

SKRIPSI

**MODEL DAN SIMULASI RELAI DIFERENSIAL-FASE (87G)
GENERATOR PLTG TELLO TERHADAP GANGGUAN
HUBUNG-SINGKAT SIMETRIS DI SEPANJANG BELITAN STATOR
BERBASISKAN PERANGKAT LUNAK *PSCAD***



OLEH:

ANDIKA HASPRI
105821102321

KAMELIA
105821102521

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR**

2025

HALAMAN JUDUL

**MODEL DAN SIMULASI RELAI DIFERENSIAL-FASE (87G)
GENERATOR PLTG TELLO TERHADAP GANGGUAN
HUBUNG-SINGKAT SIMETRIS DI SEPANJANG BELITAN STATOR
BERBASIS PERANGKAT LUNAK *PSCAD***

SKRIPSI

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mendapatkan Gelar
Sarjana Teknik (S.T) Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Makassar

OLEH:

ANDIKA HASPRI
105821102321

KAMELIA
105821102521

**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 : **MODEL DAN SIMULASI RELAI DIFERENSIAL – FASE (87G) GENERATOR PLTG TELLO TERHADAP GANGGUAN HUBUNG-SINGKAT SIMETRIS DI SEPANJANG BELITAN STATOR BERBASIS PERANGKAT LUNAK PSCAD**

Nama : 1. Andika Haspri

2. Kamelia

Stambuk : 1. 105 82 11023 21

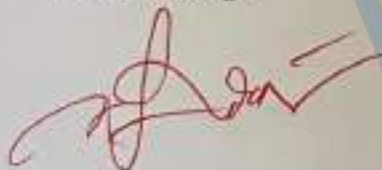
2. 105 82 11025 21

Makassar, 27 Agustus 2025

Telah Diperiksa dan Disetujui
Oleh Dosen Pembimbing:

Pembimbing I

Pembimbing II


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


Ir. Abdul Hafid, M.T
NIP. 9019086209



Mengetahui,
Ketua Prodi Teknik Elektro


Ir. Rahmania, S.T., M.T
NIP. 1005 971





FAKULTAS TEKNIK

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

PENGESAHAN

Skripsi atas nama **Andika Haspri** dengan nomor induk Mahasiswa 105 82 11023 21 dan **Kamelia** dengan nomor induk Mahasiswa 105 82 11025 21, dinyatakan diterima dan disahkan oleh Panitia Ujian Tugas Akhir/Skripsi sesuai dengan Surat Keputusan Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar Nomor : 0005/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, 23 Agustus 2025.

Panitia Ujian :

1. Pengawas Umum

Makassar,

04 Rabiul Awwal 1447 H

27 Agustus 2025 M

a. Rektor Universitas Muhammadiyah Makassar

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

b. Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

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

2. Penguji

a. Ketua : Dr. Eng. Ir. H. Zulfari Basri Hasanuddin, M.Eng

b. Sekretaris : Dr. Ir. Ridwang, S.Kom, M.T., IPM

3. Anggota

: 1. Dr. Hj. Rossy Timur Wabyuningsih, S.T., M.T

2. Dr. Ir. Zahir Zamuddin, M.Sc

3. Lisa Fitriani Ishak, ST., MT

Mengolahui

Pembimbing I

Pembimbing II

Andi Fajaruddin, S.T., M.T.

NIP. 132160986

Ir. Abdul Hafid, M.T.

NIP. 8019086209



Dekan

Dr. Mon. Syafiat S Kuba, S.T., M.T., IPM

NBM : 975 288



KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kami panjatkan kepada Tuhan yang Maha Esa atas berkat dan rahmat-Nyalah sehingga kami dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul **“MODEL DAN SIMULASI RELAI DIFERENSIAL-FASE (87G) GENERATOR PLTG TELLO TERHADAP GANGGUAN HUBUNG-SINGKAT SIMETRIS DI SEPANJANG BELITAN STATOR BERBASIS PERANGKAT LUNAK *PSCAD*”**. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memenuhi tugas akademik pada program Strata-1 di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini tidak akan selesai tanpa bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini kami ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Ir. H. Abd Rakhim Nanda, S.T., M.T., IPU. Selaku Rektor Universitas Muhammadiyah Makassar.
2. Bapak Ir. Muh Syafaat S. Kuba, S.T., M.T., IPM. Selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.
3. Ibu Ir. Rahmania, S.T., M.T., IPM. Selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.
4. Bapak Andi Fharuddin, S.T., M.T. Selaku Dosen Pembimbing 1 dan Bapak Ir. Abdul Hafid, M.T. Selaku Dosen Pembimbing 2.
5. Kepada seluruh staf administrasi pada Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.

6. Kepada PT. PLN ULTG Panakkukang, PT. PLN Indonesia *Power* UBP Tello, atas izin penelitian serta penyediaan data. Bapak Zaqki Destian, Bapak Irwan, Ibu Rahayu Utari dan seluruh pegawai/staf operator, security yang telah membantu kami dalam pengambilan data penelitian.
7. Kepada orang tua kami serta keluarga yang telah memberikan do`a, dorongan dan motivasi kepada kami.

Dalam penyusunan skripsi ini kami telah berusaha untuk memberikan yang terbaik, namun karena keterbatasan sebagai manusia biasa yang tidak lepas dari kekurangan, kami masih menyadari bahwa masih terdapat kekurangan dalam penyusunan skripsi ini, namun dengan keterbatasan yang ada, kami berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca, PLN, dan penulis.

