INTEGRASI TURBIN SKALA BESAR DAN PLTS *HYBRID* TIGA FASA UNTUK MENJALANKAN MOTOR LISTRIK *OIL PUMP LUBRICATION* SEBAGAI PENGAMAN MEKANIKAL *GEARBOX* DAN *SHAFT ROTOR* TURBIN

TESIS

Diajukan untuk memenuhi persyaratan

memperoleh gelar Magister Teknik

FAISAL YUSREZA NASUTION

09202409044S

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK DAN ILMU KOMPUTER

UNIVERSITAS GLOBAL JAKARTA

2026

INTEGRASI TURBIN SKALA BESAR DAN PLTS *HYBRID* TIGA FASA UNTUK MENJALANKAN MOTOR LISTRIK *OIL PUMP LUBRICATION* SEBAGAI PENGAMAN MEKANIKAL *GEARBOX* DAN *SHAFT ROTOR* TURBIN

TESIS

Diajukan untuk memenuhi persyaratan

memperoleh gelar Magister Teknik

FAISAL YUSREZA NASUTION

092024090445

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK DAN ILMU KOMPUTER

UNIVERSITAS GLOBAL JAKARTA

2026

PERNYATAAN ORISINALITAS TESIS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa berdasarkan hasil penelusuran berbagaikarya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah tesis ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik disuatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata didalam naskah tesis ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Tesis dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Jakarta, 6 Agustus 2026

Mahasiswa,



Faisal Yusreza Nasution

NPM 092024090445

HALAMAN PENGESAHAN PEMBIMBING

Tesis ini diajukan oleh	:	
Nama	:	Faisal Yusreza Nasution
NIM	:	092024090445
Program Studi	:	Magister Teknik Elektro
Judul Tesis	:	INTEGRASI TURBIN SKALA BESAR DAN PLTS *HYBRID* TIGA FASA UNTUK MENJALANKAN MOTOR LISTRIK *OIL PUMP LUBRICATION* SEBAGAI PENGAMAN MEKANIKAL *GEARBOX* DAN *SHAFT ROTOR* TURBIN

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Magister Teknik Elektro Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Global Jakarta.

DEWAN PEMBIMBING

Pembimbing 1 : Dr. Eng. Yanuar Zulardiansyah Arief, S.T., M.T. ( )

Pembimbing 2 : Hamzah, S.T, M.T., Ph.D ( )

Ketua Program Studi

Magister Teknik Elektro

Hamzah, S.T, M.T., Ph.D

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 6 Agustus 2026

HALAMAN PENGESAHAN DEWAN PENGUJI

Tesis ini diajukan oleh	:	
Nama	:	Faisal Yusreza Nasution
NIM	:	092024090445
Program Studi	:	Magister Teknik Elektro
Judul Tesis	:	INTEGRASI TURBIN SKALA BESAR DAN PLTS *HYBRID* TIGA FASA UNTUK MENJALANKAN MOTOR LISTRIK *OIL PUMP LUBRICATION* SEBAGAI PENGAMAN MEKANIKAL *GEARBOX* DAN *SHAFT ROTOR* TURBIN

Telah berhasil di pertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Magister Teknik Elektro Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Global Jakarta.

DEWAN PENGUJI

Penguji 1 : Dr. Antonius Darma Setiawan, S.Si., M.T. (.....)

Penguji 2 : Dr. Herwanto, S.Kom., M.Si (.....)

Penguji 3 : Prof. Dr. Ir. I Nyoman Jujur, M.Eng (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 6 Agustus 2026

Form I3 – Lembar Monitoring Revisi Sidang Tesis	Revisi ke: 1
	Tanggal revisi: 03 Agustus 2026

LEMBAR MONITORING REVISI SIDANG TESIS

Nama mahasiswa : Faisal Yusreza Nasution

NIM : 092024090445

Jurusan : Magister Tehnik Elektro

Judul Tesis :

Integrasi Turbin Skala Besar dan PLTS Hybrid Tiga Fasa untuk menjalankan Motor Listrik Oil Pump Lubrication sebagai sebagai pengaman mekanikal Gearbox dan Saft Rotor Turbin

Dosen Penguji 1 : Dr. Antonius Darma Setiawan, S.Si., M.T.

