

**ANALISIS SISTEM PROTEKSI GENERATOR PADA PEMBANGKIT
LISTRIK TENAGA GAS (PLTG) TELLO**



MUHAMMAD RAMDAN KAMSURYA

105821102920

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR

2025

**ANALISIS SISTEM PROTEKSI GENERATOR PADA PEMBANGKIT
LISTRIK TENAGA GAS (PLTG) TELLO**

SKRIPSI

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mendapatkan Gelar Sarjana Teknik

(S.T) Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik

Universitas Muhammadiyah Makassar

Disusun dan Diajukan Oleh:

MUHAMMAD RAMDAN KAMSURYA

105821102920

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR

2025



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan untuk memenuhi syarat ujian guna memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.

Judul Skripsi : **ANALISIS SISTEM PROTEKSI GENERATOR PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GAS (PLTG) TELLO**

Nama : M. Ramdan Kamsurya

Stambuk : 10582 11029 20

Makassar, 25 Agustus 2025

Telah Diperiksa dan Disetujui
Oleh Dosen Pembimbing;

Pembimbing I

Andi Fharuddin, S.T., M.T.
NIP.132169986

Pembimbing II

Ir. Abdul Hafid, M.T.
NIP. 0019086209

Mengetahui,

Ketua Prodi Teknik Elektro



Ir. Adnan, S.T., M.T., IPM
NBM. 1044 202





MAJELIS PENDIDIKAN TINGGI PIMPINAN PUSAT MUHAMMADIYAH
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR
FAKULTAS TEKNIK



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

PENGESAHAN

Skripsi atas nama **M. Ramdan Kamsurya** dengan nomor induk Mahasiswa 105 82 11029 20, dinyatakan diterima dan disahkan oleh Panitia Ujian Tugas Akhir/Skripsi sesuai dengan Surat Keputusan Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar Nomor : 0004/SK-Y/20201/091004/2025, sebagai salah satu syarat guna memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar pada hari Sabtu 16 Agustus 2025.

Panitia Ujian :

1. Pengawas Umum

Makassar,

02 Rabiul Awwal 1447 H

25 Agustus 2025 M

a. Rektor Universitas Muhammadiyah Makassar

Dr. Ir. H. Abd. Rakhim Nanda, ST., MT., IPU

b. Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar

Prof. Dr. Eng. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T., ASEAN, Eng

2. Penguji

a. Ketua

: Rizal Andiyat Duyo, S.T., MT

b. Sekertaris

: Dr. Ir. Ridwang, S.Kom., MT

3. Anggota

1. Lisa Fitriadi Ishak, ST., MT

2. St. Khadijah, ST., M.Kom

3. Dr. Ir. Zahir Zainuddin, M.Sc

Mengetahui :

Pembimbing I

Pembimbing II

Andi Fharuddin, S.T., M.T
NIP. 132169986

Ir. Abdul Hafid, M.T
NIP. 0019086209

Dekan



Ir. Muhammad Syafa'at S Kuba, S.T., M.T., IPM

NBM : 975 288

Gedung Menara Iqra Lantai 3

Jl. Sultan Alauddin No. 259 Telp. (0411) 866 972 Fax (0411) 865 588 Makassar 90221

Web: <https://teknik.unismuh.ac.id/>, e-mail: teknik@unismuh.ac.id



KATA PENGANTAR

Syukur Alhamdulillah penulis panjatkan kehadiran Allah SWT. karena rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyusun proposal ini, dan dapat kami selesaikan dengan baik.

Proposal ini disusun sebagai salah satu persyaratan akademik yang harus ditempuh dalam penyelesaian studi pada jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar. Adapun judul tugas akhir kami adalah: **“Analisis Sistem Proteksi Generator pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) Tello”**.

Dalam penyusunan proposal ini, penulis menghadapi beberapa hambatan, termasuk keterbatasan literatur yang relevan dengan penelitian ini dan keterbatasan kemampuan dari penulis. Penulis juga ingin menyampaikan apresiasi dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. H. Abd. Rakhim Nanda, S.T., M.T., IPU. Selaku Rektor Universitas Muhammadiyah Makassar.
2. Ibu Ir. Muh. Syafaat S Kuba, S.T, M.T.,IPM. Selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.
3. Ibu Ir. Adriani, S.T., M.T., IPM. Selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Makassar.
4. Bapak Andi Fharuddin, S.T., M.T Selaku Pembimbing I dan Bapak Ir. Abd Hafid, M.T Selaku Pembimbing II dalam penyusunan tugas akhir Univversitas Muhammadiyah Makassar.

5. Seluruh Bapak dan Ibu dosen Serta Staf Pegawai Fakultas Teknik atas segala waktunya telah mendidik dan melayani penulis selama mengikuti proses belajar mengajar di Universitas Muhammadiyah Makassar.
6. Keluarga, Kerabat dan Teman-teman kami serta semua pihak yang telah membantu baik secara langsung maupun secara tidak langsung.

Penulis menyadari bahwa penyusunan tugas akhir ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun untuk perbaikan penulisan ini di masa mendatang, agar tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan penulis sendiri.

Makassar, 16 Juli 2024

Peneliti

ANALYSIS OF GENERATOR PROTECTION SYSTEM AT THE TELLO GAS TURBINE POWER PLANT (PLTG TELLO)

Muhammad Ramdan Kamsurya¹, Andi Faharuddin², Abdul Hafid³

*Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Muhammadiyah University of
Makassar*

*e-mail: kamsirya@gmail.com¹, afaharuddin@gmail.com²,
abdulhafid@unismuh.ac.id³,*

This study analyzes the performance of the generator protection system in Unit 1 of the Tello Gas Turbine Power Plant (PLTG Tello). The reliability of a generator protection system is crucial to prevent equipment damage and ensure continuous power supply. The focus of this research is to evaluate the performance of the Phase TOC Voltage Restrained Unit relay (51P), Generator Unbalance relay (46), Undervoltage relay (27P), and Overvoltage relay (59P) based on both field test results and theoretical calculations, referring to IEEE C37.102-2006 and IEC 60255 standards. The research method employed is a descriptive quantitative approach, with data collected through document analysis of relay test results using an OMICRON CMC 356 testing device. The findings indicate that the 27P and 59P relays meet the standards with an error below 1%, whereas the 51P and 46 relays show discrepancies, particularly under low current conditions, with trip time deviations of up to 44.3% for 51P and an average above 80% for 46. These results highlight the need for optimization of settings, calibration, and revalidation of protection parameters to improve system reliability. This study is expected to serve as a reference for the management and maintenance of generator protection systems at PLTG Tello.

Keywords: Generator Protection, Protection Relay, PLTG Tello, IEEE C37.102, IEC 60255.

ANALISIS SISTEM PROTEKSI GENERATOR PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GAS (PLTG) TELLO

Muhammad Ramdan Kamsurya¹, Andi Faharuddin², Abdul Hafid³

¹²³⁴Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Makassar

e-mail: kamsirya@gmail.com¹, afaharuddin@gmail.com²,
abdulhafid@unismuh.ac.id³,

Penelitian ini membahas analisis kinerja sistem proteksi generator pada Unit 1 Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) Tello. Keandalan sistem proteksi generator sangat penting untuk mencegah kerusakan peralatan dan menjaga kontinuitas pasokan listrik. Fokus penelitian ini adalah pada evaluasi performa relai *Phase TOC Voltage Restrained Unit* (51P), relai *Generator Unbalance* (46), relai *Undervoltage* (27P), dan relai *Overvoltage* (59P) berdasarkan hasil pengujian di lapangan dan perhitungan teoritis yang mengacu pada standar *IEEE C37.102-2006* dan *IEC 60255*. Metode penelitian yang digunakan adalah metode kuantitatif deskriptif dengan teknik pengumpulan data melalui studi dokumen hasil uji relai menggunakan perangkat OMICRON CMC 356. Hasil penelitian menunjukkan bahwa relai 27P dan 59P memenuhi standar dengan error di bawah 1%, sedangkan relai 51P dan 46 menunjukkan ketidaksesuaian, khususnya pada kondisi arus rendah, dengan selisih waktu trip hingga 44,3% untuk 51P dan rata-rata di atas 80% untuk 46. Temuan ini menunjukkan perlunya optimasi setting, kalibrasi, dan validasi ulang parameter proteksi untuk meningkatkan keandalan sistem. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam pengelolaan dan pemeliharaan sistem proteksi generator di PLTG Tello.

Kata kunci: Proteksi Generator, Relai Proteksi, PLTG Tello, IEEE C37.102, IEC 60255.

DAFTAR ISI

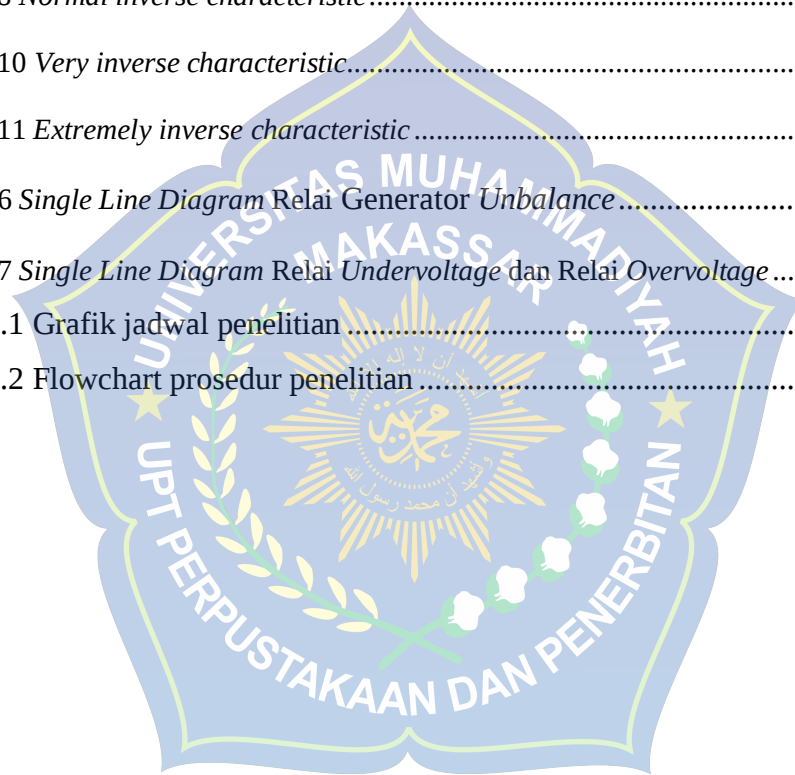
SAMPUL	i
KATA PENGANTAR	ii
ABSTRACT.....	
ABSTRAK	
DAFTAR ISI.....	iv
DAFTAR GAMBAR.....	v
DAFTAR TABEL.....	vi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penelitian	4
1.4. Manfaat Penelitian	4
1.5. Batasan Masalah	4
1.6. Sistematika Penulisan.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1. PLTG	7
2.1.1. PLTG TELLO.....	9
2.1.2. Fungsi Utama PLTG Tello	10
2.2. Generator	11
2.2.2. Generator Unit 1 PLTG Tello	11
2.3. Sistem Proteksi	14

2.4. Relai Proteksi Generator	16
2.5. Relai Multilin UR G60.....	19
2.6. Relai <i>Phase TOC Voltage Restrained Unit</i> (51PV).....	21
1.6.1. Invers Relai <i>Phase TOC Voltage Restrained Unit</i>	22
2.7. Relay Generator <i>Unbalance</i> (46).....	27
2.8. Relay <i>Undervoltage</i> (27P) dan Relay <i>Overvoltage</i> (59P)	28
2.9. Standar Internasional Relai Proteksi Generator	31
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	30
3.1. Tempat dan Waktu Penelitian.....	30
3.2. Metode Penelitian	30
3.3. Objek Penelitian.....	31
3.4. Teknik Pengumpulan Data.....	31
3.5. Langkah Penelitian.....	32
3.6. Teknik Analisis Data	33
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	37
4.1. Sistem Proteksi Generator PLTG Tello	37
4.1.1. Relai Proteksi yang Digunakan.....	37
4.2. Data Hasil Pengujian Relai Proteksi	38
4.2.1. Relai <i>Phase TOC Voltage Restrained</i> (51PV)	39
4.2.2. Relai <i>Generator Unbalance</i> (46).....	40
4.2.3. Relai <i>Undervoltage</i> (27P) dan <i>Overvoltage</i> (59P).....	41
4.3. Hasil Perhitungan Relai Proteksi	42

4.3.1. Perhitungan <i>Setting Relay Phase TOC Voltage Restrained Unit</i> (51PV)	42
4.3.2. Perhitungan <i>Setting Relay Generator Unbalance</i> (46)	44
4.3.3. Perhitungan <i>Setting Relay Undervoltage</i> (27P) dan <i>Overvoltage</i> (59P)	47
4.4. Perbandingan Hasil Perhitungan dan Hasil Pengujian.....	49
4.4.1. Perbandingan Hasil Perhitungan dan Hasil Uji <i>Relay Phase TOC Voltage Restrained Unit</i> (51PV)	49
4.4.2. Perbandingan Hasil Perhitungan dan Hasil Uji Relai <i>Generator Unbalance</i> (46).....	51
4.4.3. Perbandingan Hasil Perhitungan dan Hasil Uji Relai <i>Undervoltage</i> (27P) dan <i>Overvoltage</i> (59P)	52
4.5. Evaluasi Kesesuaian dengan Standar.....	54
4.5.1. Standar Acuan.....	54
4.5.2. Analisis Perbandingan Hasil Perhitungan dan Pengujian	55
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	57
5.1. Kesimpulan	57
5.2. Saran	58
DAFTAR PUSTAKA	59
LAMPIRAN	62

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Prinsip Kerja PLTG	7
Gambar 2.2 lokasi Unit PLTG Tello	9
Gambar 2.3 Relai Multilin UR G60.....	19
Gambar 2.4 <i>Single Line Diagram</i> Sistem Proteksi Generator	19
Gambar 2.5 <i>Single Line Diagram</i> Relai <i>Phase TOC Voltage Restrained</i>	21
Gambar 2.8 <i>Normal inverse characteristic</i>	24
Gambar 2.10 <i>Very inverse characteristic</i>	25
Gambar 2.11 <i>Extremely inverse characteristic</i>	26
Gambar 2.6 <i>Single Line Diagram</i> Relai Generator <i>Unbalance</i>	27
Gambar 2.7 <i>Single Line Diagram</i> Relai <i>Undervoltage</i> dan Relai <i>Overvoltage</i>	28
Gambar 3.1 Grafik jadwal penelitian	31
Gambar 3.2 Flowchart prosedur penelitian	33



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Data Deskripsi Generator Unit 1 PLTG Tello.....	11
Tabel 2.2 Keterangan <i>Single Line Diagram</i> Sistem Proteksi Generator	20
Tabel 2.3 Nilai Konstanta α dan β	23
Tabel 4.1 Hasil Uji <i>Relay Phase TOC Voltage Restrained</i> (51PV)	39
Tabel 4.2 Tabel Hasil Uji Relai <i>Generator Unbalance</i> (46).....	40
Tabel 4.3 Tabel Hasil Uji Relai <i>Undervoltage</i> (27P)	31
Tabel 4.4 Tabel Hasil Uji Relai <i>Overvoltage</i> (59P)	31
Tabel 4.5 Perbandingan Hasil Perhitungan dan Hasil Pengujian Relai 51PV.	49
Tabel 4.6 Perbandingan Hasil Perhitungan dan Hasil Pengujian Relai 46.....	51
Tabel 4.7 Perbandingan Hasil Perhitungan dan Hasil Pengujian Relai 27P dan Relai 59P	52

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Di Indonesia, Perusahaan Listrik Negara (PLN) bertanggung jawab atas penyediaan dan distribusi listrik bagi masyarakat. PLN mengelola berbagai jenis pembangkit listrik, termasuk PLTG Tello, untuk memastikan suplai listrik yang cukup dan merata di seluruh wilayah Indonesia. PLN menghadapi tantangan besar dalam menjaga keandalan jaringan listrik di tengah meningkatnya permintaan listrik dan kondisi geografis yang bervariasi. Oleh karena itu, efisiensi dan keandalan sistem pembangkit, termasuk sistem proteksi generator listrik, menjadi fokus utama.

Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) Tello adalah pembangkit listrik yang memanfaatkan gas untuk menggerakkan turbin gas yang dikopel langsung dengan generator, sehingga generator tersebut dapat menghasilkan listrik. PLTG Tello memiliki keunggulan dalam hal efisiensi dan kecepatan respons terhadap perubahan beban dibandingkan dengan pembangkit listrik konvensional lainnya. Oleh karena itu, PLTG Tello sering digunakan sebagai sumber listrik tambahan saat permintaan listrik mencapai puncaknya atau sebagai pembangkit listrik utama di daerah yang membutuhkan pasokan listrik stabil dan cepat (Ramadhika 2019).

Dalam Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) Tello, generator memiliki peran penting dalam mengubah 2umeri mekanis menjadi 2umeri listrik yang dapat digunakan (Alamsyah, Notosudjono, and Soebagia 2017). Keandalan dan keselamatan operasi generator sangat bergantung pada sistem proteksi yang efektif. Relai proteksi generator memainkan peran penting dalam mendeteksi gangguan seperti overvoltage, undervoltage, ketidakseimbangan arus, dan gangguan fasa, serta memberikan respon protektif yang diperlukan. Tanpa proteksi yang memadai, gangguan ini dapat menyebabkan kerusakan serius pada generator dan mengganggu kontinuitas pasokan listrik. Oleh karena itu, pengujian performa relay proteksi generator menjadi langkah penting untuk memastikan bahwa alat proteksi ini dapat berfungsi dengan optimal dalam berbagai kondisi operasional.

Relai (*relay*) adalah komponen penting dalam sistem proteksi generator. Relai berfungsi untuk mendeteksi gangguan pada sistem kelistrikan dan memberikan sinyal kepada perangkat lain untuk melakukan tindakan yang diperlukan, seperti memutus aliran listrik atau mengaktifkan sistem cadangan. Performa relai yang optimal sangat penting untuk memastikan keandalan sistem proteksi generator. Gangguan pada relai dapat menyebabkan kegagalan sistem proteksi, yang mengakibatkan kerusakan pada generator dan bahkan dapat menyebabkan pemadaman listrik.

Penelitian ini berfokus pada evaluasi performa relai *Phase TOC Voltage Restrained Unit*, relai *Generator Unbalance*, relai *Undervoltage*, dan relai *Overvoltage* yang digunakan pada generator. Evaluasi performa relai ini dilakukan dengan melakukan pengujian terhadap beberapa parameter, seperti pickup, waktu operasi, reset, dan keandalan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji performa relai proteksi generator melalui serangkaian uji coba dan analisis.

Penelitian ini penting dilakukan sebagai validasi hasil pengujian Relai *Phase TOC Voltage Restrained Unit*, Relai *Generator Unbalance*, serta Relai *Undervoltage* dan *Overvoltage* untuk memastikan kinerjanya dalam mendeteksi gangguan secara akurat dan andal serta memastikan apakah kinerja Relai sudah memenuhi standar. Validasi ini diperlukan agar relai dapat bekerja secara optimal dalam melindungi generator dari kerusakan dan menjaga kontinuitas pasokan listrik. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk menambah pemahaman terhadap karakteristik dan cara kerja masing-masing relai yang diuji, sehingga setting proteksi dapat disesuaikan dengan kondisi operasional yang sebenarnya. Dengan pemahaman yang lebih baik, keandalan sistem proteksi dapat ditingkatkan dan risiko kegagalan dapat diminimalkan. Oleh karena itu, analisis ini tidak hanya menjamin keamanan dan keandalan proteksi generator, tetapi juga berkontribusi pada efisiensi operasional di Pembangkit Listrik Tenaga Gas Tello.

1.2. Rumusan Masalah

1. Secara teoritis bagaimana performa dari Relai yang diuji oleh PLN, yaitu performa dari hasil pengujian Relai *Phase TOC Voltage Restrained Unit*, pengujian Relai Generator *Unbalance*, dan pengujian Relai *Undervoltage* dan *Overvoltage*?
2. Secara teoritis apakah performa Relai yang diuji sudah sesuai dengan standar?.

1.3. Tujuan Penelitian

1. Mengevaluasi performa dari Relai yang diuji oleh PLN, yaitu Relai *Phase TOC Voltage Restrained Unit*, Relai Generator *Unbalance*, dan Relai *Undervoltage* dan Relai *Overvoltage*.
2. Menentukan apakah performa Relai yang diuji oleh PLN sudah sesuai dengan standar.

1.4. Manfaat Penelitian

1. Mengkonfirmasi hasil pengujian Relai *Phase TOC Voltage Restrained Unit*, Relai Generator *Unbalance*, dan Relai *Undervoltage* dan *Overvoltage*.
2. Meningkatkan pemahaman tentang standar performa Relai, sehingga dapat membantu dalam memastikan keandalan sistem kelistrikan.

1.5. Batasan Masalah

Penelitian ini akan difokuskan pada hasil pengujian Relai *Phase TOC Voltage Restrained Unit*, Relai Generator *Unbalance*, dan Relai *Undervoltage* dan *Overvoltage*.

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi ini terdiri dari:

1. BAB I Pendahuluan

Bab ini berisi uraian tentang latar belakang permasalahan yang menjadi focus penelitian. Bab ini juga mencakup rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan penelitian dan sistematika penulisan skripsi.

2. BAB 2 Tinjauan Pustaka

Bab ini berisi teori-teori yang memiliki kaitan dengan Sumer penelitian. Bab ini juga menguraikan konsep-konsep yang relevan dengan penelitian.

3. BAB 3 Metodologi Penelitian

Bab ini menjelaskan tentang metode yang digunakan dalam penelitian, termasuk perancangan sistem proteksi, mendeskripsikan langkah-langkah yang akan diambil dalam menganalisis sistem proteksi generator pada PLTG TELLO, mulai dari pengumpulan data hingga interpretasi hasil.

4. BAB 4 Hasil dan Pembahasan

Bab ini berisi tentang penemuan dan hasil dari analisis sistem proteksi generator pada PLTG TELLO, termasuk identifikasi masalah dan evaluasi kinerja sistem.

5. BAB 5 Penutup

Bab ini berisi rangkuman dari seluruh hasil penelitian yang telah dilakukan dan memberikan saran untuk penelitian lebih lanjut sehingga alat ini bisa menjadi lebih baik.

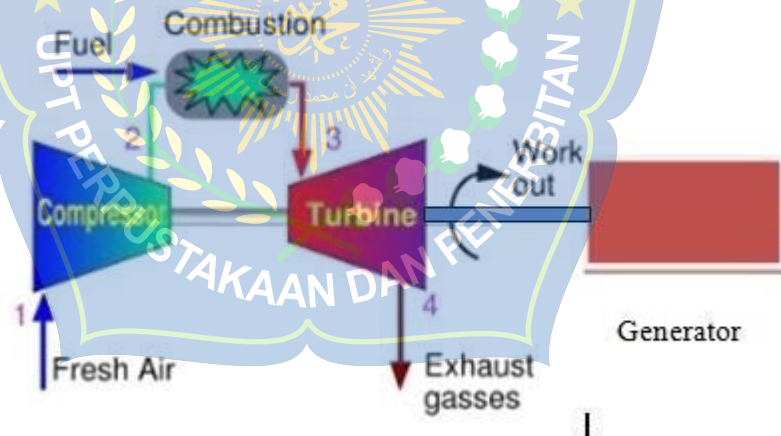


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG)

PLTG (Pembangkit listrik tenaga gas) merupakan pembangkit listrik yang memanfaatkan gas untuk memutar turbin dan generator. PLTG merupakan salah satu solusi yang efektif dalam menyediakan pasokan energi listrik yang handal dan efisien. Proses utama dalam PLTG melibatkan pembakaran gas alam di dalam mesin pembangkit listrik (generator) untuk menghasilkan energi mekanis, yang kemudian dikonversi menjadi energi listrik melalui generator (Hardi, Adam, and Arisandy 2020).

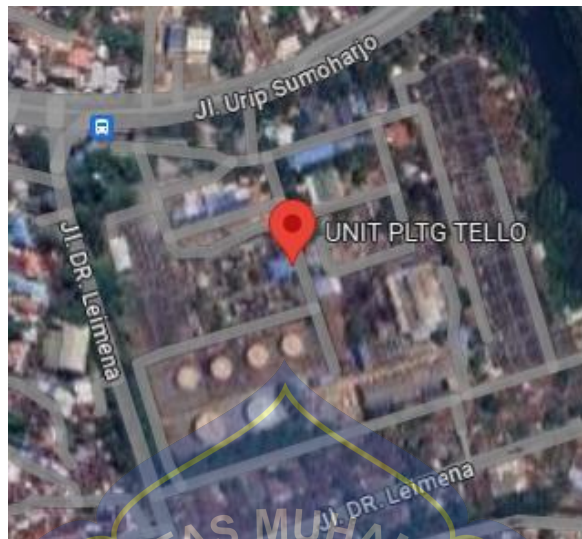


Gambar 2.1 Prinsip Kerja PLTG
(Sumber: haloedukasi.com)

Prinsip kerja PLTG didasarkan pada konversi energi yang terjadi dalam beberapa tahap, dimulai dari pembakaran bahan bakar hingga menghasilkan energi listrik. Berikut adalah tahapan prinsip kerja PLTG secara umum:

1. Proses dimulai dengan pembakaran bahan bakar utama, seperti gas alam, di dalam ruang pembakaran. Gas alam yang dibakar ini menghasilkan panas yang tinggi.
2. Panas yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar digunakan untuk memanaskan fluida kerja, biasanya berupa udara atau gas lainnya. Fluida kerja ini akan menjadi media penggerak utama dalam mesin pembangkit listrik.
3. Fluida kerja yang dipanaskan akan menggerakkan turbin, yang merupakan bagian penting dari mesin pembangkit listrik. Turbin ini akan berputar dengan 8umeri yang diberikan oleh fluida kerja.
4. Gerakan rotasi dari turbin akan ditransfer ke poros generator melalui sistem penggerak, seperti *gearbox*. Poros generator akan memutar kumparan dalam medan magnet, menghasilkan 8umeri mekanis.
5. Energi mekanis yang dihasilkan oleh poros generator akan dikonversi menjadi 8umeri listrik melalui prinsip elektromagnetik. Hal ini terjadi saat kumparan di dalam generator berputar di dalam medan magnet, menghasilkan arus listrik secara induksi.
6. Energi listrik yang dihasilkan oleh generator akan masuk ke dalam sistem distribusi listrik untuk didistribusikan ke konsumen atau disimpan dalam sistem penyimpanan 8umeri, seperti baterai, untuk digunakan pada saat dibutuhkan.

2.1.1. PLTG TELLO



Gambar 2.2 lokasi Unit PLTG Tello
(Sumber: google.com/maps)

Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) Tello yang terletak di Makassar, Sulawesi Selatan, merupakan salah satu pembangkit listrik penting di Indonesia. Dibangun dan dioperasikan oleh PT PLN (Persero), PLTG ini memiliki peran vital dalam menyediakan 9umeri listrik bagi wilayah Sulawesi Selatan dan sekitarnya. PLTG Tello memanfaatkan gas alam sebagai bahan bakarnya untuk menghasilkan 9umeri listrik melalui proses pembakaran dan konversi 9umeri mekanik menjadi 9umeri listrik. Kapasitas total PLTG Tello mencapai 2×45.400 kVA, yang menjadikannya salah satu PLTG terbesar di Indonesia.

Pembangunan PLTG Tello dimulai pada tahun 1994 dan mulai beroperasi secara komersial pada tahun 1997. Keberadaan PLTG Tello tidak hanya berkontribusi dalam memenuhi kebutuhan 9umeri listrik, tetapi juga

membantu mengurangi emisi gas rumah kaca dibandingkan dengan pembangkit listrik yang menggunakan bahan bakar fosil lainnya.

2.1.2. Fungsi Utama PLTG Tello

Fungsi utama PLTG Tello adalah untuk menghasilkan 1000 MW listrik melalui proses pembakaran gas alam. Energi listrik yang dihasilkan kemudian didistribusikan melalui jaringan listrik PLN ke wilayah Sulawesi Selatan dan sekitarnya. Selain fungsi utama tersebut, PLTG Tello juga memiliki beberapa fungsi lain, yaitu:

1. Membantu menjaga kehandalan sistem kelistrikan di wilayah Sulawesi Selatan. PLTG Tello dapat dioperasikan dengan cepat dan mudah, sehingga dapat membantu mengatasi kekurangan pasokan listrik saat terjadi permintaan puncak atau gangguan pada pembangkit lain.
2. Mendukung program pemerintah dalam mengurangi emisi gas rumah kaca. PLTG Tello menghasilkan emisi gas rumah kaca yang lebih rendah dibandingkan dengan pembangkit listrik yang menggunakan bahan bakar fosil lainnya, seperti batubara.
3. Meningkatkan perekonomian di wilayah Sulawesi Selatan. Keberadaan PLTG Tello dapat menciptakan lapangan pekerjaan dan mendorong pertumbuhan ekonomi di wilayah sekitar.