Makassar,

September 2025

Penulis

ABSTRAK

PLTG adalah pembangkit listrik yang mengubah energi kimia gas menjadi listrik melalui turbin dan generator, dengan keunggulan *start-up* cepat sehingga cocok untuk memenuhi kebutuhan beban puncak secara fleksibel. Selain operasi normal, pembangkit dalam hal ini generator juga bisa mengalami kondisi operasi abnormal atau disebut gangguan. Gangguan yang paling berpotensi mendatangkan kerusakan/bahaya besar adalah gangguan hubung-singkat, terutama gangguan hubung-singkat simetris. Salah satu bagian generator atau komponen generator yang berpotensi besar mengalami gangguan hubung-singkat adalah belitan stator. Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan dan menyimulasikan kinerja sistem relai diferensial dalam kondisi gangguan eksternal dan internal menggunakan Perangkat Lunak *PSCAD*. Model Relai Diferensial terdiri atas 2 *CT* (rasio 1), I1 & I2, untuk mengakuisisi data arus di kedua ujung belitan stator, 2 Frekuensi *scanner*, *FFT1* & *FFT2*, berperan mengonversi kedua luaran *CT* untuk menjadi besaran fasor. Selanjutnya, fasor-fasor arus tersebut akan ditampilkan di dalam *Display* dan/atau diolah oleh Algoritma Relai Diferensial *Dual Slope*, yang pada gilirannya, luaran relai, juga akan ditampilkan di dalam *Display*. Model akan bekerja berdasarkan setelan karakteristik yakni: arus *pickup* sebesar 0,2337 kA, kemiringan pertama (*Slope1*) sebesar $5,71^\circ$, dan arus *Break1* (= *Break2*) sebesar 2,687 kA, dan kemiringan kedua (*Slope2*) sebesar $38,66^\circ$. Hasil simulasi menunjukkan bahwa gangguan eksternal di Rel 11,5 kV dan 150 kV GI Tello, PLN Sulselrabar, terespons “*reset*” oleh relai. Sedangkan di sisi lain, untuk kasus gangguan internal di titik 10, 20 ... 100% dari netral Generator #GE1 PLTG Tello, dapat direspons “*pickup*” oleh relai. Secara keseluruhan, model sistem proteksi ini menampilkan kinerja yang tepat baik dalam perspektif selektivitas maupun sensitivitas.

Kata Kunci: Proteksi Generator, Gangguan Simetris, Relai Diferensial, *PSCAD*

ABSTRACT

A Gas Turbine Power Plant is a power generation facility that converts the chemical energy of gas into electricity through a turbine and generator, with the advantage of fast start-up, making it suitable for flexibly meeting peak load demands. In addition to normal operation, the generator may also experience abnormal operating conditions, referred to as faults. The most potentially damaging and hazardous fault is the short-circuit fault, particularly the symmetrical short-circuit fault. One of the generator components that has a high potential to experience a short-circuit fault is the stator winding. This study aims to model and simulate the performance of a differential relay system under both external and internal fault conditions using PSCAD software. The Differential Relay Model consists of 2 CT (ratio 1), I1 & I2, to acquire current data at both ends of the stator winding, and 2 Frequency Scanners, FFT1 & FFT2, which convert the CT outputs into phasor quantities. These current phasors are then displayed and/or processed by the Dual-Slope Differential Relay Algorithm, whose output is also displayed. The model operates based on the following characteristic settings: pickup current of 0.2337 kA, first slope (Slope1) of 5.71°, Break1 (= Break2) current of 2.687 kA, and second slope (Slope2) of 38.66°. Simulation results show that external faults at the 11.5 kV and 150 kV busbars of GI Tello, PLN Sulselrabar, are responded to with a “reset” action by the relay. On the other hand, for internal faults at points 10, 20, and up to 100% from the neutral of Generator #GE1 PLTG Tello, the relay responds with a “pickup” action. Overall, the protection system model demonstrates appropriate performance in terms of both selectivity and sensitivity.

Keywords: Generator Protection, Symmetrical Fault, Differential Relay, PSCAD

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
ABSTRAK	vi
<i>ABSTRACT</i>	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
DAFTAR SINGKATAN DAN ISTILAH	xviii
DAFTAR SIMBOL	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Masalah	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG)	6
2.2 Generator	7
2.3 Sistem Proteksi	13

2.4 Proteksi Generator.....	17
2.5 Relai Diferensial.....	19
2.6 Gangguan Hubung-Singkat.....	26
2.7 MVA Hubung-Singkat.....	29
2.8 Teorema Thevenin.....	31
2.9 Perangkat Lunak <i>PSCAD</i>	34
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	35
3.1 Tempat dan Jadwal Penelitian.....	35
3.2 Alat dan Bahan.....	35
3.3 Langkah Penelitian.....	36
3.4 Variabel Penelitian	39
3.5 Skema Penelitian.....	40
3.6 Prosedur Menentukan Sumber Thevenin (S_{Th})	42
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	44
4.1 Data Sistem	44
4.2 Pemodelan Sumber Thevenin di Rel 150 kV GI Tello.....	46
4.3 Pemodelan Generator #GE1 PLTG Tello	51
4.4 Desain Setelan Karakteristik Relai Diferensial Generator #GE1 Tello	52
4.5 Model Sistem Daya dan Sistem Relai Diferensial Menggunakan Perangkat Lunak <i>PSCAD</i>	55
4.6 Model <i>PSCAD</i> dan Hasil Simulasi Gangguan Eksternal	64
4.7 Model <i>PSCAD</i> dan Hasil Simulasi Gangguan Internal.....	75
BAB V PENUTUP	92
5.1 Kesimpulan	92
5.2 Saran.....	93
DAFTAR PUSTAKA.....	94

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Judul	Halaman
2.1.1	Diagram Alir PLTG	7
2.2.1	Konstruksi Sederhana Generator Sinkron	9
2.5.1	Relai Diferensial Keadaan Normal	21
2.5.2	Relai Diferensial Gangguan Internal	22
2.5.3	Relai Diferensial Gangguan Eksternal	23
2.5.4	Karakteristik Relai Diferensial	23
2.5.5	Karakteristik Relai Diferensial GE G60	26
2.7.1	Ekivalensi Antara Dua Nilai MVA, yang Paralel untuk Gangguan di F	30
2.7.2	Ekivalensi antara Dua Nilai MVA, yang Seri untuk Gangguan di F	31
2.8.1	Rangkaian Thevenin	32
2.8.2	Rangkaian Terhubung Seri Paralel	32
3.5.1	Diagram Segaris Skema Penelitian	42
3.5.2	Diagram Balok Skema Penelitian	43
3.6.1	Diagram Model <i>Grid</i> Sulelrabar di Rel 150 kV GI Tello	44
3.6.2	Diagram Model Ekivalen <i>Grid</i> Sulselrabar di Rel 150 kV GI Tello	44
3.6.3	Diagram Model Proses Ekstraksi #GE1 dengan Ekivalen <i>Grid</i> Sulselrabar di Rel 150 kV Tello	45
4.1.1	Terminal untuk Sumber Thevenin di Rel 150 kV GI Tello	46
4.2.1	Model Generator Thevenin PLN Sulselrabar di Rel 150 kV GI Tello	47