No	Isi Komentar/ Saran	Revisi/ jawaban penulis	Paraf Penguji /Tanggal Persetujuan
1	Beberapa revisi judul: • Turbin 3 MW menjadi Turbin Skala Besar • UPS PLTS Hybrid menjadi PLTS Hybrid	Judul sudah diganti sesuai yang disarankan, mohon dilihat pada halan pertama cover	
2	Kembangkan model matematis domain elektrik & mekanikal	Pengembangan model mohon dapat dilihat pada BAB III • Model mekanikal pada sub Bab 3.8.1 (Hal 28) • Model elektrik pada sub Bab 3.8.3 (Hal 29-33)	
3	Tentukan metode metode pengujinya apakah simulasi/ eksperimen atau keduanya	Metode pengujian adalah simulasi, mohon dapat di lihat pada BAB III (3.1), halaman 26	
4	Tulis ulang tesisnya sesuai kaedah penulisan tesis	Semua kaedah pada penulisan tesis ini sudah diperbaiki, mohon dapat di periksa penulisan tesis saya	

Depok, 03 Agustus 2026
Mengetahui,
Ketua Program Studi

(Hamzah, S.T, M.T., Ph.D)
NIK S092023080003

Form I3 – Lembar Monitoring Revisi Sidang Tesis	Revisi ke: 1
	Tanggal revisi: 03 Agustus 2026

LEMBAR MONITORING REVISI SIDANG TESIS

Nama mahasiswa : Faisal Yusreza Nasution

NIM : 092024090445

Jurusan : Magister Tehnik Elektro

Judul Tesis :

Integrasi Turbin Skala Besar dan PLTS Hybrid Tiga Fasa untuk menjalankan Motor Listrik Oil Pump Lubrication sebagai sebagai pengaman mekanikal Gearbox dan Saft Rotor Turbin

Dosen Penguji 2 : Dr. Herwanto, S.Kom., M.Si

No	Isi Komentar/ Saran	Revisi/jawaban penulis	Paraf Penguji /Tanggal Persetujuan
1	Abstrak perlu diperbaiki mencakup latar belakang tujuan metode dan hasil	Abstrak sudah diperbaiki seperti yang disarankan, mohon dapat dilihat pada halaman depan	6/8-26
2	Latar belakang tambahkan apa motivasi sehingga penulisan ini dilakukan	Motivasi latar belakang sudah ditambahkan sesui yang disarankan, mohon dapat dilihat pada lembar Bab 1, dan sub Bab Latar belakang, halaman 1 paling bawah	6/8-26
3	Hasil analisa tidak menjawab tujuan penilitian	Hasil analisa direvisi sesuai yang disarankan dan sudah menjawab tujuan peneilitian, mohon dapat dilihat pada Bab IV seluruhnya, pada halaman 38 dan 41	6/8-26
4	Gambar & tabel perlu di narasikan	Gambar dan tabel sudah direvisi dan dinarasikan sesuai yang di sarankan, mohon dapat dapat dilihat pada halaman xi dan xii	6/8-26

Depok, 03 Agustus 2026
Mengetahui,
Ketua Program Studi

(Hamzah, S.T, M.T., Ph.D)
NIK S092023080003

Form I3 – Lembar Monitoring Revisi Sidang Tesis	Revisi ke: 1
	Tanggal revisi: 03 Agustus 2026

LEMBAR MONITORING REVISI TESIS

Nama mahasiswa : Faisal Yusreza Nasution

NIM : 092024090445

Jurusan : Magister Tehnik Elektro

Judul Tesis :

Integrasi Turbin Skala Besar dan PLTS Hybrid Tiga Fasa untuk menjalankan Motor Listrik Oil Pump Lubrication sebagai sebagai pengaman mekanikal Gearbox dan Saft Rotor Turbin

Dosen Penguji 3 : **Prof. Dr. Ir. I Nyoman Jujur, M.Eng**

No	Isi Komentar/ Saran	Revisi/jawaban penulis	Paraf Penguji /Tanggal Persetujuan
1	Abstrak perlu diperbaiki, belum sesuai isi (Latar belakang, metode, Kesimpulan	Abstrak sudah diperbaiki seperti yang disarankan, mohon dapat dilihat pada halaman depan abstrak vi, Bab I latar belakang hal 1, Bab 3 halaman 26-37, Kesimpulan Bab 5 halaman 42-43	
2	Gambar BAB IV tidak ada penjelasan dalam kalimat	Penjelasan gambar sudah dijelaskan sesuai yang disarankan, mohon dapat dilihat pada Bab 4 sub Bab 4.2 halaman 38 dan 39	
3	Tujuan dan kesimpulan belum nyambung	Tujuan dan kesimpulan sudah direvisi sesuai yang diarahkan, • mohon di dapat diperiksa tujuan pada Bab 1 sub Bab 1.4 halaman 2 • Kesimpulan Bab 5, sub Bab 5.1 dan 5.2, halaman 42 dan 43	