2.2. Generator

Generator adalah peralatan yang digunakan untuk menghasilkan energi listrik dari energi mekanis yang dihasilkan oleh turbin gas yang seporos dengan generator. Generator pada PLTG memiliki fungsi utama untuk menghasilkan energi listrik yang kemudian didistribusikan ke sistem tenaga listrik atau ke grid listrik. Energi mekanis yang dihasilkan dari turbin dipindahkan ke generator, di mana energi tersebut diubah menjadi energi listrik (Burhanuddin 2021).

2.2.1. Generator Unit 1 PLTG Tello

Generator Unit 1 PLTG Tello merupakan komponen penting dalam pembangkit tenaga gas (PLTG) tersebut. Berikut adalah deskripsi dari Generator Unit 1 PLTG Tello:

Tabel 2.1 Data Deskripsi Generator Unit 1 PLTG Tello

Data Generator	Satuan
<i>Inertia constant (generator + turbin)</i>	5.56 Kw sec/Kva
<i>Nominal voltage generator</i>	11,5 Kv
<i>Capacity</i>	46 MVA
<i>Power factor</i>	0,85
<i>Generator connection</i>	WYE connected
<i>Direct synchronous reactance (X_d)</i>	2.363
<i>Direct transient reactance (X'_d)</i>	0.199
<i>Direct sub-transient reactance (X''_d)</i>	0.143
<i>Negative sequence reactance (X_2)</i>	0.136
<i>Negative sequence resistance (r_2)</i>	0.194
<i>Zero sequence reactance</i>	0.086
<i>Zero sequence resistance</i>	0.107
<i>Number of pole</i>	2 poles
<i>Quadrature synchronous (X_q)</i>	2.182
<i>Quadrature transient reactance (X'_q)</i>	0.395
<i>Quadrature sub-transient reactance (X''_q)</i>	0.139

Generator Unit 1 PLTG Tello bekerja dengan prinsip induksi elektromagnetik. Turbin gas menghasilkan putaran poros yang diteruskan ke rotor generator. Rotor generator ini berputar di dalam stator generator, yang terdiri dari lilitan-lilitan kawat tembaga. Perputaran rotor generator ini menyebabkan perubahan fluks magnet pada stator generator, sehingga menginduksikan ggl (gaya gerak listrik) pada lilitan-lilitan kawat tembaga. Ggl yang terinduksi ini kemudian dialirkan keluar generator sebagai 12umeri listrik.

Berikut adalah beberapa komponen utama dari generator:

1. Stator

Stator adalah bagian tetap dari generator yang mengandung kumparan-kumparan kawat yang terhubung ke sistem distribusi listrik. Saat medan magnet berputar di sekitarnya, kumparan-kumparan ini mengalami induksi elektromagnetik, menghasilkan arus listrik yang kemudian disalurkan ke terminal generator (Prasetijo, Ropiudin, and Dharmawan 2012).

2. Rotor

Rotor adalah bagian berputar dari generator yang memiliki peran penting dalam menciptakan medan magnet yang diperlukan untuk menginduksi arus listrik di stator. Dengan berputarnya rotor, medan magnetnya bergerak melintasi kumparan-kumparan di stator, menghasilkan tegangan listrik yang menjadi output generator.

3. Kumparan Kawat (*Coil*)

Kumparan kawat merupakan komponen yang membentuk lilitan di sekitar inti logam di dalam stator. Ketika medan magnet berputar, perubahan fluks melalui kumparan-kumparan ini menghasilkan arus listrik sesuai dengan induksi elektromagnetik.

4. Inti Logam (*Core*)

Inti logam terletak di dalam stator dan berfungsi sebagai tempat untuk memasang kumparan-kumparan kawat. Material inti logam yang umumnya terbuat dari besi atau baja membantu dalam meningkatkan efisiensi penghantar listrik dan memfokuskan medan magnet (Indriani 2015).

5. Terminal

Terminal merupakan titik di mana arus listrik yang dihasilkan oleh generator dikeluarkan. Arus listrik ini dapat disalurkan ke sistem distribusi listrik atau langsung ke beban yang membutuhkan daya, seperti lampu atau mesin.

2.3. Sistem Proteksi

Sistem proteksi adalah rangkaian perangkat yang dirancang untuk mendeteksi atau mengukur adanya kelainan pada peralatan.. Sistem proteksi bertanggung jawab untuk mendeteksi gangguan atau kondisi abnormal dalam sistem listrik dan mengambil langkah-langkah yang diperlukan untuk

meminimalkan kerusakan dan menjaga keandalan operasional sistem (Fauziyah and Irwanto 2022).

Sistem proteksi Generator dirancang untuk melindungi generator dari berbagai gangguan yang dapat terjadi, seperti:

1. Gangguan Internal

Kerusakan pada belitan stator atau rotor: Sistem proteksi akan mendeteksi kerusakan ini dan secara otomatis memicu trip generator untuk mencegah kerusakan yang lebih parah.

Kegagalan sistem eksitasi: Sistem proteksi akan mendeteksi kegagalan ini dan secara otomatis memicu trip generator untuk mencegah generator beroperasi tanpa eksitasi yang memadai.

Lonjakan tegangan: Sistem proteksi akan mendeteksi lonjakan tegangan dan secara otomatis memicu trip generator untuk melindungi generator dari kerusakan akibat tegangan tinggi.

2. Gangguan Eksternal

Gangguan hubung singkat: Sistem proteksi akan mendeteksi gangguan hubung singkat dan secara otomatis memicu trip generator untuk memisahkan generator dari jaringan listrik dan mencegah kerusakan yang lebih luas.

Penurunan tegangan: Sistem proteksi akan mendeteksi penurunan tegangan dan secara otomatis memicu trip generator untuk mencegah generator beroperasi pada tegangan yang terlalu rendah.

Kehilangan frekuensi: Sistem proteksi akan mendeteksi kehilangan frekuensi dan secara otomatis memicu trip generator untuk mencegah generator beroperasi pada frekuensi yang tidak stabil.

Dalam konteks generator pada PLTG, sistem proteksi memiliki beberapa komponen penting, termasuk sensor, relay, dan perangkat pemutus sirkuit. Sensor digunakan untuk memantau parameter penting seperti arus, tegangan, dan suhu. Relay bertindak sebagai pengendali yang menanggapi sinyal dari sensor dan menginisiasi tindakan proteksi, seperti memutuskan sirkuit atau memberikan perintah kepada sistem numerik untuk mengatur operasi generator.

2.4. Relai Proteksi Generator

Relai proteksi adalah sebuah peralatan listrik yang dirancang untuk mendeteksi bila terjadi gangguan atau sistem tenaga listrik tidak normal. Relai proteksi bertugas untuk mendeteksi gangguan seperti arus lebih, tegangan lebih, tegangan kurang, frekuensi abnormal, dan kelebihan suhu. Ketika suatu kondisi abnormal terdeteksi, relai akan mengirimkan sinyal untuk memutuskan sirkuit atau mengisolasi bagian yang bermasalah dari sistem untuk mencegah kerusakan lebih lanjut dan menjaga stabilitas sistem (Sriwijaya 2021).

Relai proteksi bekerja berdasarkan prinsip elektromekanik atau elektronik. Relay elektromekanik menggunakan elemen mekanis untuk membuka atau menutup kontak berdasarkan kondisi listrik yang dipantau.

Relai elektronik atau digital, di sisi lain, menggunakan mikroprosesor untuk memproses sinyal dan membuat keputusan proteksi dengan lebih cepat dan akurat.

Setiap jenis relai proteksi memiliki fungsi khusus yang dirancang untuk melindungi generator dan komponen lain dari kerusakan akibat berbagai jenis gangguan. Berikut adalah jenis-jenis relai proteksi yang umum digunakan:

1. Relai arus lebih (*overcurrent relay*) adalah jenis relai yang dirancang untuk mendeteksi arus yang melebihi batas normal. Ini bisa disebabkan oleh hubung singkat atau beban berlebih. Relay arus lebih bekerja berdasarkan tingkat arus yang mengalir melalui kumparannya. Jika arus yang terdeteksi melebihi ambang batas yang telah ditentukan, relai akan mengirimkan sinyal untuk memutuskan sirkuit. Relai ini biasanya digunakan untuk proteksi umum pada jaringan distribusi dan pembangkit listrik (Pafela and Hamdani 2016).
2. Relai diferensial (*differential relay*) berfungsi untuk mendeteksi perbedaan arus antara dua titik yang seharusnya sama, seperti antara ujung-ujung kumparan stator pada generator. Relai ini membandingkan arus masuk dan arus keluar dalam suatu bagian sistem. Jika perbedaan arus melebihi nilai yang telah ditetapkan, ini menunjukkan adanya gangguan internal seperti hubung singkat atau kerusakan kumparan, dan relai akan mengaktifkan pemutusan sirkuit. Relai diferensial umumnya digunakan untuk proteksi pada transformator, generator, dan motor besar (Ek Bien and Helna 2007).

3. Relai tegangan lebih (*overvoltage relay*) melindungi sistem dari kondisi tegangan yang melebihi batas aman. Relai ini mengukur tegangan di titik tertentu dalam sistem dan akan mengaktifkan mekanisme proteksi jika tegangan terdeteksi melebihi ambang batas yang telah ditentukan. Relai ini biasanya digunakan pada sistem distribusi dan pembangkit untuk melindungi peralatan dari kerusakan akibat lonjakan tegangan (NUGRAHA and ARFIANTO 2021).
4. Relai tegangan kurang (*undervoltage relay*) mendeteksi kondisi tegangan yang lebih rendah dari batas yang ditentukan, yang dapat menyebabkan operasi tidak efisien atau kerusakan pada peralatan. Relai ini memonitor tegangan pada titik tertentu dan akan memicu pemutusan sirkuit atau memberikan sinyal untuk tindakan korektif jika tegangan turun di bawah ambang batas yang ditentukan. Relai tegangan kurang digunakan untuk melindungi motor dan peralatan listrik dari operasi pada tegangan rendah yang dapat merusak peralatan (Saifudin, Suryono, and Irianto 2022).
5. Relai frekuensi lebih (*overfrequency relay*) melindungi sistem dari frekuensi yang melebihi batas normal. Relai ini mengukur frekuensi sistem dan akan mengirim sinyal untuk tindakan proteksi seperti pemutusan beban atau penyesuaian output generator jika frekuensi terdeteksi melebihi batas yang telah ditetapkan. Relai frekuensi lebih biasanya digunakan pada sistem pembangkit dan distribusi listrik untuk menjaga stabilitas frekuensi .

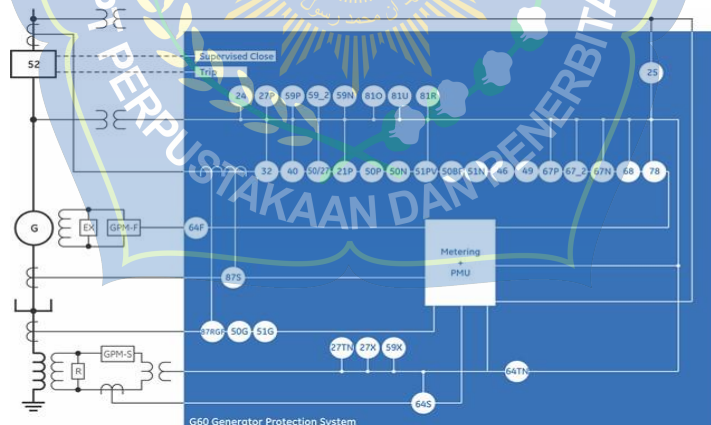
6. Relai frekuensi kurang (*underfrequency relay*) melindungi sistem dari frekuensi yang lebih rendah dari batas normal, yang dapat mengindikasikan masalah pada sumber daya atau beban berlebih. Relai ini memonitor frekuensi sistem dan akan memicu tindakan proteksi untuk mengurangi beban atau meningkatkan output daya jika frekuensi turun di bawah ambang batas yang ditentukan. Relai frekuensi kurang digunakan untuk proteksi pada jaringan distribusi dan sistem pembangkit untuk menjaga stabilitas operasional.
7. Relai suhu (*temperature relay*) melindungi peralatan dari kondisi suhu yang berlebihan yang dapat menyebabkan kerusakan termal. Relai ini menggunakan sensor suhu untuk memonitor panas pada komponen tertentu. Jika suhu melebihi batas yang ditetapkan, relai akan mengirim sinyal untuk mematikan peralatan atau mengaktifkan sistem pendingin. Relai suhu digunakan pada transformator, generator, motor, dan peralatan listrik lainnya yang rentan terhadap kerusakan akibat panas berlebih.

2.5. Relai Multilin UR G60



Gambar 2.3 Relai Multilin UR G60
(Sumber: GE Multilin G60, 2017)

Relai Multilin UR G60 merupakan bagian dari seri *Universal Relay* (UR) berbasis mikroprosesor yang dirancang untuk menyediakan fungsi perlindungan, pemantauan, 19 numeric, dan perekaman bagi generator arus bolak-balik (AC) yang digerakkan oleh turbin uap, gas, atau hidrolik (*General Electric Multilin 2017*).