4.2.1.1	Diagram Ekstraksi Kapasitas Hubung-Singkat #GE1 (Tahap Pertama)	47
4.2.2.1	Diagram Ekstraksi Kapasitas Hubung-Singkat #GE1 (Tahap Kedua)	49
4.4.1	Karakteristik Setelan Relai Diferensial #GE1	54
4.5.1	Skema/ Gangguan Eksternal	57
4.5.2	Skema/Konfigurasi Gangguan Internal	58
4.5.3	Model <i>PSCAD</i> Sistem Daya Gangguan Eksternal	59
4.5.4	Model <i>PSCAD</i> Sistem Daya Gangguan Internal	60
4.5.5	Model <i>PSCAD</i> Sistem Relai Diferensial	61
4.5.6	Model Awal <i>Display</i> Sebelum Simulasi	63
4.6.1.1	Model <i>PSCAD</i> untuk Generator #GE1 PLTG Tello yang Terhubung ke <i>Grid</i> Sulselrabar pada Kondisi Gangguan Eksternal di Rel 11,5 kV	64
4.6.1.2	<i>Display</i> Numeris dan Grafis pada Kondisi Gangguan Eksternal di Rel 11,5 kV	65
4.6.1.3	<i>Display</i> Grafik Arus Domain Waktu dan Grafik Arus Domain Fasor Fase-A pada Kondisi Gangguan Eksternal di Rel 11,5 kV	65
4.6.1.4	<i>Display</i> Grafik, Numeris Arus Diferensial dan Arus Bias Fase-A pada Kondisi Gangguan Eksternal di Rel 11,5 kV	66
4.6.1.5	<i>Display</i> Grafik Tegangan Domain Waktu di Rel 150 kV pada Kondisi Gangguan Eksternal di Rel 11,5 kV	66
4.6.2.1	Model <i>PSCAD</i> untuk Generator #GE1 PLTG Tello yang Terhubung ke <i>Grid</i> Sulselrabar pada Kondisi Gangguan Eksternal di Rel 150 kV	69
4.6.2.2	<i>Display</i> Numeris dan Grafis pada Kondisi Gangguan Eksternal di Rel 150 kV	70

4.6.2.3	<i>Display</i> Grafik Arus Domain Waktu dan Grafik Arus Domain Fasor Fase-A pada Kondisi Gangguan Eksternal di Rel 150 kV	70
4.6.2.4	<i>Display</i> Grafik, Numeris Arus Diferensial dan Arus Bias Fase-A pada Kondisi Gangguan Eksternal di Rel 150 kV	71
4.6.2.5	<i>Display</i> Grafik Tegangan Domain Waktu di Rel 150 kV pada Kondisi Gangguan Eksternal di Rel 150 kV	71
4.7.1.1	Model <i>PSCAD</i> untuk Generator #GE1 PLTG Tello yang Terhubung ke <i>Grid</i> Sulselrabar pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 10%	75
4.7.1.2	<i>Display</i> Numeris dan Grafis pada Kondisi Gangguan Internal di titik 10%	76
4.7.1.3	<i>Display</i> Grafik Arus Domain Waktu dan Grafik Arus Domain Fasor Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 10%	76
4.7.1.4	<i>Display</i> Grafik, Numeris Arus Diferensial dan Arus Bias Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 10%	77
4.7.1.5	<i>Display</i> Grafik Tegangan Domain Waktu di Rel 150 kV pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 10%	77
4.7.2.1	Model <i>PSCAD</i> untuk Generator #GE1 PLTG Tello yang Terhubung ke <i>Grid</i> Sulselrabar pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 50%	80
4.7.2.2	<i>Display</i> Numeris dan Grafis pada Kondisi Gangguan Internal di titik 50%	81
4.7.2.3	<i>Display</i> Grafik Arus Domain Waktu dan Grafik Arus Domain Fasor Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 50%	81
4.7.2.4	<i>Display</i> Grafik, Numeris Arus Diferensial dan Arus Bias Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 50%	82

4.7.2.5	<i>Display</i> Grafik Tegangan Domain Waktu di Rel 150 kV pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 50%	82
4.7.3.1	Model <i>PSCAD</i> untuk Generator #GE1 PLTG Tello yang Terhubung ke <i>Grid</i> Sulselrabar pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 100%	85
4.7.3.2	<i>Display</i> Numeris dan Grafis pada Kondisi Gangguan Internal di titik 100%	86
4.7.3.3	<i>Display</i> Grafik Arus Domain Waktu dan Grafik Arus Domain Fasor Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 100%	86
4.7.3.4	Gambar 4.18c. <i>Display</i> Grafik, Numeris Arus Diferensial dan Arus Bias Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 100%	87
4.7.3.5	<i>Display</i> Grafik Tegangan Domain Waktu di Rel 150 kV pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 100%	87



DAFTAR TABEL

Tabel	Judul	Halaman
4.1.1	Data Generator PLTG Tello	44
4.1.2	Data Transformator Daya PLTG Tello	45
4.1.3	Data Hubung-Buka dan Arus Hubung-Singkat di Rel 150 kV GI Tello	45
4.2.1	Parameter Sumber Thevenin di Rel 150 kV GI Tello	51
4.3.1	Parameter Generator #GE1	52
4.4.1	Parameter Setelan Karakteristik	53
4.4.2	Nilai Parameter Karakteristik Setelan Relai Diferensial #GE1	54
4.6.1	Hasil Kinerja Sistem Proteksi untuk Gangguan Eksternal	74
4.6.2	Hasil Perhitungan Secara Matematis untuk gangguan Eksternal	74
4.7.1	Hasil Kinerja Sistem Proteksi untuk Gangguan Internal	90
4.7.2	Hasil Perhitungan Secara Matematis untuk gangguan Internal	91