Form I3 – Lembar Monitoring Revisi Sidang Tesis	Revisi ke: 1
	Tanggal revisi: 03 Agustus 2026

No	Isi Komentar/ Saran	Revisi/jawaban penulis	Paraf Penguji /Tanggal Persetujuan
4	Penjelasan desain sistim belum ada penjelasan	Penjelasan desain sistim sudah dijelaskan sesuai yang disarankan, mohon dapat di lihat pada Bab 3, sub Bab 3.8, halaman 28 s/d 35	
5	Analisa sistim belum ada	Analisa sistim sudah dibuat sesuai yang disarankan, mohon dapat di lihat pada Bab 4, sub Bab 4.2, halaman 38 s/d 39	
6	Banyak typo, pustaka tidak nyambung dengan isi	• Seluruh penulisan sudah diperbaiki sesuai yang disarankan, mohon dapat dilihat seluruh Bab • Seluruh daftar pustaka sudah di sesuaikan dengan penulisan tesis, mohon dapat dilihat dapa Daftar Pustaka, pada halaman terakhir no. 44 s/d 45	

Depok, 03 Agustus 2026

Mengetahui,
Ketua Program Studi

(Hamzah, S.T, M.T., Ph.D)
NIK S092023080003

Form B – Lembar Konsultasi Tesis	Revisi ke: 1-3
	Tanggal revisi: 6/6/2026, 10/6/2026,18/6/2026

LEMBAR KONSULTASI TESIS

Nama mahasiswa : Faisal Yusreza Nasution

NIM 092024090445

Judul : Integrasi Turbin Skala Besar dan PLTS *Hybrid* Tiga Fasa untuk menjalankan Motor Listrik *Oil PumpLubrication* sebagai pengaman mekanikal *Gearbox* dan *Shaft Rotor* turbin

Dosen Pembimbing I : Dr. Eng. Yanuar Zulardiansyah Arief, S.T., M.T.

No.	Tanggal	Uraian Kegiatan yang Dilakukan	Paraf Dosen
1	06 Feb 2026	Pengecekan judul tesis yang diajukan, beberapa ada perubahan arahan dari dosen penguji seminar proposal dan di cek kembali oleh pembimbing	yza
2	10 Apr 2026	Pengolahan dan pengecekan kembali dokumen tahap awal setelah revisi tesis, oleh dosen pembimbing	yza
3	24 Apr 2026	Pengolahan dan pengecekan tesis, terkait revisi rumusan masalah dan pendahuluan setelah proposal tesis yang diajukan oleh penguji	yza
4	08 Mei 2026	Pengolahan dan pengecekan tesis, terkait BAB IV dan BAB V, dan langkah-langkah untuk mencari data pendukung	yza
5	05 Jun 2026	Pengolahan dan pengecekan tesis, terkait seluruh isi BAB I-V untuk menganalisa kembali dan langkah-langkah untuk mencari data pendukung, dan revisi dokumen	yza
6	19 Jun 2026	Pengolahan dan pengecekan tesis, persiapan pengajuan sidang tesis dan revisi dokumen dan data BAB V dan daftar pustaka	yza

* Minimal 4 kali pertemuan

Depok, 03 Agustus 2026

Mengetahui,
Ketua Prodi Teknik Elektro

Hamzah, S.T., M.T., Ph.D
NIK S092023080003

Form B – Lembar Konsultasi Tesis	Revisi ke: 1-3
	Tanggal revisi: 6/6/2026, 10/6/2026,18/6/2026

LEMBAR KONSULTASI TESIS

Nama mahasiswa : Faisal Yusreza Nasution

NIM 092024090445

Judul : Integrasi Turbin Skala Besar dan PLTS *Hybrid* Tiga Fasa untuk menjalankan Motor Listrik *Oil PumpLubrication* sebagai pengaman mekanikal *Gearbox* dan *Shaft Rotor* turbin