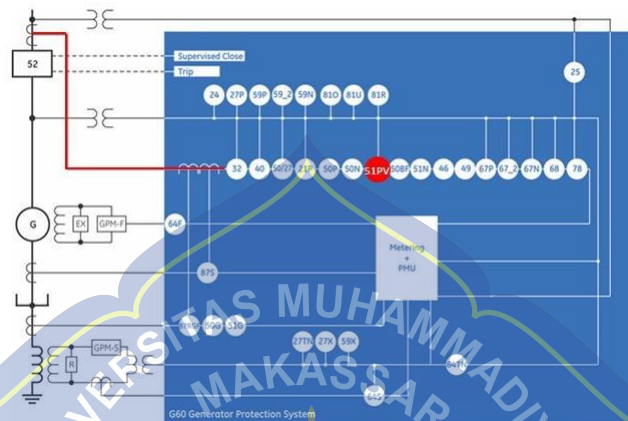
Gambar 2.4 *Single Line Diagram* Sistem Proteksi Generator
(Sumber: GE Multilin G60, 2017)

Tabel 2.2 Keterangan *Single Line Diagram* Sistem Proteksi Generator

No	Device Number	Function
1	21P	Phase distance backup
2	24	Volts per hertz
3	25	Synchrocheck
4	27P	Phase undervoltage
5	27TN	Third harmonic neutral undervoltage
6	27X	Auxiliary undervoltage
7	32	Sensitive directional power
8	40	Loss of excitation
9	46	Generator unbalance
10	49	Thermal overload protection (RTD)
11	50BF	Breaker failure
12	50G	Ground instantaneous overcurrent
13	50N	Neutral instantaneous overcurrent
14	50P	Phase instantaneous overcurrent
15	50SP	Split phase protection
16	50/27	Accidental energization
17	51G	Ground time overcurrent
18	51PV	Phase time overcurrent with voltage restraint
19	51N	Neutral time overcurrent
20	59N	Neutral overvoltage
21	59P	Phase overvoltage
22	59X	Auxiliary overvoltage
23	59_2	Negative-sequence overvoltage
24	64F	Field ground protection
25	64S	Sub-harmonic stator ground protection
26	64TN	100% stator ground
27	67_2	Negative-sequence directional overcurrent
28	67N	Neutral directional overcurrent
29	67P	Phase directional overcurrent
30	68	Power swing blocking
31	78	Out-of step protection
32	81O	Overfrequency
33	81R	Rate of change of frequency
34	81U	Underfrequency
35	87RGF	Restricted ground fault
36	87S	Stator differensial

2.6. Relai *Phase TOC Voltage Restrained Unit (51P)*

Di bawah ini adalah gambar diagram satu garis sistem proteksi generator. Bagian yang ditandai merah menunjukkan titik koneksi dari CT ke relai 51P, yang berfungsi untuk melindungi generator dari gangguan fase.



Gambar 2.5 Diagram satu garis Proteksi Generator yang di lengkapi dengan Relai *Phase TOC Voltage Restrained* (Sumber: GE Multilin G60, 2017)

Relai *Phase TOC Voltage Restrained Unit 51PV* merupakan komponen proteksi yang sangat penting dalam sistem proteksi generator G60. Relai ini berfungsi untuk mendeteksi kondisi arus lebih (*overcurrent*) pada generator. Ketika arus yang mengalir melebihi batas yang telah ditentukan, relai akan mengirimkan sinyal trip ke circuit breaker untuk memutus aliran arus dan melindungi generator dari kerusakan. dirancang untuk memberikan proteksi cadangan (*backup protection*) pada generator terhadap gangguan fase eksternal yang tidak terdeteksi oleh peralatan proteksi lainnya.

Overcurrent pada generator dapat menyebabkan kerusakan serius akibat pemanasan berlebih (*thermal stress*) dan gaya elektromagnetik yang

berlebihan (electrodynamic forces). Arus yang melebihi kapasitas generator akan memanaskan belitan stator dan rotor secara cepat, merusak isolasi hingga berisiko menyebabkan hubung singkat internal atau bahkan kebakaran. Selain itu, gaya mekanis dari arus tinggi dapat merusak kumparan dan komponen lainnya. Tanpa proteksi yang cepat (seperti relai *overcurrent*), generator bisa mengalami kerusakan permanen, mengganggu pasokan listrik, dan memicu gangguan lebih luas pada sistem tenaga.

2.6.1. **Invers Relai *Phase TOC Voltage Restrained Unit***

Invers relai atau relai arus lebih waktu terbalik, adalah jenis relai pelindung yang bekerja berdasarkan besarnya arus dan waktu selama arus tersebut mengalir. Relai ini memiliki kurva karakteristik yang menunjukkan hubungan antara besarnya arus dan waktu operasinya. Semakin besar arus yang mengalir, semakin singkat waktu operasi relai (ABB 2002).

Hubungan antara kepatuhan saat ini dan waktu secara umum dapat dinyatakan sebagai:

$$T = \frac{K}{\left(\frac{I_f}{I_p}\right)^\alpha - 1} \times TD \dots \dots \dots (2.1)$$

Dengan:

T = Waktu trip relai (s)

K = Konstanta

I_f = Arus gangguan

I_p = Pickup setting

α = Eksponen

TD = Time Dial Setting

Untuk menentukan waktu operasi (t) berdasarkan karakteristik kurva waktu-arus yang berbeda, gunakan nilai konstanta α dan β yang sesuai pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Nilai Konstanta α dan β

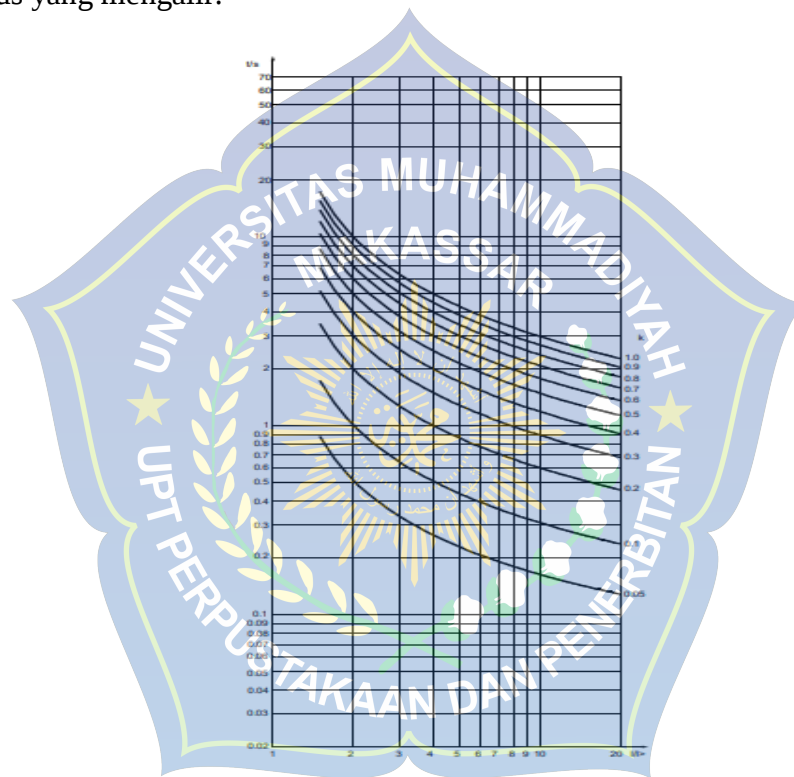
IEEE Curve Shape	K	β	α
IEEE Extremely Inverse	28,2	0,1217	2,0000
IEEE Very Inverse	19,61	0,491	2,0000
IEEE Moderately Inverse	0,0515	0,1140	0,02000

Jenis-jenis Invers Relai

Terdapat tiga jenis utama invers relai, yaitu:

1. Standar Invers (*Moderately Inverse*)

Relai ini memiliki kurva karakteristik yang paling umum digunakan. Waktu operasi relai SI berbanding terbalik dengan besarnya arus yang mengalir.



Gambar 2.8 *Moderately Inverse characteristic.*
(Sumber: SPAJ 131 C, ABB, 2002)

Keterangan:

I = measured current

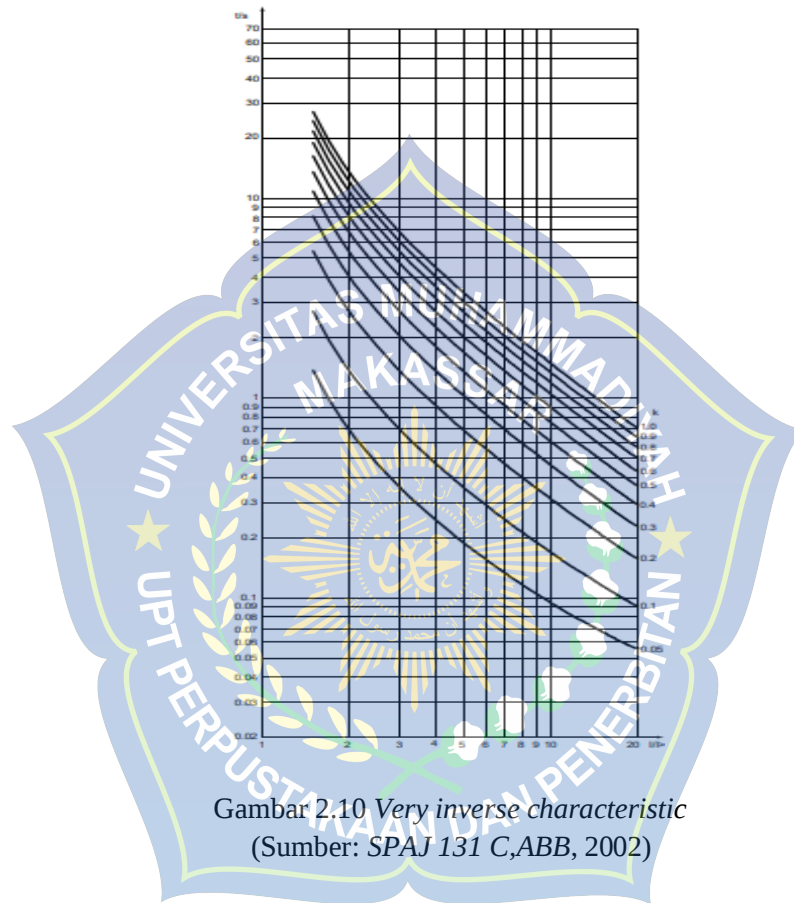
I_{set} = set start current

t = operation time

k = time multiplier

2. Sangat Invers (*Very Invers*)

Relai ini memiliki kurva karakteristik yang lebih curam daripada SI. Waktu operasi relai VI jauh lebih cepat untuk arus yang besar dibandingkan dengan SI.



Keterangan:

I = measured current

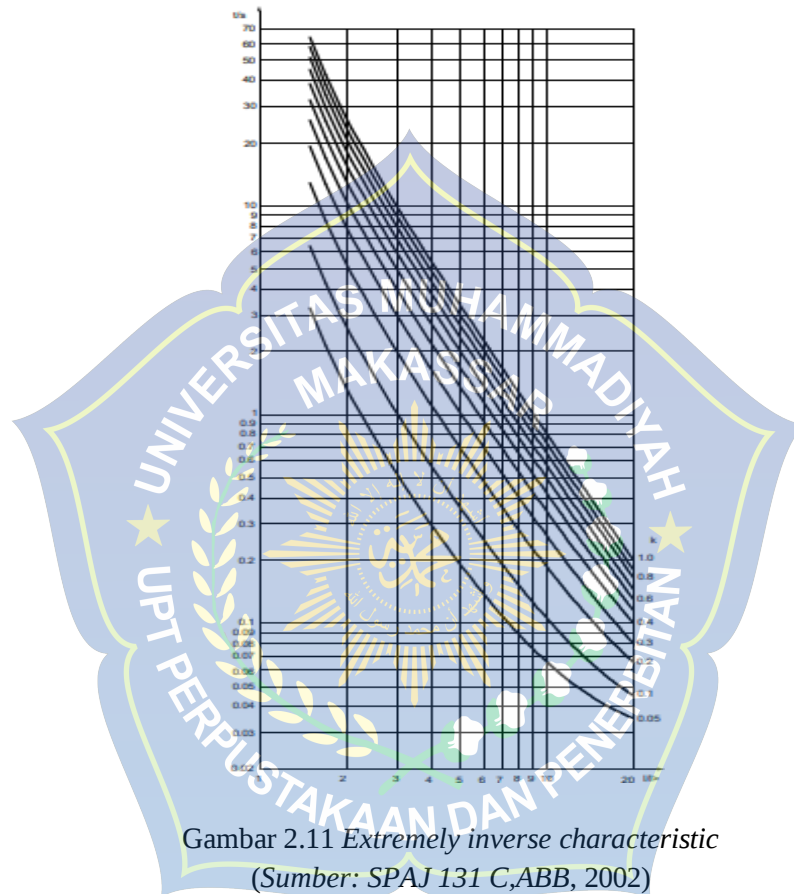
I_{set} = set start current

t = operation time

k = time multiplier

3. Invers Ekstrim (*Extremely Inverse*)

Relai ini memiliki kurva karakteristik yang paling curam dari ketiga jenis invers relai. Waktu operasi relai EI sangat cepat untuk arus yang besar.



Keterangan:

I = measured current

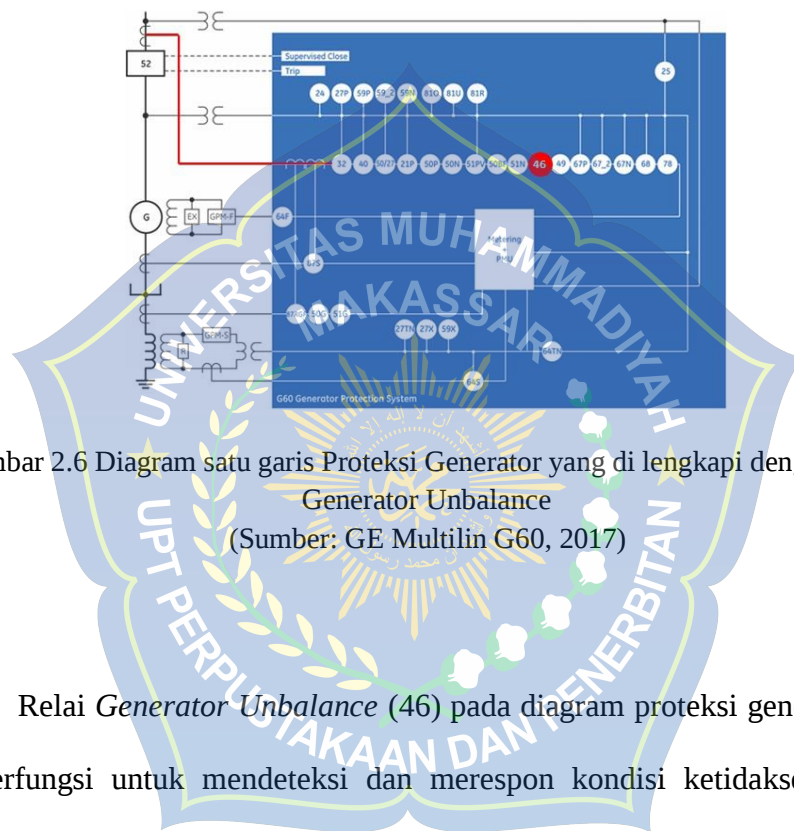
I_{set} = set start current

t = operation time

k = time multiplier

2.7. Relai Generator *Unbalance* (46)

Di bawah ini adalah gambar diagram satu garis sistem proteksi generator. Bagian yang ditandai merah menunjukkan titik koneksi dari CT ke relai 46, yang berfungsi untuk melindungi generator dari ketidakseimbangan tegangan atau arus pada generator.