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Judul	Halaman
A.1	Model <i>PSCAD</i> untuk Generator #GE1 PLTG Tello yang Terhubung ke <i>Grid</i> Sulselrabar pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 20%	97
A.2a	<i>Display</i> Numeris dan Grafis pada Kondisi Gangguan Internal di titik 20%	98
A.2b	<i>Display</i> Grafik Arus Domain Waktu dan Grafik Arus Domain Fasor Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 20%	98
A.2c	<i>Display</i> Grafik, Numeris Arus Diferensial dan Arus Bias Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 20%	99
A.2d	<i>Display</i> Grafik Tegangan Domain Waktu di Rel 150 kV pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 20%	99
A.3	Model <i>PSCAD</i> untuk Generator #GE1 PLTG Tello yang Terhubung ke <i>Grid</i> Sulselrabar pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 30%	100
A.4a	<i>Display</i> Numeris dan Grafis pada Kondisi Gangguan Internal di titik 30%	101
A.4b	<i>Display</i> Grafik Arus Domain Waktu dan Grafik Arus Domain Fasor Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 30%	101
A.4c	<i>Display</i> Grafik, Numeris Arus Diferensial dan Arus Bias Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 30%	102
A.4d	<i>Display</i> Grafik Tegangan Domain Waktu di Rel 150 kV pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 30%	102
A.5	Model <i>PSCAD</i> untuk Generator #GE1 PLTG Tello yang Terhubung ke <i>Grid</i> Sulselrabar pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 40%	103
A.6a	<i>Display</i> Numeris dan Grafis pada Kondisi Gangguan Internal di titik 40%	104

A.6b	<i>Display</i> Grafik Arus Domain Waktu dan Grafik Arus Domain Fasor Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 40%	104
A.6c	<i>Display</i> Grafik, Numeris Arus Diferensial dan Arus Bias Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 40%	105
A.6d	<i>Display</i> Grafik Tegangan Domain Waktu di Rel 150 kV pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 40%	105
A.7	Model <i>PSCAD</i> untuk Generator #GE1 PLTG Tello yang Terhubung ke <i>Grid</i> Sulselrabar pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 60%	106
A.8a	<i>Display</i> Numeris dan Grafis pada Kondisi Gangguan Internal di titik 60%	107
A.8b	<i>Display</i> Grafik Arus Domain Waktu dan Grafik Arus Domain Fasor Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 60%	107
A.8c	<i>Display</i> Grafik, Numeris Arus Diferensial dan Arus Bias Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 60%	108
A.8d	<i>Display</i> Grafik Tegangan Domain Waktu di Rel 150 kV pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 60%	108
A.9	Model <i>PSCAD</i> untuk Generator #GE1 PLTG Tello yang Terhubung ke <i>Grid</i> Sulselrabar pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 70%	109
A.10a	<i>Display</i> Numeris dan Grafis pada Kondisi Gangguan Internal di titik 70%	110
A.10b	<i>Display</i> Grafik Arus Domain Waktu dan Grafik Arus Domain Fasor Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 70%	110
A.10c	<i>Display</i> Grafik, Numeris Arus Diferensial dan Arus Bias Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 70%	111
A.10d	<i>Display</i> Grafik Tegangan Domain Waktu di Rel 150 kV pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 70%	111
A.11	Model <i>PSCAD</i> untuk Generator #GE1 PLTG Tello yang Terhubung ke <i>Grid</i> Sulselrabar pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 80%	112

A.12a	<i>Display</i> Numeris dan Grafis pada Kondisi Gangguan Internal di titik 80%	113
A.12b	<i>Display</i> Grafik Arus Domain Waktu dan Grafik Arus Domain Fasor Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 80%	113
A.12c	<i>Display</i> Grafik, Numeris Arus Diferensial dan Arus Bias Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 80%	114
A.12d	<i>Display</i> Grafik Tegangan Domain Waktu di Rel 150 kV pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 80%	114
A.13	Model <i>PSCAD</i> untuk Generator #GE1 PLTG Tello yang Terhubung ke <i>Grid</i> Sulselrabar pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 90%	115
A.14a	<i>Display</i> Numeris dan Grafis pada Kondisi Gangguan Internal di titik 90%	116
A.14b	<i>Display</i> Grafik Arus Domain Waktu dan Grafik Arus Domain Fasor Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 90%	116
A.14c	<i>Display</i> Grafik, Numeris Arus Diferensial dan Arus Bias Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 90%	117
A.14d	<i>Display</i> Grafik Tegangan Domain Waktu di Rel 150 kV pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 90%	117
B.1	Data Generator PLTG Tello	119
B.2	Data Transformator <i>Step-Up</i> PLTG Tello	120
B.3	Data Diagram Segaris Sistem Sulselrabar	121
B.4	Data Teknis Generator PLTG Tello	122
B.5	Data Diagram Segaris PLTG Tello	123
B.6	Data Hubung-Singkat Gardu Induk Tersebar Sistem Sulbagsel	124

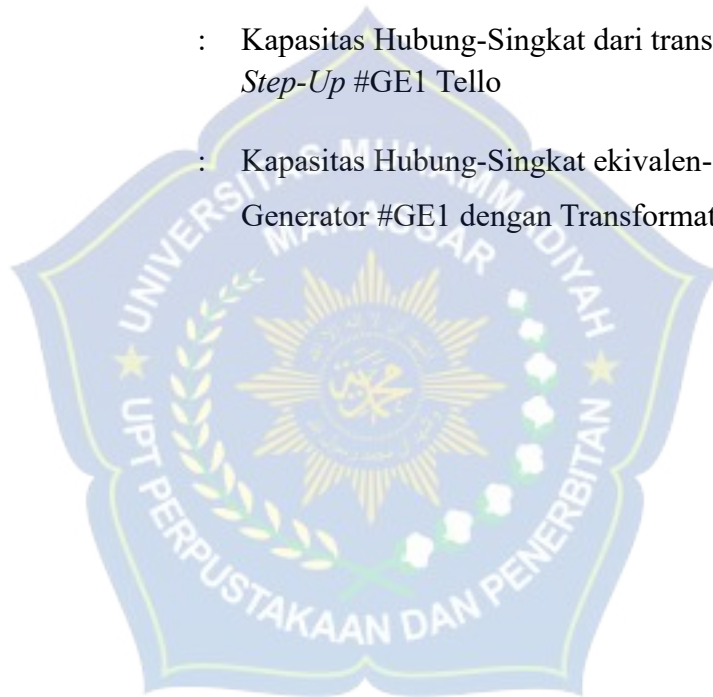
DAFTAR SINGKATAN DAN ISTILAH

<i>PSCAD</i>	: <i>Power System Computer Aided Design</i>
PLN	: Perusahaan Listrik Negara
UBP	: Unit Bisnis Pembangkitan
PLTG	: Pembangkit Listrik Tenaga Gas
<i>Grid</i>	: Jaringan sistem energi listrik
<i>GE</i>	: <i>General Electric</i>
<i>CT</i>	: <i>Current Transformator</i>
<i>VT</i>	: <i>Voltage Transformator</i>
<i>AC</i>	: <i>Alternating Current</i> (Arus Bolak-balik)
<i>DC</i>	: <i>Direct Current</i> (Arus Searah)
I_{dif}	: Arus diferensial (Arus-operasi)
I_{bias}	: Arus bias = <i>restraining</i> (Arus-menahan)
<i>CB</i>	: <i>Circuit Breaker</i>
<i>PICKUP</i>	: Status Kondisi Relai <i>NC</i> ke <i>NO</i> atau <i>NO</i> ke <i>NC</i>
<i>RESET</i>	: Tercegahnya <i>PICKUP</i>
<i>No.</i>	: <i>Normally Open</i>
<i>NC</i>	: <i>Normally Close</i>
<i>Trip</i>	: <i>CB</i> dalam keadaan terhubung
Blok	: <i>CB</i> dalam keadaan terputus