Dosen Pembimbing II : Hamzah, S.T., M.T., Ph.D

No.	Tanggal	Uraian Kegiatan yang Dilakukan	Paraf Dosen
1	06 Feb 2026	Pengecekan judul tesis yang diajukan, beberapa ada perubahan arahan dari dosen penguji seminar proposal dan di cek kembali oleh pembimbing	
2	10 Apr 2026	Pengolahan dan pengecekan kembali dokumen tahap awal setelah revisi tesis, oleh dosen pembimbing	
3	24 Apr 2026	Pengolahan dan pengecekan tesis, terkait revisi rumusan masalah dan pendahuluan setelah proposal tesis yang diajukan oleh penguji	
4	08 Mei 2026	Pengolahan dan pengecekan tesis, terkait BAB IV dan BAB V, dan langkah-langkah untuk mencari data pendukung	
5	05 Jun 2026	Pengolahan dan pengecekan tesis, terkait seluruh isi BAB I-V untuk menganalisa kembali dan langkah-langkah untuk mencari data pendukung, dan revisi dokumen	
6	19 Jun 2026	Pengolahan dan pengecekan tesis, persiapan pengajuan sidang tesis dan revisi dokumen dan data BAB V dan daftar pustaka	

* Minimal 4 kali pertemuan

Depok, 03 Agustus 2026

Mengetahui,
Ketua Prodi Teknik Elektro

Hamzah,S.T., M.T., Ph.D
NIK S092023080003

KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat- Nya, saya dapat menyelesaikan tesis ini. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik Jurusan Teknik Elektro pada Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan naskah tesis ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan naskah tesis ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Hamzah, S.T, M.T., Ph.D selaku Ketua Prodi Magister Teknik Elektro dan selaku dewan pembimbing 2
2. Bapak Dr. Antonius Darma Setiawan, S.Si., M.T. selaku dewan penguji 1
3. Bapak Dr. Herwanto, S.Kom., M.Si selaku dewan penguji 2
4. Bapak Prof. Dr. Ir. I Nyoman Jujur, M.Eng selaku dewan penguji 3
5. Bapak Dr. Eng. Yanuar Zulardiansyah Arief, S.T., M.T. selaku Pembimbing 1, atas bimbingan dan arahannya.
6. Teman – teman mahasiswa S2 Teknik Elektro JGU atas kerjasamanya.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga tesis ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Depok, 6 Agustus 2026

Penulis



Faisal Yusreza Nasution

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI AKADEMIS

Sebagai sivitas akademika Universitas Global Jakarta, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Faisal Yusreza Nasution

NPM : 092024090445

Program Studi : Magister Teknik Elektro

Jenis Karya Ilmiah : Tesis

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Global Jakarta **Hak Bebas Royalti Non-eksklusif** (*None-exclusive Royalty Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

INTEGRASI TURBIN SKALA BESAR DAN PLTS *HYBRID* TIGA FASA UNTUK MENJALANKAN MOTOR LISTRIK *OIL PUMP LUBRICATION* SEBAGAI PENGAMAN MEKANIKAL *GEARBOX* DAN *SHAFT ROTOR* TURBIN

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti/Noneksklusif ini Universitas Global Jakarta berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat dan mempublikasikan naskah tesis saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Depok, 6 Agustus 2026

Yang menyatakan



Faisal Yusreza Nasution

ABSTRAK

Keandalan sistem pelumasan pada turbin skala besar berperan penting dalam menjaga integritas mekanikal gearbox dan shaft rotor, terutama saat terjadi gangguan jaringan listrik (*grid failure*). Permasalahan utama pada transisi daya adalah munculnya tegangan sisa (*back-EMF*) dan kondisi *out-of-phase re-closing* yang dapat menyebabkan lonjakan arus transien (*inrush current*) serta guncangan torsi yang berpotensi merusak komponen mekanikal turbin. Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik *back-EMF*, mengkuantifikasi *inrush current*, dan mengevaluasi efektivitas algoritma *Synchronous Reference Frame Phase-Locked Loop* (SRF-PLL) pada integrasi PLTS Hybrid tiga fasa untuk mempertahankan kontinuitas operasi motor listrik *oil pump lubrication*. Metode penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis simulasi numerik pada Python 3.x dengan pemodelan motor induksi tiga fasa dalam kerangka acuan *d-q* selama kondisi *dead-time transfer*. Hasil simulasi menunjukkan tegangan sisa meluruh hingga 65% dalam 150 ms, sedangkan *out-of-phase re-closing* menghasilkan *inrush current* sebesar 7,8 p.u. Implementasi algoritma SRF-PLL mampu mengunci fase dalam waktu rata-rata 55 ms dan menurunkan *inrush current* menjadi 1,7 p.u. Dengan demikian, integrasi PLTS Hybrid tiga fasa berbasis SRF-PLL terbukti meningkatkan keandalan sistem serta memberikan perlindungan efektif terhadap gearbox dan shaft rotor turbin.

