil implementasi prototipe menggunakan metode *magnetizing-demagnetizing* pada RPM 1500 (a) Ia fasa, (b) Ib fasa, (c) Ic fasa, (d) Arus baterai 49

Gambar-4. 18 Hasil implementasi prototipe menggunakan metode *magnetizing-demagnetizing* pada RPM 1800 (a) Ia fasa, (b) Ib fasa, (c) Ic fasa, (d) Arus baterai 50



DAFTAR TABEL

Tabel-3. 1 Pensaklaran menggunakan mode <i>magnetizing</i>	27
Tabel-3. 2 Pensaklaran menggunakan mode <i>freewheeling</i>	28
Tabel-3. 3 Pensaklaran menggunakan mode <i>demagnetizing</i>	30
Tabel-4. 1 Spesifikasi SRM	36