DAFTAR SIMBOL

I	: Arus
V	: Tegangan
S	: Daya semu
A	: Ampere
W	: Watt
f	: Frekuensi
H	: Henry
R	: Resistans
X	: Reaktans
L	: Induktans
Z	: Impedans
Z_{pu}	: Impedans Per Unit
Z_{akt}	: Impedans Aktual
Z_D	: Impedans Dasar
X_L	: Reaktans Induktif
VA	: Volt Ampere
kA	: Kilo Ampere
kVA	: Kilo Volt Ampere
MV	: Mega Volt
MVA	: Mega Volt Ampere
MW	: Mega Watt
MVA_{SC}	: Kapasitas Hubung-Singkat
I_{SC}	: Arus Hubung-Singkat
Hz	: <i>Herzt</i>
F	: <i>Fault</i> (Gangguan)
R_F	: Resistans Gangguan
Ω	: Ohm
$^\circ$	: Derajat

$\angle$	: Sudut
$\approx$	: Kurang lebih sama dengan
S_{Th}	: Kapasitas Hubung-Singkat PLN Sulselrabar di Rel 150 kV GI Tello
S_{Th-2}	: Sumber Thevenin Grid Sulselrabar dikurangi kapasitas Hubung-Singkat #GE1 PLTG Tello
S_{Teg}	: Kapasitas Hubung-Singkat dari #GE1 generator Tello
S_{Tet}	: Kapasitas Hubung-Singkat dari transformator <i>Step-Up</i> #GE1 Tello
S_{Te}	: Kapasitas Hubung-Singkat ekivalen-seri antara Generator #GE1 dengan Transformator <i>Step-Up</i>



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PLTG adalah jenis pembangkit listrik yang mengonversi energi kimia dari bahan bakar gas, menjadi energi mekanik melalui turbin gas, yang kemudian diubah menjadi energi listrik oleh generator. PLTG merupakan salah satu solusi penting dalam penyediaan energi listrik yang fleksibel. Keunggulan PLTG terletak pada waktu *star-up* yang cepat. Oleh karena itu, PLTG sangat sesuai sebagai pembangkit untuk mendukung sistem energi elektrik dalam kondisi beban puncak.

PT. PLN (Persero) Sulselrabar saat ini memiliki kapasitas pembangkitan (Daya Mampu) sebesar 1.930 MW (PLN, 2025). Salah satu jenis pembangkit yang berbahan bakar gas terdapat di PT. PLN Indonesia *Power* UBP Tello, adalah PLTG Tello. PT. PLN Indonesia *Power* UBP Tello memiliki 2 unit PLTG yakni GE#1 dan GE#2. Salah satu unit PLTG yakni PLTG #GE1 memiliki kapasitas daya sebesar 46,56 MVA bertegangan 11,5 kV. Fungsi PLTG Tello ini, sesuai dengan karakter yang disampaikan di atas maka ia juga difungsikan untuk mendukung sistem PLN (Persero) Wilayah Sulselrabar disaat terjadi beban puncak.

Selain operasi normal, pembangkit dalam hal ini generator juga bisa mengalami kondisi operasi abnormal atau disebut gangguan. Gangguan yang paling berpotensi mendatangkan kerusakan/bahaya besar adalah gangguan hubung-singkat, terutama gangguan hubung-singkat simetris. Gangguan simetris, yaitu jenis gangguan serius yang melibatkan semua fase sistem secara bersamaan, seperti

hubung-singkat tiga-fase. Gangguan ini dapat disebabkan oleh kegagalan isolasi, kerusakan mekanis, atau faktor lingkungan seperti sambaran petir. Dampak gangguan simetris sangat besar, karena dapat menyebabkan kerusakan signifikan pada peralatan utama seperti generator dan transformator, serta mengganggu pasokan listrik ke pelanggan. Salah satu bagian generator atau komponen generator yang berpotensi besar mengalami gangguan hubung-singkat adalah belitan stator.

Relai diferensial sangat penting untuk memproteksi seluruh gangguan yang terjadi di belitan stator generator (gangguan internal). Oleh karena itu, setiap gangguan di belitan stator generator akan menyebabkan relai untuk memerintahkan pemutus daya untuk *trip*, sehingga gangguan yang terjadi dapat diisolasi. Sebaliknya, jika gangguan terjadi di luar belitan stator generator (gangguan eksternal) itu akan menyebabkan relai mengirimkan sinyal blok ke pemutus daya. Skripsi ini dimaksudkan untuk memodelkan sistem proteksi diferensial persentase untuk belitan stator generator PLTG Tello sedemikian hingga gangguan simetris di sepanjang belitan stator generator dapat disimulasikan, sekaligus dapat memberikan informasi kinerja dari relai diferensial tersebut. Model dibuat di dalam lingkungan Perangkat Lunak *PSCAD*.

1.2 Rumusan Masalah

- 1.2.1 Bagaimana model *PSCAD* sistem relai diferensial (87G) pada sistem Generator #GE1 PLTG Tello.
- 1.2.2 Bagaimana kinerja relai diferensial pada saat gangguan internal di titik 10, 20 ... 100% dari netral Generator #GE1 PLTG Tello dan gangguan eksternal di Rel 11,5 kV dan 150 kV Tello (*Grid Sulselrabar*).

1.3 Tujuan Penelitian

- 1.3.1 Menghasilkan model *PSCAD* sistem relai diferensial (87G) pada sistem Generator #GE1 PLTG Tello.
- 1.3.2 Mendapatkan kinerja relai diferensial pada saat gangguan internal di titik 10, 20 ... 100% dari netral Generator #GE1 PLTG Tello dan gangguan eksternal di Rel 11,5 kV dan 150 kV Tello (*Grid Sulselrabar*).