Kata kunci : PLTS Hybrid tiga fasa, SRF-PLL, *back-EMF*, *inrush current*, motor induksi, sistem pelumasan turbin.

ABSTRACT

The reliability of the lubrication system in large-scale turbines plays a vital role in maintaining the mechanical integrity of the gearbox and rotor shaft, particularly during grid failure conditions. The main challenge during power transfer is the occurrence of residual voltage (back-EMF) and out-of-phase re-closing, which can generate high transient inrush current and torque shock, potentially causing mechanical damage to turbine components. This study aims to analyze the characteristics of back-EMF, quantify the resulting inrush current, and evaluate the effectiveness of the Synchronous Reference Frame Phase-Locked Loop (SRF-PLL) algorithm in the integration of a three-phase hybrid photovoltaic (PV) system to ensure the continuous operation of the electric oil lubrication pump motor. A quantitative simulation-based approach was employed using Python 3.x to model a three-phase induction motor in the d-q synchronous reference frame during the dead-time transfer period. The simulation results show that the residual voltage decays to 65% within 150 ms, while out-of-phase re-closing produces an inrush current of 7.8 p.u. The implementation of the SRF-PLL algorithm achieves phase synchronization within an average of 55 ms and reduces the inrush current to 1.7 p.u. Therefore, the integration of a three-phase hybrid PV system based on SRF-PLL significantly improves system reliability and provides effective mechanical protection for the turbine gearbox and rotor shaft.

Keywords : Three-phase hybrid photovoltaic (PV) system, SRF-PLL, back-EMF, inrush current, induction motor, turbine lubrication system.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL ..... **i**

LEMBAR PENGESAHAN ..... **ii**

KATA PENGANTAR iii

LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH vi

ABSTRAK vii

DAFTAR ISI ix

DAFTAR TABEL xi

DAFTAR GAMBAR xii

DAFTAR SINGKATAN xiii

DAFTAR RUMUS xiv

DAFTAR LAMPIRAN xv

1. PENDAHULUAN **1**
1.1. Latar Belakang 1
1.2. Perumusan Masalah 2
1.3. Batasan Masalah 2
1.4. Tujuan Penelitian 2
1.5. Manfaat Penelitian 2
1.6. Sistematika Penulisan 3

2. TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI **4**
2.1. Tinjauan Pustaka 4
2.2. Landasan Teori 8
2.2.1. Sistem Pelumasan Turbin Skala Besar dan Perlindungan Mekanikal. 8
2.2.2. Karakteristik Tegangan Sisa (Back-EMF) pada Motor Induksi 8
2.2.3. Fenomena Out-of-Phase Re-closing dan Inrush Current 10
2.2.4. Transformasi Park (d-q) untuk Pemodelan Dinamis 10
2.2.5. Mekanisme Kerja Kontrol SRF-PLL. 12
2.2.6. Simulasi Sistem Tenaga Menggunakan Python 3.x 14
2.2.7. Visual Code Studio 16
2.3. Dasar Teoretis yang Digunakan 17
2.4. Definisi Konsep 17
2.5. Penjelasan variable dan indicator 19
2.5.1. Variabel Independen (Variabel Bebas) 19
2.5.2. Variabel Dependen (Variabel Terikat) 19
2.5.3. Variabel kontrol 20
2.5.4. Indikator keberhasilan penelitian 20
2.6. Kerangka pemikiran 21
2.7. Rumusan hipotesa 21
2.8. Arsitektur system integrase dan skema interkoneksi 22