Gambar 2.6 Diagram satu garis Proteksi Generator yang dilengkapi dengan Relai
Generator Unbalance
(Sumber: GE Multilin G60, 2017)

Relai *Generator Unbalance* (46) pada diagram proteksi generator G60 ini berfungsi untuk mendeteksi dan merespon kondisi ketidakseimbangan tegangan atau arus pada generator. Ketidakseimbangan arus pada generator menyebabkan terbentuknya arus urutan negatif. Arus urutan negatif (*Negative Sequence Current*) adalah komponen arus dalam sistem tiga fasa tidak seimbang yang memiliki urutan fasa berlawanan arah dengan urutan normal sistem. Dalam kondisi normal (seimbang), arus tiga fasa membentuk sistem urutan positif (misalnya: $R \rightarrow S \rightarrow T$). Namun, jika terjadi ketidakseimbangan

beban, gangguan antar fasa, atau ketidaksesuaian sistem, maka akan timbul arus urutan negatif yang berputar dalam arah terbalik ($R \rightarrow T \rightarrow S$).

Arus ini menciptakan medan magnet yang berlawanan arah dengan putaran rotor generator atau motor sinkron, sehingga menimbulkan arus eddy di rotor dan menyebabkan pemanasan lokal yang berlebih pada bagian rotor dan damper winding. Pemanasan ini berbahaya karena tidak terdeteksi oleh proteksi suhu normal dan dapat merusak isolasi, memperpendek umur peralatan, serta menyebabkan trip sistem melalui proteksi arus urutan negatif (relai 46). Umumnya, batas aman arus urutan negatif adalah sekitar 2% hingga 5% dari arus nominal secara kontinu, dan maksimal 10% untuk durasi singkat.

Persamaan perhitungan *pickup setting relay unbalance* adalah:

$$1 pu = 3 \times \frac{I_{FL} \times CT_{sec}}{CT_{prim}} \times Pickup_{setting} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dengan:

I_{FL} = Full Load Current

CT_{sec} = Curent Transformation Secunder

CT_{prim} = Curent Transformation Primer

Pickup Setting = Pengaturan waktu

Hasil perhitungan waktu trip relay berdasarkan arus injeksi menggunakan persamaan:

$$T = TDM \times \frac{100}{(I_{inj} / I_{pu})^2} \dots \dots \dots (2.3)$$

$$I_{inj} = \text{Arus injeksi}$$

Di bawah ini adalah gambar diagram satu garis sistem proteksi generator. Bagian yang ditandai merah menunjukkan titik koneksi dari VT ke relai 27P dan 59P yang berfungsi untuk melindungi generator dari ketidakseimbangan tegangan atau arus pada generator.



Gambar 2.7 Diagram satu garis Proteksi Generator yang di lengkapi dengan Relai Undervoltage dan Relai Overvoltage
(Sumber: GE Multilin G60, 2017)

29

terlalu rendah dapat menyebabkan motor starting kesulitan atau bahkan gagal, sedangkan tegangan yang terlalu tinggi dapat merusak isolasi pada peralatan listrik. Dengan adanya relai 27P dan 59P, sistem proteksi generator dapat memastikan bahwa tegangan selalu dalam rentang yang aman, sehingga meningkatkan keandalan dan umur pakai generator. Relai *undervoltage* dan *overvoltage* bekerja dengan karakteristik definite time, yang dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$T = T_{set} \dots\dots\dots (2.4)$$

Dengan:

T = Waktu trip relai

T_{set} = Waktu tunda rela yang telah diset

Untuk menghitung persentase tegangan gangguan menggunakan persamaan:

$$Fault(\%) = \left(\frac{V_{inj}}{V_{rated}} \right) \times 100\% \dots\dots\dots (2.5)$$

Dengan:

V_{inj} = Injected Voltage

V_{rated} = Rated Voltage

2.9. Standar Internasional Relai Proteksi Generator

Relai proteksi generator dirancang untuk bekerja sesuai dengan standar internasional yang mengatur akurasi, keandalan, serta waktu operasi dalam menghadapi gangguan. Beberapa standar yang umum digunakan sebagai acuan adalah *IEEE C37.102-2006* dan *IEC 60255*.

2.9.1. *IEEE C37.102-2006*

Standar ini dikeluarkan oleh *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)* dan berisi panduan menyeluruh mengenai prinsip proteksi generator sinkron, mulai dari pemilihan elemen proteksi, pengaturan sensitivitas, hingga koordinasi antar peralatan. *IEEE C37.102-2006* tidak menetapkan batas toleransi numerik spesifik untuk akurasi pengukuran atau waktu operasi, namun memberikan kerangka teknis yang menjamin bahwa sistem proteksi mampu merespons dengan tepat pada berbagai kondisi gangguan. Dalam konteks *GE G60*, penerapan standar ini tercermin pada kemampuan perangkat dalam mengatur karakteristik operasi (*pickup setting*, waktu tunda, dan sensitivitas arus) yang dapat disesuaikan untuk memenuhi kebutuhan sistem dan koordinasi proteksi (*General Electric Multilin* 2017).

2.9.2. *IEC 60255*

Standar *IEC 60255 (International Electrotechnical Commission)* adalah standar internasional yang mengatur kinerja dan pengujian relai proteksi, mencakup akurasi pengukuran, waktu respons, stabilitas terhadap

gangguan sementara (*transient*), serta ketahanan terhadap lingkungan. Berdasarkan standar *IEC 60255*, peralatan relai proteksi harus memiliki keandalan, kecepatan, dan selektivitas yang baik sehingga sistem tenaga listrik terlindungi dari gangguan dan dapat beroperasi dengan baik tanpa kesalahan operasi. Batas toleransi penyimpangan nilai verifikasi yang diizinkan adalah tidak lebih dari 5% dari nilai setelannya (Kamal and Dona 2024).



BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

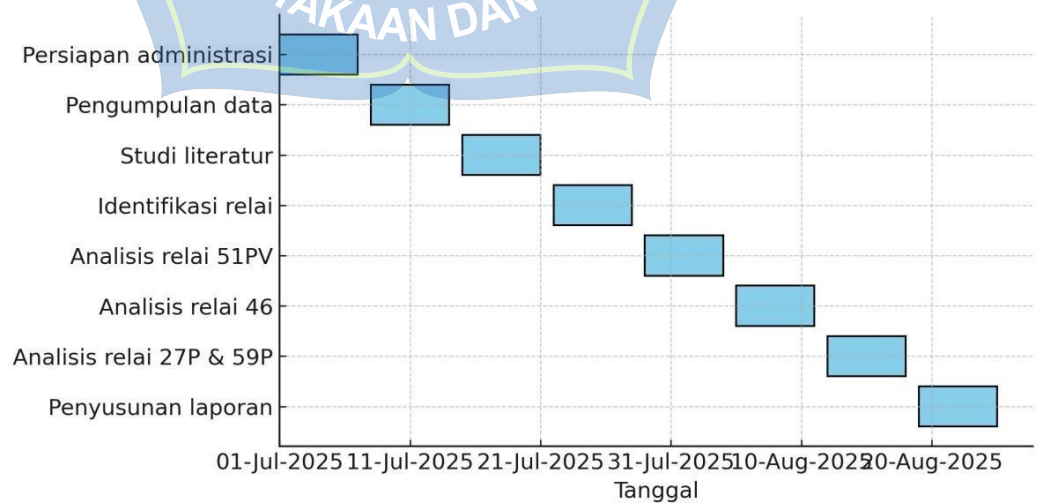
3.1. Tempat dan Waktu Penelitian

1. Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan di PT. PLN Indonesia Power Unit Pelaksana Pengendalian Pembangkitan Tello Unit PLTG, Jl. Urip Sumoharjo No.Km. 7 Tello Baru, Kecamatan Panakkukang, Kota Makassar, Sulawesi Selatan.

2. Waktu Penelitian

Waktu yang dibutuhkan penulis untuk melakukan penelitian adalah selama 2 bulan. Berikut adalah grafik jadwal penelitian selama 2 bulan untuk penelitian berjudul: “Analisis Sistem Proteksi Generator pada PLTG Tello”.



Gambar 3.1 Grafik jadwal penelitian

3.2. Langkah Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan sistematis untuk menganalisis kinerja sistem proteksi pada generator Unit 1 PLTG Tello. Tahapan awal dimulai dengan studi kepustakaan untuk memperkuat landasan teori mengenai sistem proteksi generator, karakteristik relai proteksi, dan metode pengujian relai berdasarkan standar IEEE dan IEC. Selanjutnya, penulis mengumpulkan data primer berupa hasil pengujian relai *Phase TOC Voltage Restrained Unit* (51P), relai Generator Unbalance (46), relai *Undervoltage* (27P), dan relai *Overvoltage* (59P) yang dilakukan oleh PT. PLN Indonesia Power. Data ini diperoleh melalui studi dokumen dan observasi terhadap dokumen hasil uji proteksi dari tim teknis di PLTG Tello.

Setelah data terkumpul, dilakukan tahap analisis data dengan membandingkan hasil pengujian aktual terhadap perhitungan teoritis yang dihitung berdasarkan karakteristik relai dan parameter sistem yang berlaku, seperti pickup current, time dial setting, dan karakteristik kurva inverse maupun definite time. Analisis ini bertujuan untuk mengukur tingkat kesesuaian antara hasil uji lapangan dengan teori yang ada dan standar yang berlaku. Selisih nilai trip time maupun nilai error antara hasil teoritis dan aktual dianalisis untuk mengevaluasi kinerja aktual relai.

Tahap akhir dari penelitian ini adalah menarik kesimpulan berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, yang mencakup evaluasi performa masing-masing relai dan rekomendasi perbaikan atau penyesuaian

setting relai agar lebih optimal dalam melindungi generator dari potensi gangguan. Setiap langkah dalam penelitian ini dilakukan secara sistematis dan berkesinambungan guna memastikan bahwa hasil yang diperoleh valid dan relevan terhadap tujuan penelitian.

3.3. Objek Penelitian

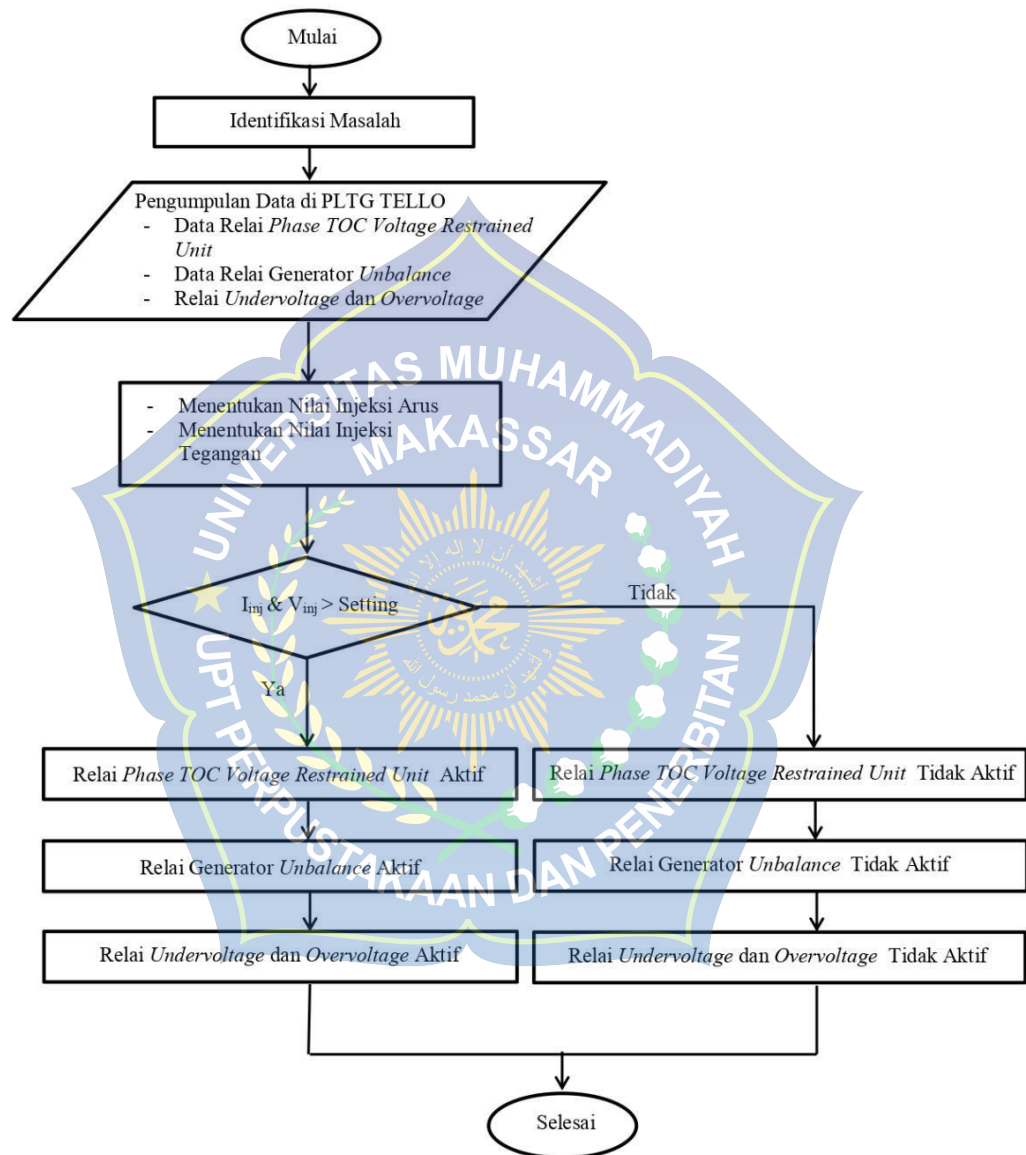
Dalam hal ini penulis melakukan penelitian mengenai hasil pengujian relay proteksi yang ada pada generator unit 1 Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) Tello, seperti *Phase TOC Voltage Restrained Unit*, Generator Unbalance, dan *Undervoltage* dan *Overvoltage over current relay*.