1.4 Manfaat Penelitian

- 1.4.1 Dapat menjadi acuan atau sumber informasi bagi pihak terkait dalam hal ini PT. PLN Indonesia *Power* UBP Tello dalam hal kinerja sistem proteksi relai diferensial generator PLTG Tello bilamana terjadi gangguan simetris internal di sepanjang belitan stator generator.
- 1.4.2 Menambahkan pengetahuan bagi penulis dan pembaca tentang penggunaan perangkat lunak *PSCAD*.
- 1.4.3 Menambahkan wawasan bagi penulis dan pembaca mengenai hubungan singkat simetris, relai diferensial pada generator PLTG Tello.

1.5 Batasan Masalah

- 1.5.1 Relai yang disimulasikan hanya Fase-A.
- 1.5.2 Gangguan yang disimulasikan hanya gangguan simetris (Tiga-Fase).
- 1.5.3 Resistans gangguan dibatasi maksimal 1 Ohm.
- 1.5.4 Gangguan eksternal yang ditinjau hanya di Rel 11,5 kV dan 150 kV Tello.
- 1.5.5 Berdasarkan ketersediaan model relai diferensial (*dual bias*) di *Master Library PSCAD*, dalam hal ini sesuai dengan model Areva atau *Schneider* P343, maka dibuat pendekatan berupa *Break2* sama dengan *Break1* pada karakteristik relai.
- 1.5.6 Rasio transformator arus diasumsikan 1/1.

1.6 Sistematika Penulisan

BAB I PENDAHULUAN, menjelaskan latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian dan manfaat penelitian, batasan masalah serta sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA, berisikan tentang teori atau materi yang mendasari dalam pelaksanaan penelitian ini.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN, berisikan tentang waktu dan tempat pelaksanaan penelitian serta metode yang dipakai.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN, dalam bab ini akan dibahas tentang hasil dari penelitian, serta pembahasan terkait judul penelitian.

BAB V PENUTUP, dalam bab ini akan dibahas penjelasan atau kesimpulan dan saran akhir dari hasil penelitian.

DAFTAR PUSTAKA, berisi tentang daftar sumber referensi penulis dalam memilih teori yang relevan dengan judul penelitian.

LAMPIRAN, berisi tentang model hasil simulasi dan dokumentasi serta data penelitian yang dipakai.



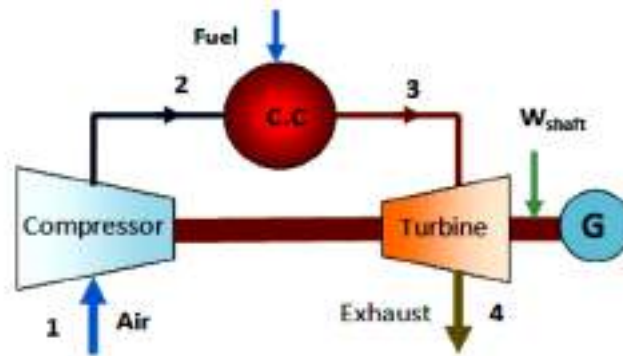
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Gas

PLTG adalah pembangkit listrik yang menggunakan gas untuk menggerakkan turbin dan generator. Turbin dan generator ini terhubung pada satu poros, sehingga ketika turbin berputar, generator juga akan ikut berputar, menghasilkan energi listrik melalui beda potensial pada medan magnetnya. Prinsip kerja PLTG mirip dengan PLTU, tetapi menggunakan gas sebagai pengganti uap. Karena perbedaan sifat antara gas dan uap, ada perbedaan prinsip dalam cara kerja turbin gas dan turbin uap. Salah satu keunggulan PLTG adalah kemampuannya untuk memulai produksi dari kondisi “dingin” dalam waktu yang sangat singkat, sekitar 10 hingga 30 menit, jauh lebih cepat dibandingkan dengan PLTU (Hardi, 2020).

PLTG merupakan salah satu jenis pembangkit listrik yang menggunakan turbin sebagai penggerak utama dan gas sebagai fluida kerjanya. Turbin gas beroperasi dengan mengubah energi kinetik dari gas bertekanan tinggi menjadi energi mekanik yang menggerakkan sudu-sudu di dalam turbin. Turbin gas adalah mesin yang menggunakan gas panas dari bahan bakar yang dibakar dan udara bertekanan tinggi untuk memutar turbin. Turbin dibangun pada poros yang sama dengan generator, dan putaran poros tersebut menghasilkan energi mekanik yang diubah menjadi energi listrik.



Gambar 2.1.1. Diagram Alir PLTG
(Ibrahim, 2019)

Udara dihisap oleh kompresor dan kemudian dikompresi, sehingga volume udara menyusut dan menghasilkan tekanan tertentu. Udara bertekanan ini kemudian masuk ke ruang bakar untuk proses pembakaran, dimana udara bertekanan, bahan bakar, dan panas bergabung untuk menghasilkan gas panas. Gas ini kemudian digunakan sebagai energi mekanik untuk memutar turbin gas.

Kemudian, pada saat proses pembakaran di ruang bakar, terjadi peningkatan suhu dan volume akibat penambahan kalor pada ruang bakar, namun tekanannya tetap konstan selama proses ini berlangsung. Gas panas yang dihasilkan kemudian diekspansikan melalui nozel turbin yang mengarahkan aliran gas ke sudu-sudu turbin gas (Nabilah dkk., 2022).

2.2 Generator

Generator merupakan salah satu komponen penting yang menentukan karakteristik sistem pembangkit tenaga listrik. Perangkat ini terdiri atas dua bagian utama, yaitu rotor sebagai bagian yang berputar dan stator sebagai bagian yang diam. Fungsi utama generator adalah mengubah energi kinetik dari putaran turbin

menjadi energi listrik yang siap disalurkan kepada konsumen. Dalam sistem pembangkit, poros generator terhubung langsung dengan poros turbin, sehingga kecepatan putar generator mengikuti kecepatan putar turbin. Pengaturan kecepatan putar generator dilakukan dengan mengendalikan kecepatan turbin, sedangkan kecepatan turbin diatur melalui pengendalian suplai uap atau gas yang masuk (Suripto, 2018).