3. METODE PENELITIAN **24**

3.1. Jenis Penelitian dan Pendekatan 24
3.2. Fokus Penelitian 24
3.3. Peralatan dan Bahan..... 24
3.4. Framework / Alur Penelitian..... 25
3.5. Lokasi dan Objek Penelitian 25
3.6. Penetuan Populasi dan Sampel..... 25
3.7. Teknik Pengumpulan Data..... 25
3.8. Perancangan Model Matematis dan Algoritma Python 26
3.8.1. Model Dinamis Motor Induksi dalam Kerangka Acuan $d-q$..... 26
3.8.2. Implementasi Logika Algoritma pada Python 3 27
3.8.3. Algoritma Kontrol SRF-PLL (*Phase-Locked Loop*)..... 29
3.8.4. Kuantifikasi Inrush Current (Lonjakan Arus)..... 30
3.8.5. Model Matematis Domain Elektrik..... 30
3.8.6. Model Matematis Domain Mekanikal..... 31
3.8.7. Diskretisasi Numerik (Metode Runge-Kutta)..... 31
3.9. Uji Keabsahan Data 35
3.9.1. Verifikasi Model Matematis (*Code Verification*) 35
3.9.2. Validasi Teoretis Karakteristik Peluruhan (*Cross-Validation*)..... 35
3.9.3. Uji Konsistensi Numerik dan Konvergensi 35
3.9.4. Komparasi Standar Keamanan Industri..... 36
3.9.5. Analisis Sensitivitas Parameter..... 36
4. HASIL DAN PEMBAHASAN 37
4.1. Gambaran Umum Objek Penelitian..... 37
4.2. Penyajian Hasil Penelitian..... 37
4.2.1. Analisis Pemodelan Dinamis Motor Induksi melalui Python 3..... 37
4.2.2. Kuantifikasi Lonjakan Arus (*Inrush Current Peak*) 38
4.2.3. Analisis Sensitivitas Sudut Fase terhadap Magnitudo Arus Transien 39
4.2.4. Karakteristik Dinamis Torsi Elektromagnetik (Te) & Arus Transien Tanpa Sinkronisasi 39
4.3. Pembahasan..... 41
4.3.1. Interpretasi Fenomena Transien terhadap Keamanan Mekanikal..... 41
4.3.2. Validasi Algoritma Integrasi Numerik..... 42
4.3.3. Perbandingan dengan Teori dan Penelitian Terdahulu..... 42
5. KESIMPULAN DAN SARAN 44
5.1. Kesimpulan 44
5.2. Saran 45

DAFTAR PUSTAKA 46

LAMPIRAN LAMPIRAN 48

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. State of the art 4
Tabel 2.2. Research gap analisis dan sintesis 6

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi (T-Model).....9

Gambar 2.2 Transformasi *Park Invers*.....10

Gambar 2.3 Diagram Blok Kontrol SRF-PLL pada Kerangka Acuan Sinkron.....12

Gambar 2.4 Ilustrasi *Single Line Diagram*.....22

Gambar 4.1 Profil Arus Transien Stator *iqs* Hasil Simulasi Python 3.....38

Gambar 4.2 Karakteristik Dinamis Torsi Elektromagnetik (*Te*) saat Transisi Daya Tanpa Sinkronisasi.....39

DAFTAR SINGKATAN

No	Singkatan	Keterangan
1	AC	Alternating Current (Arus Bolak-Balik)
2	AI	Artificial Intelligence
3	Back-EMF	Back-Electromotive Force (Tegangan Sisa)
4	CB	Circuit Breaker (Pemutus Tenaga)
5	DC	Direct Current (Arus Searah)
6	DSP	Digital Signal Processor
7	EMS	Energy Management System (Sistem Manajemen Energi & Kontrol)
8	ESS	Energy Storage System (Sistem Penyimpanan Energi / Baterai)
9	GUI	Graphical User Interface (Antarmuka Pengguna Grafis)
10	HIL	Hardware-in-the-Loop
11	IDE	Integrated Development Environment (Lingkungan Pengembangan Terpadu)
12	IEC	International Electrotechnical Commission
13	IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
14	LOP	Lubricating Oil Pump (Pompa Lubrikasi)
15	LV	Low Voltage (Tegangan Rendah)
16	MV	Medium Voltage (Tegangan Menengah)
17	ODE	Ordinary Differential Equation (Persamaan Diferensial)
18	PI	Proportional-Integral (Pengontrol Proporsional-Integral)
19	PLTS	Pembangkit Listrik Tenaga Surya
20	PV	Photovoltaic (Fotovoltaik)
21	RK45	Runge-Kutta Orde 4 dan 5 (Metode integrasi numerik)
22	SLD	Single Line Diagram
23	VCO	Voltage Controlled Oscillator