3.4. Teknik Pengumpulan Data

Cara yang digunakan dalam pengambilan data pada penelitian ini adalah studi dokumen, yaitu Penulis mengumpulkan dokumen hasil pengujian dengan mempelajari dan menganalisis terkait relai proteksi generator mengenai hasil pengujian Relay *Phase TOC Voltage Restrained Unit*, pengujian Relay Generator Unbalance, dan pengujian Relay *Undervoltage* dan Relay *Overvoltage*.

3.5. Prosedur Penelitian

Berikut adalah *flowchart* prosedur penelitian yang menggambarkan tahapan analisis sistem proteksi generator di PLTG Tello.



Gambar 3.2 *Flowchart* prosedur penelitian

3.6. Teknik Analisis Data

Teknik analisa data yang digunakan dalam penulisan proposal ini adalah teknik analisa data deskriptif, yaitu dengan cara mendeskripsikan dan menggambarkan data yang diperoleh dari hasil pengujian relay untuk mengolah dan menyajikan data pengujian relay secara efektif dan informatif., kemudian disajikan dalam bentuk tabel, grafik dan presentasi kemudian di narasikan.



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.2. Sistem Proteksi Generator PLTG Tello

4.1.1. Relai Proteksi yang Digunakan

Sistem proteksi generator di PLTG Tello menggunakan relai Multilin UR G60 yang memiliki berbagai fitur perlindungan untuk memastikan operasi yang aman. Beberapa relai utama yang digunakan meliputi:

1. Relai *Phase TOC Voltage Restrained Unit* (51P)
 - a. Memberikan perlindungan terhadap arus lebih akibat gangguan eksternal atau kondisi beban berlebih.
 - b. Menggunakan karakteristik inverse time untuk menyesuaikan waktu trip berdasarkan besarnya arus gangguan.
2. Relai *Generator Unbalance* (46)
 - a. Mendeteksi ketidakseimbangan arus antar fasa yang dapat menyebabkan pemanasan berlebih pada rotor.
 - b. Setting pickup biasanya pada 8% dari arus nominal untuk mencegah gangguan berkelanjutan.
3. Relai *Undervoltage* (27P) dan *Overvoltage* (59P)
 - a. Memantau kondisi tegangan generator agar tetap dalam batas aman.

- b. Jika tegangan turun atau naik melebihi batas, relai akan mengaktifkan mekanisme proteksi.

4.3. Data Hasil Pengujian Relai Proteksi

Pengujian relai proteksi generator di PLTG Tello dilakukan untuk memastikan bahwa relai bekerja sesuai dengan parameter setting yang telah dihitung. Pengujian dilakukan menggunakan perangkat OMICRON CMC 356, yang merupakan alat uji standar untuk relay proteksi.

Data hasil pengujian relai diambil dari dokumen "HASIL UJI METERING RELAY PROTEKSI GENERATOR UNIT 1 (2022)". Pengujian mencakup beberapa parameter utama, yaitu:

1. Pemeriksaan Visual
 - Pelat nama: Ada, jelas, dan lengkap
 - Casing dan modul: Tidak cacat dan lengkap
 - Pembedaan casing: Terhubung dan tidak cacat
 - Indikator: Ada dan lengkap
2. Pemeriksaan Catu Daya
 - Polaritas: Sesuai
 - Besaran tegangan: Sesuai
3. Pengujian Fungsi Kontak Keluaran dan Indikasi
 - Kontak keluaran: Baik
 - Indikasi: Baik

4.2.1. Relai Phase TOC Voltage Restrained (51P)

- Pickup Setting : 0.665 pu
- Time Dial Setting : 1
- Karakteristik: IEEE Moderate Inverse
- Pengujian dilakukan dengan berbagai level arus gangguan dan menghasilkan waktu operasi sebagai berikut:

Tabel 4.1 Hasil Uji Relay Phase TOC Voltage Restrained (51P)

<i>Inject Current</i>	<i>Fault (%)</i>	<i>Phase</i>
(A)		<i>Trip Time (s)</i>
3.99	120%	2.413
4.98	150%	2.024
6.65	200%	1.691
8.31	250%	1.499
9.97	300%	1.372
11.63	350%	1.292
13.3	400%	1.219

4.2.2. Relai *Generator Unbalance* (46)

- *Pickup Setting* : 8% dari I_{FL}
- *K Value* : 10
- Hasil pengujian menunjukkan waktu operasi relay sebagai berikut:

Tabel 4.2 Tabel Hasil Uji Relai *Generator Unbalance* (46)

<i>Inject Current (A)</i>	<i>Fault (%)</i>	<i>Expected (s)</i>	<i>Trip Time (s)</i>	<i>Error %</i>
1.71	15%	444.44444	445.903	0.328%
5.7	50%	40	40.152	0.380%
11.4	100%	10	10.062	0.620%
4.446	39%	65.75	65.995	0.373%
5.358	47%	45.27	45.437	0.369%
5.7	50%	40	40.137	0.343%
9.12	80%	15.63	15.700	0.448%
11.4	100%	10	10.047	0.470%
34.2	300%	1.11111	1.135	2.150%
45.6	400%	0.625	0.628	0.480%

4.2.3. Relai Undervoltage (27P) dan Overvoltage (59PV)

a. Relai Undervoltage (27P)

- Pickup Setting : 0.43 pu
- Curve Type : Definite
- Time Delay : 1 sec

Tabel 4.3 Tabel Hasil Uji Relai Undervoltage (27P)

Injected Voltage (V) (Phase- Neutral)	Fault (%)	Trip Time (s)
24	21%	1.034
28.55	43%	1.026

b. Relai Overvoltage (59P)

- Pickup Setting : 1.1 pu
- Curve Type : Definite
- Time Delay : 6.75 sec

Tabel 4.4 Tabel Hasil Uji Relai Overvoltage (59P)

Injected Voltage (V) (Phase- Neutral)	Fault (%)	Trip Time (s)
127	110%	6.807

4.4. Hasil Perhitungan Relai Proteksi

Pada bagian ini, dilakukan perhitungan *setting relay* berdasarkan karakteristik generator, transformator arus (CT), transformator tegangan (VT), dan standar proteksi yang digunakan.

Data teknis dari generator di PLTG Tello yang digunakan dalam perhitungan:

Daya nominal: 46 MVA

Tegangan nominal: 11,5 kV

Faktor daya: 0,85

Rasio CT: 3000/5 A

Rasio VT: 11500/115 V

4.3.1. Perhitungan *Setting Relay Phase TOC Voltage Restrained Unit (51PV)*

Relay ini bekerja berdasarkan karakteristik kurva invers, sesuai dengan standar IEEE *Moderately Inverse*. Persamaan waktu kerja relay dibawah ini mengacu pada persamaan (2.1) di Bab II dan dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$T = \frac{K}{\left(\frac{I_f}{I_p}\right)^\alpha - 1} \times TDS$$

Dengan:

$T = \text{Trip relay (s)}$

$K = \text{Konstanta (0,0515 untuk IEEE Moderately Inverse)}$

$I_f = \text{Fault \%} \times I_n$

$I_p = \text{Pickup setting (0,665 pu} \times 5 \text{ A} = 3,325 \text{ A)}$

$\alpha = \text{Eksponen (0,02 untuk IEEE Moderately Inverse)}$

$TDS = \text{Time Dial Setting (1)}$

Perhitungan waktu trip untuk setiap nilai arus gangguan:

1 Untuk 120% (3,99 A):

$$T = \frac{0,0515}{\left(\frac{1,2}{(3,325)}\right)^{0,02} - 1} \times 1 = 4,339_s$$

2 Untuk 150% (4,98 A):

$$T = \frac{0,0515}{\left(\frac{1,5}{(3,325)}\right)^{0,02} - 1} \times 1 = 3,140_s$$

3 Untuk 200% (6,65 A):

$$T = \frac{0,0515}{\left(\frac{2,0}{(3,325)}\right)^{0,02} - 1} \times 1 = 2,309_s$$

4 Untuk 250% (8,31 A):

$$T = \frac{0,0515}{\left(\frac{2,5}{(3,325)}\right)^{0,02} - 1} \times 1 = 1,922_s$$

5 Untuk 300% (9,97 A):

$$T = \frac{0,0515}{\left(\frac{15}{3,325}\right)^{0,02} - 1} \times 1 = 1,683_s$$

6 Untuk 350% (11,63 A):

$$T = \frac{0,0515}{\left(\frac{17,5}{3,325}\right)^{0,02} - 1} \times 1 = 1,524_s$$

7 Untuk 400% (13,3 A):

$$T = \frac{0,0515}{\left(\frac{20}{3,325}\right)^{0,02} - 1} \times 1 = 1,411_s$$

4.3.2. Perhitungan *Setting Relay Generator Unbalance* (46)

Relay ini bekerja berdasarkan parameter ketidakseimbangan arus fasa (*unbalance current*). Persamaan perhitungan *pickup setting relay unbalance* mengacu pada persamaan (2.2) di Bab II, sebagai berikut:

$$1 \text{ pu} = 3 \times \frac{I_{FL} \times CT_{sec}}{CT_{prim}} \times \text{Pickup}_{setting}$$

Dengan:

$$I_{FL} = \text{Full Load Current} = 2280 \text{ A}$$

$$CT_{sec} = 5 \text{ A}$$

$$CT_{prim} = 3000 \text{ A}$$

$$\text{Pickup Setting} = 8\%$$

Maka:

$$1 \text{ pu} = 3 \times \left(\frac{2280 \times 5}{3000} \times 0,08 \right) = 0,912 \text{ A}$$

Hasil perhitungan waktu *trip relay* berdasarkan arus injeksi ini mengacu pada persamaan (2.3) di Bab II, sebagai berikut:

$$T = 10 \frac{100}{(I_{inj} / I_{pu})^2}$$

Dengan:

$$I_{pu} = 0,912 \text{ A}$$

I_{inj} = Arus injeksi sesuai tabel hasil pengujian

Perhitungan untuk setiap nilai arus injeksi:

1. Untuk 1,71 A (15%)

$$T = 10 \frac{100}{(0,57/0,912)^2} = 2.601,457_s$$

2. Untuk 5.7 A (50%)

$$T = 10 \frac{100}{(1,9/0,912)^2} = 230,47_s$$

3. Untuk 11.4 A (100%)

$$T = 10 \frac{100}{(0,76/0,912)^2} = 1.440,92_s$$

4. Untuk 4,446 A (39%)

$$T = 10 \frac{100}{(1,482/0,912)^2} = 378,64_s$$

5. Untuk 5,358 A (47%)

$$T = 10 \frac{100}{(1,786/0,912)^2} = 260,82_s$$

6. Untuk 5,7 A (50%)

$$T = 10 \frac{100}{(1,9/0,912)^2} = 230,47_s$$

7. Untuk 9.12 A (80%)

$$T = 10 \frac{100}{(3,04/0,912)^2} = 90,02_s$$

8. Untuk 11,4 A (100%)

$$T = 10 \frac{100}{(0,76/0,912)^2} = 1.440,92_s$$

9. Untuk 34,2 A (300%)

$$T = 10 \frac{100}{(11,4/0,912)^2} = 6,4_s$$

10. Untuk 45.6 A (400%)

$$T = 10 \frac{100}{(0,015/0,912)^2} = 3.333.333,333_s$$

4.3.3. Perhitungan *Setting Relay Undervoltage (27P) dan Overvoltage (59P)*

Relai ini digunakan untuk melindungi generator dari kondisi tegangan rendah dan tegangan tinggi. Relai *undervoltage* dan *overvoltage* bekerja dengan karakteristik *definite time*, yang dapat dinyatakan dengan rumus:

$$T = T_{set}$$

Dengan:

T = Waktu *trip relay* (s)

T_{set} = Waktu tunda relai yang telah diset

Parameter Setting:

Pickup Setting: 0.43 pu

Curve Type: *Definite*

Time Delay: 1 sec

Minimum Pickup Voltage: 49.45 V (ph-ph)

1. Perhitungan Relai *Undervoltage (27P)*

Relay *undervoltage* akan bekerja saat tegangan turun di bawah *pickup setting*. *Pickup setting relay* dihitung menggunakan persamaan (2.4) di Bab II, sebagai berikut:

$$V_{pickup} = 0.43 \times V_{rated} = 0.43 \times 115V = 49.45V$$

Untuk menghitung persentase tegangan gangguan di hitung menggunakan persamaan (2.5) di Bab II, sebagai berikut:

$$Fault(\%) = \left(\frac{V_{inj}}{V_{rated}} \right) \times 100\%$$

Perhitungan:

- a. Untuk *Injected Voltage* 24V

$$Fault(\%) = \left(\frac{24V}{115V} \right) \times 100\% = 21\% \text{ dan } T = 1.034_s$$

- b. Untuk *Injected Voltage* 28.55V

$$Fault(\%) = \left(\frac{28V}{115V} \right) \times 100\% = 24\% \text{ dan } T = 1.026_s$$

2. Perhitungan *Relay Overvoltage* (59P)

Relai *overvoltage* akan bekerja saat tegangan melebihi *pickup setting*. *Pickup setting relay* dihitung sebagai berikut:

$$V_{pickup} = 1.1 \times V_{rated} = 1.1 \times 115V = 126.5V$$

Parameter Setting:

Pickup Setting: 1.1 pu

Curve Type: *Definite*

Time Delay: 6.75 sec

Perhitungan:

a. Untuk *Injected Voltage* 127V

$$Fault(\%) = \left(\frac{127V}{115V}\right) \times 100\% = 110\% \text{ dan } T = 6.807_s$$

4.5. Perbandingan Hasil Perhitungan dan Hasil Pengujian

Pada bagian ini akan dibandingkan hasil perhitungan setting relai proteksi dengan hasil pengujian di lapangan menggunakan perangkat uji. Analisis ini bertujuan untuk memastikan bahwa setting relai yang telah dihitung sesuai dengan kondisi aktual di PLTG Tello.