2.2.1 Prinsip Kerja Generator

Generator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Fenomena induksi elektromagnetik adalah terciptanya perbedaan tegangan pada suatu kumparan yang terkena perubahan medan magnet. Ketika dua kutub magnet, kutub utara dan kutub selatan saling mendekat, garis-garis gaya magnet dihasilkan di ruang antara-antara dua kutub dengan arah dari kutub utara ke kutub selatan. Ketika sebuah konduktor bergerak dalam ruang antara dua kutub yang tegak lurus terhadap arah medan magnet, konduktor tersebut memotong garis-garis medan magnet dan menciptakan perbedaan tegangan pada konduktor. Fenomena ini disebut induksi elektromagnetik. Selanjutnya, bila kedua ujung penghantar ditutup dan dihubungkan, arus mengalir melalui penghantar dengan arah yang tetap.

2.2.2 Generator Sinkron

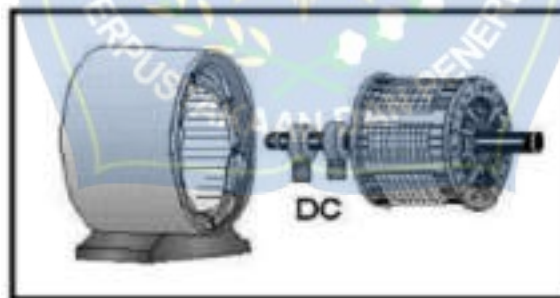
Kapasitas generator di pembangkit umumnya relatif besar sehingga arus yang mengalir pun besar. Akibatnya ukuran konduktor yang dilalui arus induksi mengalir melalui beban juga menjadi sangat besar dan berat. Oleh karena itu, kumparan yang mengalirkan arus induksi ditempatkan pada bagian stator daripada pada rotor yang berputar, dan magnet yang relatif ringan ditempatkan pada rotor. Pada generator

berkapasitas tinggi, medan magnet pada rotor tidak dihasilkan oleh magnet permanen, melainkan oleh elektromagnet, yaitu medan magnet yang dihasilkan oleh arus yang mengalir melalui kumparan. Dengan cara ini, kekuatan medan magnet dapat diatur.

Rotor penghasil medan magnet berbentuk kumparan yang menghantarkan arus searah, dan didalamnya terdapat inti besi. Desain generator jenis ini disebut generator sinkron (serempak).

2.2.3 Prinsip Kerja Generator Sinkron

2.2.3.1 Generator sinkron terdiri dari dua bagian yaitu stator berupa kumparan yang menghasilkan tegangan dan arus induksi, dan rotor berupa kumparan magnet yang menghasilkan medan magnet, seperti yang terlihat pada Gambar 2.2.3.1.1.



Gambar 2.2.3.1.1. Konstruksi Sederhana Generator Sinkron
(Gusti dkk, 2013)

2.2.3.2 Kumparan rotor diberi energi oleh arus *DC*, sehingga menciptakan medan magnet di sekitar kumparan. Kuatnya medan magnet dipengaruhi oleh jumlah lilitan dan kuat arus yang mengalir melaluinya.

- 2.2.3.3 Saat rotor berputar, medan magnet yang tercipta di dalam rotor juga ikut berputar dan mengikuti perputaran rotor.
- 2.2.3.4 Medan magnet dari rotor yang berputar mengenai kumparan stator sehingga menimbulkan tegangan induksi pada kumparan stator.
- 2.2.3.5 Bila kedua ujung kumparan stator dihubungkan dengan suatu beban, maka arus bolak-balik mengalir melalui beban.

Jika kumparan stator hanya terdiri dari sepasang kumparan yang diletakkan saling berhadapan, maka generator menghasilkan tegangan bolak-balik satu-fase, yaitu tegangan berbentuk gelombang poros. Generator sinkron jenis ini disebut generator sinkron satu-fase. Jika kumparan stator terdiri dari tiga set kumparan yang dipasang dengan beda sudut 120 derajat, dan salah satu ujung setiap kumparan disambung membentuk gelombang tegangan bolak-balik pada ujung terminal keluaran generator, masing-masing 120 derajat, yang disebut tegangan bolak-balik tiga-fase. Generator sinkron jenis ini disebut generator sinkron tiga-fase.

Alasan mengapa generator *AC* digunakan pada bagian pembangkit tenaga listrik adalah karena arus bolak-balik mempunyai kelebihan yaitu lebih mudah untuk menambah atau mengurangi jumlah listrik sesuai kebutuhan dibandingkan dengan arus *DC*. Generator sinkron tiga-fase umumnya digunakan pada generator besar.

Generator sinkron tiga-fase memiliki keunggulan kapasitas daya yang lebih tinggi dibandingkan generator sinkron satu-fase dengan ukuran generator yang sama. Sebelum masuk ke kumparan medan rotor, tegangan dan arus diatur oleh

regulator. Pengaturan arus searah yang masuk pada kumparan rotor ini berfungsi untuk mengatur besarnya fluks magnet yang dihasilkan, yang selanjutnya memengaruhi tegangan keluaran generator.

2.2.4 Karakteristik Generator Sinkron

Generator sinkron pada dasarnya mempunyai dua karakteristik yang sangat penting dalam pengoperasiannya, yaitu karakteristik tegangan keluaran dan karakteristik frekuensi. Nilai frekuensi dan tegangan keluaran pembangkit terupayakan agar stabil. Nilai tegangan keluaran generator sinkron adalah yang sebanding dengan jumlah putaran generator dan besarnya fluks magnet yang dihasilkan kumparan rotor. Selain itu, nilainya dipengaruhi oleh konstanta mekanis yang sesuai dengan spesifikasi mesin. Tegangan yang dihasilkan pada kedua terminal luaran generator dirumuskan sebagai berikut:

$$E = C n \Phi \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan :

E : Tegangan *output* generator

n : Putaran rotor (*rpm*)

Φ : Fluks yang dihasilkan kumparan rotor

C : Konstanta mesin

Semakin cepat poros generator berputar, tegangan keluaran akan meningkat, dan sebaliknya. Peningkatan fluks yang dihasilkan oleh kumparan medan juga menyebabkan tegangan *output* pada kumparan stator meningkat, dan sebaliknya. Selain dipengaruhi oleh fluks magnet dan kecepatan putaran, tegangan keluaran generator juga dipengaruhi oleh arus beban. Semakin besar arus beban, tegangan keluaran generator akan menurun karena terjadi penurunan tegangan pada

kumparan stator, dan sebaliknya. Kuat medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan dipengaruhi oleh arus yang mengalir melaluinya. Semakin besar arus yang mengalir, semakin kuat fluks magnet yang dihasilkan. Dalam operasi generator, tegangan harus dijaga agar tetap stabil. Salah satu cara untuk menjaga kestabilan tegangan *output* generator adalah dengan mengatur arus yang masuk ke kumparan medan pada rotor. Pengaturan arus medan ini dilakukan dengan mengubah resistor variabel pada rangkaian kumparan rotor, baik secara manual maupun otomatis.