DAFTAR RUMUS

Rumus 2.1 Konstanta Waktu *Rotor Open-Circuit*..... 8
Rumus 2.2 *Matriks Transformasi Park Invers*..... 11
Rumus 2.3 Komponen Tegangan Sumbu α..... 11
Rumus 2.4 Komponen Tegangan Sumbu β..... 11
Rumus 2.5 Frekuensi Nominal Sistem..... 13
Rumus 3.1 Tegangan Stator Sumbu q..... 26
Rumus 3.2 Tegangan Stator Sumbu d..... 26
Rumus 3.3 Tegangan Rotor Sumbu q..... 26
Rumus 3.4 Tegangan Rotor Sumbu d..... 26
Rumus 3.5 Estimasi Kecepatan Sudut (Δω)..... 29
Rumus 3.6 Estimasi Sudut Fase (θˆ)..... 29
Rumus 3.7 Lonjakan Arus Transien *(Inrush Current)*..... 30
Rumus 3.8 Persamaan Tegangan Stator Sumbu q (Domain Elektrik)..... 30
Rumus 3.9 Persamaan Tegangan Stator Sumbu d (Domain Elektrik)..... 30
Rumus 3.10 Persamaan Tegangan Rotor Sumbu q (Domain Elektrik)..... 31
Rumus 3.11 Persamaan Tegangan Rotor Sumbu d (Domain Elektrik)..... 31
Rumus 3.12 Torsi Elektromagnetik Motor..... 31
Rumus 3.13 Dinamika Kecepatan Sudut Rotor..... 31

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Lampiran 1 Kode Program Simulasi (Python 3.X)..... 48
Lampiran 2 Spesifikasi Teknis Objek Penelitian (*Data Sheet)*..... 53
Lampiran 3 Matriks Ruang Keadaan (*State-Space Matrix*)..... 56
Lampiran 4 Sampel Data Mentah Hasil Simulasi Numerik..... 58

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Operasional turbin skala besar sangat bergantung pada kontinuitas sistem pelumasan untuk menjaga integritas mekanikal pada *gearbox* dan *shaft* rotor. Kegagalan sistem pelumasan saat turbin masih berputar, terutama dalam kondisi penghentian mendadak (*coasting down*), dapat mengakibatkan gesekan logam secara langsung yang memicu kerusakan fatal. Menurut Gnanasekar et al. (2023), keandalan sistem daya cadangan pada industri kritikal sangat menentukan masa pakai komponen mekanis yang bekerja pada putaran tinggi.

Salah satu solusi yang berkembang adalah pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *Hybrid* tiga fasa. Namun, transisi daya dari *grid* utama ke UPS *hybrid* saat terjadi kegagalan jaringan (*grid failure*) menyisakan tantangan teknis serius. Ketika suplai terputus, motor induksi penggerak pompa tidak langsung berhenti, melainkan menghasilkan tegangan sisa atau *back-EMF*. Jika inverter UPS mengambil alih daya tanpa sinkronisasi fase yang tepat, akan terjadi fenomena *out-of-phase re-closing*. Penelitian oleh Wang et al. (2021) menunjukkan bahwa perbedaan sudut fase yang besar saat *re-closing* dapat menghasilkan lonjakan arus transien (*inrush current*) yang mencapai berkali-kali lipat dari arus nominal, yang berisiko merusak unit inverter dan mempercepat degradasi isolasi motor.

Oleh karena itu, diperlukan integrasi algoritma kontrol *In-Phase Transfer* berbasis *Synchronous Reference Frame Phase-Locked Loop* (SRF-PLL). Teknik ini memungkinkan *inverter* untuk mendeteksi fase tegangan sisa secara *real-time* dan menyesuaikan *output*-nya sebelum sakelar statis ditutup (Li & Cheng, 2022). Dengan pendekatan ini, keamanan mekanikal turbin dapat terjamin melalui sistem lubrikasi yang tetap berjalan stabil tanpa risiko kegagalan elektrikal pada masa transisi.

1.2. Perumusan Masalah

1. Bagaimana karakteristik peluruhan tegangan sisa (*back-EMF*) dan pergeseran sudut fase (*phase displacement*) pada terminal stator motor induksi pompa lubrikasi selama *dead-time transfer* saat *grid failure*?
2. Seberapa besar magnitudo lonjakan arus transien (*inrush current peak*) yang terjadi akibat fenomena *out-of-phase re-closing* saat UPS *hybrid* mengambil alih daya motor tanpa penyelarasan fase?
3. Bagaimana efektivitas implementasi algoritma kontrol *In-Phase Transfer* berbasis SRF-PLL pada inverter UPS dalam mereduksi lonjakan arus transien tersebut agar memenuhi batas aman operasi?

1.3. Batasan Masalah

1. Objek penelitian dibatasi pada motor induksi tiga fasa penggerak pompa lubrikasi turbin.
2. Analisis hanya dilakukan pada fase transisi daya (*dead-time transfer*) antara putusnya *grid* hingga masuknya daya dari UPS.
3. Strategi sinkronisasi yang digunakan terbatas pada metode SRF-PLL.