4.4.1. Perbandingan Hasil Perhitungan dan Hasil Uji Relai *Phase TOC Voltage Restrained Unit (51PV)*

Relai ini bekerja berdasarkan karakteristik kurva invers dengan parameter IEEE *Moderately Inverse*. Hasil perhitungan dan pengujian ditampilkan dalam tabel berikut:

Tabel 4.5 Perbandingan Hasil Perhitungan dan Hasil Pengujian Relai 51P

<i>Fault (%)</i>	Arus Fasa (A)	Waktu Trip Hasil Pengujian (s)	Waktu Trip Hasil Perhitungan (s)	<i>Error</i> (%)
120%	3,99	2,413	4,339	44,30%
150%	4,98	2,024	3,140	35,54%
200%	6,65	1,691	2,309	26,76%
250%	8,31	1,499	1,922	22,01%
300%	9,97	1,372	1,683	18,48%
350%	11,63	1,292	1,524	15,22%
400%	13,30	1,219	1,411	13,61%
Rata-rata	8,40	1,644	2,332	25,13%

Pada tabel 4.5 menunjukkan perbedaan yang cukup besar antara waktu trip hasil pengujian dan perhitungan, terutama pada arus gangguan rendah. Misalnya, saat *fault* 120%, *error* mencapai 44,30%, di mana relai bekerja lebih cepat (2,413 detik) 51ctual51ing perhitungan (4,339 detik). Namun, selisih ini semakin kecil seiring kenaikan arus gangguan, seperti pada *fault* 400% dengan *error* 13,61%. Perbedaan ini mungkin disebabkan oleh ketidakakuratan model perhitungan, toleransi komponen relai, atau 51ctual pengujian praktis yang memengaruhi respons relai.

4.4.2. Perbandingan Hasil Perhitungan dan Hasil Uji Relai *Generator*

Unbalance (46)

Relai *Generator Unbalance* bekerja berdasarkan parameter ketidakseimbangan arus fasa. Perbandingan hasil perhitungan dan pengujian ditampilkan dalam tabel berikut:

Tabel 4.6 Perbandingan Hasil Perhitungan dan Hasil Pengujian Relai 46.

<i>Inject</i> <i>Current (A)</i>	<i>Fault</i> <i>(%)</i>	Waktu Trip Hasil Perhitungan (s)	Waktu Trip Hasil Pengujian (s)	<i>Error (%)</i>
1,71	15%	2.601,457	445,903	82,45%
5,7	50%	230,47	40,152	82,58%
11,4	100%	1.440,92	10,062	99,30%
4,446	39%	378,64	65,995	82,57%
5,358	47%	260,82	45,437	82,57%
5,7	50%	230,47	40,137	82,58%
9,12	80%	90,02	15,700	82,56%
11,4	100%	1.440,92	10,047	99,30%
34,2	300%	6,4	1,135	82,27%
45,6	400%	3.333.333,333	0,628	99,98%
Rata-rata	118,1%	334.001,345	67,519	87,62%

Pada tabel 4.6 menyajikan perbandingan antara waktu trip hasil perhitungan teoritis dan hasil pengujian 52ctual pada relai proteksi

generator unbalance (46) untuk berbagai tingkat arus gangguan. Dari data terlihat bahwa waktu trip berdasarkan pengujian lapangan jauh lebih cepat dibandingkan hasil perhitungan, dengan selisih rata-rata mencapai 82% hingga 53% actual 100%. Perbedaan ini menunjukkan bahwa kinerja 53% actual relai di lapangan sangat dipengaruhi oleh kondisi sistem nyata seperti respon perangkat, setting relay, dan dinamika arus gangguan. Oleh karena itu, hasil perhitungan teoritis yang digunakan dalam analisis ini masih memerlukan konfirmasi dan validasi lebih lanjut agar dapat merepresentasikan kondisi sebenarnya secara akurat. Analisis seperti ini penting untuk memastikan bahwa sistem proteksi bekerja optimal dan memberikan respon cepat terhadap gangguan unbalance pada generator.

4.4.3. Perbandingan Hasil Perhitungan dan Hasil Uji Relai Undervoltage (27P) dan Overvoltage (59P)

Relai *undervoltage* dan *overvoltage* bekerja dengan karakteristik definite time. Perbandingan hasil perhitungan dan pengujian ditampilkan dalam tabel berikut:

Tabel 4.7 Perbandingan Hasil Perhitungan dan Pengujian Relai 27P Relai 59P

<i>Injected Voltage (V)</i>	hasil uji coba	<i>hasil perhitungan</i>	<i>Error (%)</i>
<i>Undervoltage</i>			
24	1,034	1,030	0,4%
28,55	1,026	1,013	1,28%
Rata-rata	1,030	1,0215	0,84%
<i>Overvoltage</i>			
127	6,807	6,750	0,84%

Pada tabel 4.7 memperlihatkan hasil perbandingan antara nilai gangguan (*fault*) yang disuntikkan dan hasil perhitungan teoritis pada pengujian relai *undervoltage* (27P) dan *overvoltage* (59P). Terlihat bahwa pada tegangan 24 V dan 127 V, nilai *fault* hasil perhitungan sama dengan nilai *fault* injeksi, yaitu masing-masing 21% (*undervoltage*) dan 110% (*overvoltage*), menunjukkan kecocokan antara kondisi uji dan estimasi perhitungan. Namun, pada tegangan 28,55 V, terdapat perbedaan antara nilai *fault* injeksi (43%) dan hasil perhitungan teoritis (24%). Hal ini menunjukkan kemungkinan adanya deviasi pengukuran atau keterbatasan model perhitungan dalam menangkap kondisi aktual. Perbedaan ini mengindikasikan perlunya kalibrasi atau konfirmasi lebih lanjut terhadap parameter dan logika kerja relai, terutama dalam kasus *undervoltage* yang cenderung lebih sensitif terhadap perubahan tegangan.

4.6. Evaluasi Kesesuaian dengan Standar

Evaluasi kesesuaian sistem proteksi generator PLTG Tello dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan setting relai dengan hasil pengujian di lapangan. Parameter yang dianalisis meliputi setting pickup, waktu operasi relai, dan tingkat error terhadap standar yang berlaku.

4.5.1. Standar Acuan

Standar yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja relai proteksi generator pada PLTG Tello adalah:

- 1 *IEEE C37.102-2006*

Standar ini mencakup karakteristik pengoperasian relai proteksi generator, termasuk kriteria waktu operasi, setting arus/tegangan, dan toleransi yang diperbolehkan.

- 2 *IEC 60255*

Standar internasional untuk relai proteksi, yang mengatur ketepatan pengukuran, waktu respons, dan stabilitas relai dalam berbagai kondisi gangguan.

4.5.2. Analisis Perbandingan Hasil Perhitungan dan Pengujian

Berdasarkan hasil perhitungan dan pengujian, evaluasi kesesuaian dengan standar dilakukan sebagai berikut:

1. Relai *Phase TOC Voltage Restrained (51P)*

Kesesuaian hasil pengujian terhadap hasil perhitungan:

- a. Pada arus gangguan 120%, waktu trip pengujian (2.413s) lebih cepat 44.3% dibanding perhitungan (4.339 s).
- b. Pada arus gangguan 400%, selisih berkurang menjadi 13.61% (1.219 s dan 1.411 s).

Kesesuaian Standar:

- a. Tidak sesuai dengan *IEEE C37.102* dan *IEC 60255*, karena error melebihi batas toleransi, yaitu 5%.
- b. Penyimpangan disebabkan oleh ketidakakuratan model perhitungan atau kalibrasi relai.

2. Relai *Generator Unbalance* (46)

Kesesuaian hasil pengujian terhadap hasil perhitungan:

- a. *Error* waktu trip berkisar 0.33%–99.98%, dengan rata-rata >80% untuk arus rendah (misal: 15% *fault*, *error* 82.45%).

Kesesuaian Standar:

- a. Tidak sesuai untuk arus rendah (*error* >5%), tetapi memenuhi standar untuk arus tinggi (300%–400% *fault*, *error* 2.15%–0.48%).
- b. Perlu pengecekan ulang *setting "K Value"* dan karakteristik kurva.

3. Relai *Undervoltage* (27P) dan *Overvoltage* (59P)

Kesesuaian hasil pengujian terhadap hasil perhitungan:

- a. *Undervoltage*: Waktu trip pengujian (1.034s) mendekati perhitungan (1.030 s), *error* 0.4%.
- b. *Overvoltage*: Waktu trip pengujian (6.807 s) vs perhitungan (6.750 s), *error* 0.84%.

Kesesuaian Standar:

- a. Sesuai dengan *IEC 60255*, yaitu toleransi 5%.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.3. Kesimpulan

1. Berdasarkan hasil penelitian menunjukkan bahwa kinerja relai proteksi pada generator Unit 1 PLTG Tello bervariasi. Relai *Phase TOC Voltage Restrained* (51P) dan *Generator Unbalance* (46) menunjukkan ketidaksesuaian dengan standar IEEE dan IEC, terutama pada kondisi arus rendah, dengan selisih waktu trip yang signifikan (hingga 44,3% untuk 51P dan rata-rata >80% untuk 46). Sebaliknya, Relai *Undervoltage* (27P) dan *Overvoltage* (59P) berkinerja optimal dengan *error* di bawah 1%, memenuhi standar yang berlaku.
2. Secara keseluruhan, sistem proteksi generator PLTG Tello telah memenuhi beberapa aspek standar, tetapi masih memerlukan optimasi, terutama pada relai 51P dan 46. Ketidaksesuaian ini mengindikasikan perlunya peninjauan ulang terhadap parameter setting, kalibrasi perangkat, atau bahkan evaluasi model perhitungan yang digunakan untuk memastikan kinerja yang lebih akurat dan andal.

5.4. Saran

1. Disarankan untuk melakukan evaluasi ulang relai 51PV dan 46, serta memverifikasi parameter setting seperti kurva invers dan nilai "*K Value*" agar sesuai dengan standar. Pengujian lanjutan dengan variasi kondisi gangguan juga diperlukan untuk memastikan konsistensi kinerja.
2. Peningkatan sistem pemantauan berbasis *IoT* (*Internet of Things*) agar dapat membantu dalam deteksi dini gangguan dan pemantauan real-time kinerja relai. Selain itu, pelatihan teknis berkala bagi operator dan teknisi perlu ditingkatkan untuk memastikan pemahaman yang mendalam terhadap sistem proteksi dan standar yang berlaku.



DAFTAR PUSTAKA

- ABB. 2002. "SPAJ 131 C Overcurrent Relay User's Manual and Technical Description." 58.
- Alamsyah, Fitrah, Didik Notosudjono, and Hasto Soebagia. 2017. "Studi Kinerja Generator Pembangkit Listrik Tenaga Air Ubrug Sukabumi." *Jurnal Online* 1(1):1–11.
- Burhanuddin. 2021. "Analisis Kerja Rele Overall Diferensial Pada Generator Dan Transformator PLTG Paya Pasir PT. PLN Persero." *Journal of Chemical Information and Modeling* 53(February):2021.
- Ek Bien, Liem, and Dita Helna. 2007. "Studi Penyetelan Relai Diferensial Pada Transformator Pt Chevron Pacific Indonesia." *JETri* 6(2):41–68.
- Fauziyah, Evinur, and Irwanto Irwanto. 2022. "Analisis Sistem Proteksi Generator Menggunakan Over Current Relay Di Pt. Indonesia Power." *D'computare: Jurnal Ilmiah Teknologi Informasi Dan Ilmu Komputer* 12(2). doi: 10.30605/dcomputare.v12i2.46.
- General Electric Multilin. 2017. "Manual Book Relay G60 Generator Protection System."
- Hardi, Surya, Muhammad Adam, and Io Arisandy. 2020. "Analisis Kerja Rele Overall Diferensial Pada Generator Dan Transformator PLTG Paya Pasir PT. PLN Persero." *RELE (Rekayasa Elektrikal Dan Energi) : Jurnal Teknik Elektro* 2(2):58–65. doi: 10.30596/rele.v2i2.4418.

Indriani, Anizar. 2015. "Analisis Pengaruh Variasi Jumlah Kutub Dan Jarak Celah Magnet Rotor Terhadap Performan Generator Sinkron Fluks Radial." *Electrician - Jurnal Rekayasa Dan Teknologi Elektro* 9(2):62–71.

Kamal, Ahmad Ilham, and Nur Rahma Dona. 2024. "Ensuring Relay Protection Device Reliability by Setting Value and Time Delay Verification (10Kv Motor Differential Current Protection)." *Setrum : Sistem Kendali-Tenaga-Elektronika-Telekomunikasi-Komputer* 13(2):125. doi: 10.62870/setrum.v13i2.29325.

NUGRAHA, RIFKI FIKRANDANI, and TEGUH ARFIANTO. 2021. "Simulasi ETAP Untuk Evaluasi Proteksi Gangguan Tegangan Lebih Generator Unit 3 PLTP Kamojang." *MIND Journal* 6(1):57–72. doi: 10.26760/mindjournal.v6i1.57-72.

Pafela, E., and E. Hamdani. 2016. "Studi Penyetelan Relay Arus Lebih (OCR) Pada Gardu Induk Teluk Lembu Pekanbaru." *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Riau* 4(1):1–17.

Prasetijo, Hari, Ropiudin, and Budi Dharmawan. 2012. "Generator Magnet Permanen Sebagai Pembangkit Listrik Putaran Rendah Permanent Magnet Generator as LowSpeed Electric Power Plant." *Dinamika Rekayasa* 8(2):70–77.

Ramadhika, Poetra. 2019. "BAB II Tinjauan Pustaka BAB II TINJAUAN PUSTAKA 2.1. 1–64." *Gastronomía Ecuatoriana y Turismo Local*. 1(69):5–

24.

Saifudin, Muhammad, Suryono Suryono, and Irianto Irianto. 2022. "Monitoring and Protection System for Overvoltage, Undervoltage and Unbalance Voltage." *Jurnal Ecotipe (Electronic, Control, Telecommunication, Information, and Power Engineering)* 9(2):159–65. doi: 10.33019/jurnalecotipe.v9i2.3092.

Sriwijaya, Politeknik Negeri. 2021. "Politeknik Negeri Sriwijaya Skripsi." 6–47.