1.4. Tujuan Penelitian

1. Menganalisis karakteristik laju peluruhan tegangan sisa (*back-EMF*) dan pergeseran sudut fase pada terminal motor pompa lubrikasi selama fase *dead-time transfer* melalui simulasi domain waktu.
2. Mengkuantifikasi besaran lonjakan arus transien (*inrush current*) yang dihasilkan pada kondisi terburuk (*out-of-phase re-closing*) saat pengalihan daya ke UPS dilakukan.
3. Merancang dan menguji efektivitas algoritma kontrol sinkronisasi SRF-PLL pada inverter UPS untuk meredam *inrush current* saat proses transisi daya terjadi.

1.5. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi berupa prosedur teknis dalam mengintegrasikan PLTS *Hybrid* sebagai pengaman sistem turbin. Manfaat praktisnya adalah mencegah kerusakan pada *gearbox* turbin melalui sistem

lubrikasi yang andal serta memperpanjang usia pakai *inverter* dengan meminimalkan stres akibat lonjakan arus transien.

1.6. Sistematika Penulisan

Penulisan dilakukan dengan susunan yang secara umum dapat menjelaskan permasalahan secara terperinci dengan urutan sebagai berikut:

BAB I. PENDAHULUAN

Pada bab ini terdiri atas latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini terdiri atas dasar-dasar teori yang diambil dari buku-buku serta jurnal-jurnal dan sumber lain sebagai pedoman penelitian. Dan terdapat informasi singkat beberapa hasil penelitian sebelumnya yang relevan.

BAB III. METODE PENELITIAN

Bab ini terdiri atas metode pengumpulan data, diagram alir penelitian, alat dan bahan, alat ukur dan uji validitas, titik pengukuran, pengambilan data, analisis data dan jadwal kegiatan penelitian.

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini berisi analisis dan hasil penelitian berupa data yang diperoleh dari hasil penelitian.

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil pengamatan selama melakukan proses penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

Berisi tentang daftar buku-buku, jurnal-jurnal, dan berbagai sumber lain yang digunakan dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Chapman, S. J. (2012*). Electric Machinery Fundamentals (5th ed.).* New York: McGraw-Hill.

Gnanasekar, K., Chokkalingam, B., & Padmanaban, S. (2023). *Reliable Power Backup Strategies for Industrial Critical Loads: A Review on Hybrid Renewable Integration.* IEEE Access, Vol. 11, 34567–34589.

Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., dkk. (2020). *Array Programming with NumPy. Nature*, Vol. 585, No. 7825, 357–362.

Johnson, B. (2017). *Professional Visual Studio 2017*. Hoboken: John Wiley & Sons.

Krause, P. C., Wasynczuk, O., Sudhoff, S. D., & Pekarek, S. (2013*). Analysis of Electric Machinery and Drive Systems (3rd ed.).* IEEE Press & John Wiley & Sons.

Li, Z., & Cheng, M. (2022). *Advanced SRF-PLL Synchronization Control for Seamless Transition of UPS in Microgrid Applications. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, Vol. 10, No. 3, 612–625.

Microsoft. (2023). *Visual Studio IDE Documentation. Microsoft Learn.*

Python Software Foundation. (2026). Python 3 Documentation.

Randolph, N., Gardner, D., Minutillo, M., & Anderson, C. (2010). *Professional Visual Studio 2010.* Wrox.

Rodriguez, P., et al. (2020*). Transient Analysis of Induction Motors During Fast Bus Transfer in Industrial Plants. Energies*, Vol. 13, No. 12, 3145.

SciPy Community. (2024). *scipy.integrate.solve*_ivp. SciPy

Documentation.Troelsen, A., & Japikse, P. (2022). Pro C# 10 with .NET 6: *Foundational Principles and Practices in Programming (11th ed.).* New York: Apress.

Van Rossum, G., & Drake, F. L. (2009). *Python 3 Reference Manual. CreateSpace.*

Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., dkk. (2020). SciPy 1.0: *Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. Nature Methods,* Vol. 17, No. 3, 261–272.

Wang, Y., et al. (2021). *Mitigation of Inrush Current in Induction Motors During Out-of-Phase Reclosing Using Predictive Control. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,* Vol. 128, 106721.

Zhang, L., & Garcia, P. (2020). *Modeling and Simulation of Residual Voltage Decay in Industrial Induction Motors. IEEE Transactions on Industry Applications,* Vol. 56, No. 4, 4512–4522.