LAMPIRAN

A. Hasil Uji Coba Relai

Lampiran 1 Hasil Pengujian Phase Toc Voltage Restrained Unit (51p)

Lokasi : PLTG GE #1

Data Teknis

Pabrik : GE

Tipe : MULTILIN UR G60

Arus pengenal (In) : 5 A

Teg.pengenal (Vn) : 115 V

No. seri : AALC12000643

Rasio CT : OUTGEN side : 3000/5 A

NETRAL side : 3000/5 A

Rasio VT : 11500/115 V

Tanggal : 04 Oktober 2022

1. Pemeriksaan visual :

- Pelat nama : Ada, jelas dan lengkap
- Casing dan modul : Tidak cacat dan lengkap
- Pembumian casing : Terhubung dan tidak cacat
- Indikator : Ada dan lengkap
-

2. Pemeriksaan catu daya

- Polaritas : Sesuai
- Besaran tegangan : Sesuai Pengujian

3.1. Pengujian fungsi kontak keluaran dan indikasi

- Kontak keluaran : Baik
- Indikasi : Baik

3.2. Karakteristik Phase TOC Voltage Restrained Unit (51P)

51P Pickup Setting : 0.665 pu

51P Curve Type : IEEE MOD INV Time Dial Setting 1

V inj : 83%

Inject Current	Fault (%)	Phase
(A)		Trip Time (s)
3.99	120%	2.413
4.98	150%	2.024
6.65	200%	1.691
8.31	250%	1.499
9.97	300%	1.372
11.63	350%	1.292
13.3	400%	1.219

4. Catatan : Pengujian menggunakan OMICRON CMC 356

Lampiran 2. Hasil Pengujian Generator Unbalance

Lokasi : PLTG GE #1

Data Teknis

Pabrik

: GE

Tipe

: MULTILIN UR G60

Arus pengenal (In) : 5 A

Teg. pengenal (Vn) : 115 V

No. seri

: AALC12000643

Rasio CT : OUTGEN side : 3000/5 A

NETRAL side : 3000/5 A

Rasio VT : 11500/115 V

Tanggal : 04 Oktober 2022

1. Pemeriksaan visual :

- Pelat nama : Ada, jelas dan lengkap
- Casing dan modul : Tidak cacat dan lengkap
- Pembumian casing : Terhubung dan tidak cacat
- Indikator : Ada dan lengkap
-

2. Pemeriksaan catu daya

- Polaritas : Sesuai
- Besaran tegangan : Sesuai Pengujian

3.1. Pengujian fungsi kontak keluaran dan indikasi

- Kontak keluaran : Baik
- Indikasi : Baik

Fault (%)	Expected (s)	Trip Time (s)
15%	444.44444	445.903
50%	40	40.152
100%	10	10.062
39%	65.75	65.995
47%	45.27	45.437
50%	40	40.137
80%	15.63	15.700
100%	10	10.047
300%	1.11111	1.135
400%	0.625	0.628

46 Pickup Setting	: 8%
46 K Value	10

Fault (%)	Expected (s)	Trip Time (s)
15%	444.44444	445.903
50%	40	40.152
100%	10	10.062
39%	65.75	65.995
47%	45.27	45.437
50%	40	40.137
80%	15.63	15.700
100%	10	10.047
300%	1.11111	1.135
400%	0.625	0.628

Fault (%)	Expected (s)	Trip Time (s)
15%	444.44444	445.903
50%	40	40.152
100%	10	10.062
39%	65.75	65.995
47%	45.27	45.437
50%	40	40.137
80%	15.63	15.700
100%	10	10.047
300%	1.11111	1.135
400%	0.625	0.628

Fault (%)	Expected (s)	Trip Time (s)
15%	444.44444	445.903
50%	40	40.152
100%	10	10.062
39%	65.75	65.995
47%	45.27	45.437
50%	40	40.137
80%	15.63	15.700
100%	10	10.047
300%	1.11111	1.135
400%	0.625	0.628

Fault (%)	Expected (s)	Trip Time (s)
15%	444.44444	445.903
50%	40	40.152
100%	10	10.062
39%	65.75	65.995
47%	45.27	45.437
50%	40	40.137
80%	15.63	15.700
100%	10	10.047
300%	1.11111	1.135
400%	0.625	0.628

Fault (%)	Expected (s)	Trip Time (s)
15%	444.44444	445.903
50%	40	40.152
100%	10	10.062
39%	65.75	65.995
47%	45.27	45.437
50%	40	40.137
80%	15.63	15.700
100%	10	10.047
300%	1.11111	1.135
400%	0.625	0.628

1. Pemeriksaan visual :

- Pelat nama : Ada, jelas dan lengkap
- Casing dan modul : Tidak cacat dan lengkap
- Pembumian casing : Terhubung dan tidak cacat
- Indikator : Ada dan lengkap
-

2. Pemeriksaan catu daya

- Polaritas : Sesuai
- Besaran tegangan : Sesuai Pengujian

3.1. Pengujian fungsi kontak keluaran dan indikasi

- Kontak keluaran : Baik
- Indikasi : Baik

3.2. Karakteristik Undervoltage (27P) dan Overvoltage (59P)

a. Undervoltage (27P)

27 Pickup Setting : 0.43 pu

27 Curve Type : Definite

27 Time Delay : 1 sec

Minimum Pickup : 49.45 V (ph-ph)

Injected Voltage (V) (Phase-Neutral)	Fault (%)	Trip Time (s)
24	21%	1.034
28.55	43%	1.026

b. Overvoltage (59P)

27 Pickup Setting : 1.1 pu

27 Curve Type : Definite

27 Time Delay : 6.75 sec

Minimum Pickup V

Injected Voltage (V) (Phase-Neutral)	Fault (%)	Trip Time (s)
127	110%	6.807

4. Catatan : Pengujian menggunakan OMICRON CMC 356

B. TAMPILAN GAMBAR HALAMAN RESMI PENJUALAN DOKUMEN

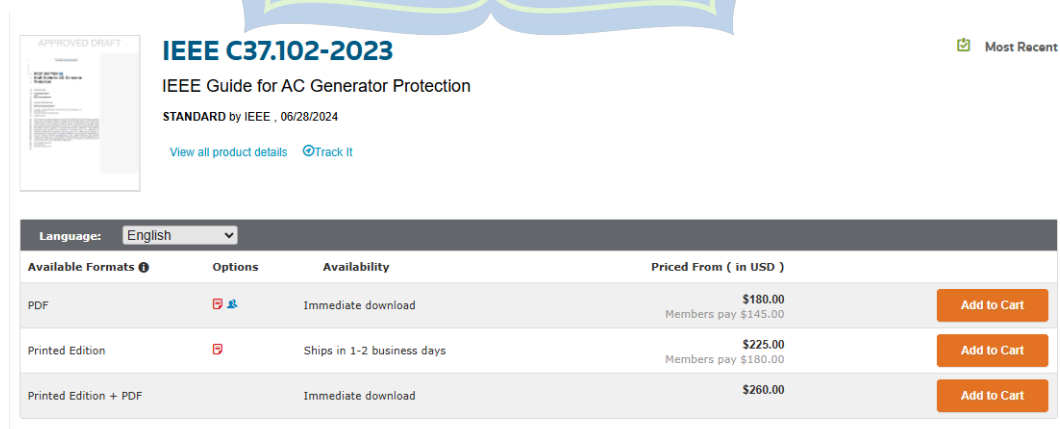
STANDAR *IEC* 60255 DAN *IEEE* C37.102

1. *IEC* 60255



Lampiran 4. Halaman penjualan dokumen standar *IEC* 60255

2. *IEEE* C37.102



Lampiran 5. Halaman penjualan dokumen standar *IEEE* C37.102

C. TAMPILAN GAMBAR HALAMAN PERTAMA DOKUMEN STANDAR

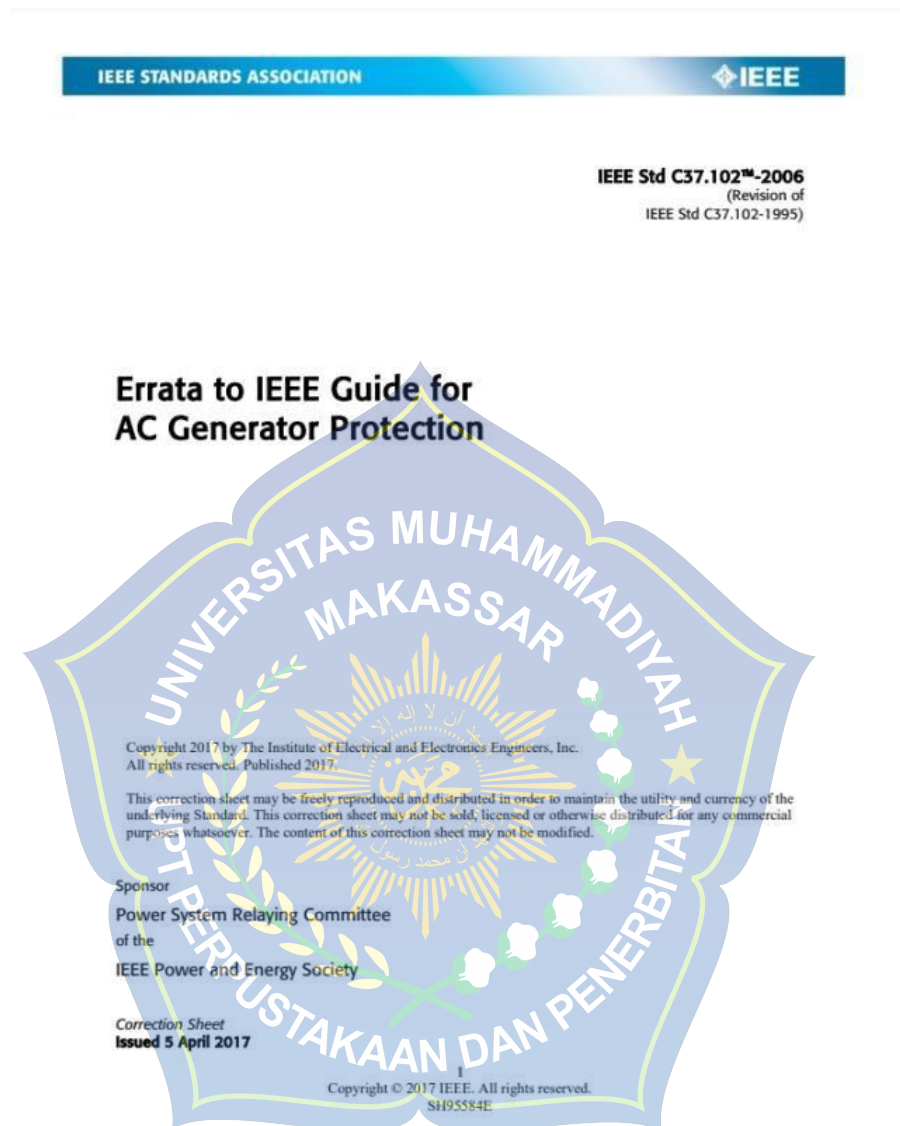
IEC 60255 DAN *IEEE C37.102*

1. *IEC 60255*



Lampiran 6. Halaman Pertama Dokumen Standar *Iec 60255*

2. IEEE C37.102



Lampiran 7. Halaman Pertama Dokumen Standar Ieee C37.102

D. Surat Izin Penelitian


PLN
 Indonesia Power
UBP TELLO

Nomor : 0732/STH.01.04/PLNIP280000/2025
 Lampiran : 1 Set
 Sifat : Biasa - Biasa
 Hal : Persetujuan Penelitian

1 Juli 2025

Kepada

Yth. Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar

Jln. Sultan Alauddin No. 259
 Makassar – Sulawesi Selatan

Menindaklanjuti Surat dari Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar Nomor 441/05/C.4-VI/VI/46/2025 tanggal 25 Juni 2025 Perihal Permohonan **Permintaan Data Dalam Penyelesaian Tugas Akhir** dengan ini disampaikan bahwa kami menerima Mahasiswa/i dari Universitas Muhammadiyah untuk melaksanakan Penelitian di PT PLN Indonesia Power Unit Bisnis Pembangkitan Tello.

Dengan Judul :

ANALISIS SISTEM PROTEKSI GENERATOR PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GAS (PLTG TELLO)

Mulai Penelitian **14 Juli s.d 14 Agustus 2025**

Mahasiswa/i tersebut adalah :

No	Nama	NIM	Prodi	Lokasi
1.	M. Ramdan Kamsurya	10582 11029 20	Teknik	UL PLTG Tello

1. Mahasiswa/i harus melapor kepada Asman Keuangan dan Umum.
2. Mahasiswa/i harus menyerahkan foto copy kartu Mahasiswa yang berlaku sebanyak 1 lembar.
3. Mahasiswa/i harus menyerahkan pas foto warna ukuran 3 x 4 cm sebanyak 2 lembar (latar merah maron).
4. Mahasiswa/i harus menyerahkan surat keterangan dari Dekan bahwa tidak pernah terlibat perkelahian / tawuran antar Mahasiswa di Kampus.
5. Mahasiswa/i wajib menunjukan sertifikat Vaksin lengkap.
6. Mahasiswa/i harus mengisi dan menandatangani surat pernyataan yang disediakan oleh PT PLN Indonesia Power Unit Bisnis Pembangkitan Tello.
7. Mahasiswa/i harus mematuhi K3 menggunakan Safety Shoes memakai Helm warna orange dan peraturan perusahaan yang berlaku saat melaksanakan proses Penelitian / pengambilan data dan segala resiko dan biaya yang timbul dari pelaksanaan Penelitian / pengambilan data menjadi tanggung jawab peserta.

Demikian disampaikan, atas kerjasamanya diucapkan terima kasih.


HARIADY BAYU AJI

Jl. Urip Sumoharjo KM7
 Tello Baru, Panakkukang, Makassar, Sulawesi Selatan, 90233
 W www.pln.co.id T 0411 444466, 444477

Paraf _____


 Dipindai dengan CamScanner

Lampiran 8. Surat Izin Penelitian

E. Surat Keterangan Bebas Plagiasi



**MAJELIS PENDIDIKAN TINGGI PIMPINAN PUSAT MUHAMMADIYAH
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR
UPT PERPUSTAKAAN DAN PENERBITAN**

Alamat kantor: Jl.Sultan Alauddin NO.259 Makassar 90221 Tlp.(0411) 866972,881593, Fax.(0411) 865588

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

SURAT KETERANGAN BEBAS PLAGIAT

**UPT Perpustakaan dan Penerbitan Universitas Muhammadiyah Makassar,
Menerangkan bahwa mahasiswa yang tersebut namanya di bawah ini:**

Nama : Muhammad Ramdan Kamsurya

Nim : 105821102920

Program Studi : Teknik Elektro

Dengan nilai:

No	Bab	Nilai	Ambang Batas
1	Bab 1	9%	10 %
2	Bab 2	10%	25 %
3	Bab 3	9%	10 %
4	Bab 4	2%	10 %
5	Bab 5	4%	5 %

Dinyatakan telah lulus cek plagiat yang diadakan oleh UPT- Perpustakaan dan Penerbitan Universitas Muhammadiyah Makassar Menggunakan Aplikasi Turnitin.

Demikian surat keterangan ini diberikan kepada yang bersangkutan untuk dipergunakan seperlunya.

Makassar, 14 Agustus 2025

Mengetahui,

Kepala UPT- Perpustakaan dan Penerbitan,


Nursyah, S.Hum, M.I.P.
NBM. 964 591