Sementara itu, frekuensi tegangan *output* generator dipengaruhi oleh kecepatan putaran poros dan jumlah pasangan kutub magnet pada rotor. Frekuensi tegangan *output* generator sinkron dirumuskan sebagai berikut:

$$f = (n \times p) / 120 \dots \dots \dots (2)$$

Keterangan:

f : frekuensi tegangan *output* generator

n : putaran rotor (*rpm*)

p : jumlah pasangan kutub kumparan rotor

Kecepatan putaran generator dipengaruhi oleh putaran turbin. Putaran turbin sendiri bergantung pada suplai uap, gas, atau air yang masuk ke dalamnya. Selain itu, daya beban juga memengaruhi putaran turbin. Semakin besar daya beban, putaran turbin akan semakin lambat dan sebaliknya. Penurunan putaran turbin akan menyebabkan putaran generator melambat, sehingga frekuensi tegangan keluaran generator menurun, dan sebaliknya. Perubahan putaran akan memengaruhi

frekuensi gelombang luaran, maka penyesuaian antara putaran dan arus yang masuk ke kumparan rotor perlu dilakukan agar tegangan dan frekuensi luaran tetap berada dalam batas toleransi yang diinginkan.

2.3 Sistem Proteksi

Sistem proteksi adalah suatu perangkat yang dapat mendeteksi, mengukur kegagalan atau mendeteksi kelainan pada peralatan dan komponen (sensor) sistem tenaga listrik, dan relai proteksi secara langsung dan otomatis membuka *CB*. Tegangan terputus untuk masing-masing perangkat atau bagian sistem. Sistem proteksi tidak mencegah terjadinya kegagalan, sistem hanya dapat melakukan intervensi setelah kegagalan terjadi. Sistem proteksi tenaga listrik yang membentuk pola pengaman tidak hanya terdiri dari relai pengaman tetapi juga peralatan instrumentasi relai pemantau *CT* dan *VT*. Catu daya *DC* adalah sumber daya pengoperasian, dan relai pengaman. Sistem proteksi/pengaman ini terdiri dari beberapa komponen yakni transformator arus, transformator tegangan, relai, catu daya *DC*, dan pemutus daya. Kegagalan salah satu komponen ini akan menyebabkan sistem tidak berfungsi (Rizqi dkk., 2021).

Relai proteksi adalah suatu alat proteksi yang mempunyai kemampuan untuk mendeteksi atau mendeteksi kesalahan pada peralatan yang dilindungi dengan mengukur atau membandingkan besaran yang diterima misalnya, arus, tegangan, daya, sudut fase, frekuensi, impedans. Untuk ukuran yang telah ditentukan, kemudian memutuskan apakah akan membuka pemutus arus atau sekedar memberikan sinyal tanpa membuka pemutus arus, baik segera atau tertunda. *CB*

biasanya dipasang pada generator, transformator daya, saluran transmisi, saluran distribusi, untuk mengisolasi bagian-bagian sistem agar sistem lain dapat terus berfungsi dengan baik.

2.3.1 Fungsi Proteksi

Proteksi memiliki fungsi utama untuk mencegah maupun mengurangi kerusakan peralatan yang diakibatkan oleh gangguan atau kondisi operasi sistem yang tidak normal. Kecepatan respons perangkat proteksi sangat berpengaruh, di mana semakin cepat perangkat bekerja, maka semakin kecil kemungkinan kerusakan yang terjadi. Selain itu, proteksi berperan dalam melokalisir area yang terdampak gangguan agar seminimal mungkin, sehingga kontinuitas penyaluran tenaga listrik dengan tingkat keandalan tinggi dapat tetap terjaga, mutu daya listrik tetap baik, serta memberikan jaminan keselamatan bagi manusia terhadap potensi bahaya yang ditimbulkan oleh listrik.

2.3.2 Daerah Proteksi

Daerah proteksi adalah bagian dari sistem yang dilindungi oleh sistem perlindungan dan biasanya mencakup satu (hingga dua) elemen fasilitas. Sistem tenaga listrik harus dipasang di area keamanan untuk memastikan semua komponen ada dan sistem keamanannya selektif. Setiap area keamanan biasanya terdiri dari satu atau lebih elemen sistem tenaga. Oleh karena itu, semua sistem ini harus ada, tidak ada pilihan selain menerapkan area keamanan ini secara tumpang tindih.

2.3.3 Proteksi Sistem Tenaga Listrik

Proteksi sistem tenaga listrik adalah sistem perlindungan yang diterapkan pada listrik dalam suatu sistem tenaga, seperti generator, transformator, dan jaringan listrik, untuk melindunginya dari kondisi operasi yang tidak normal.

Proteksi transmisi tenaga listrik adalah sistem perlindungan yang dipasang pada peralatan di jaringan transmisi untuk menjamin penyaluran listrik dari pembangkit hingga ke gardu distribusi berlangsung aman sampai ke konsumen. Tujuan utamanya adalah mencegah kerusakan peralatan transmisi saat terjadi gangguan, termasuk saat dilakukan pemeliharaan dengan kondisi sistem tetap beroperasi. Dengan proteksi yang berfungsi optimal, pemeliharaan jaringan transmisi dapat dilakukan secara aman meskipun bertegangan. Apabila terjadi gangguan selama proses perawatan, perangkat pengaman akan bekerja untuk melindungi sistem dan menjaga keselamatan petugas yang melakukan pemeliharaan (Tasiam, 2012).

2.3.4 Persyaratan Kualitas Proteksi

Ada beberapa syarat yang harus diperhatikan dalam suatu perencanaan sistem proteksi yaitu:

2.3.4.1 Selektivitas

Suatu sistem proteksi dapat dinilai dari kemampuannya dalam mengisolasi hanya bagian yang mengalami gangguan, tanpa memengaruhi bagian lain yang tidak terkena dampak.

2.3.4.2 Stabilitas

Sistem proteksi harus tetap tidak aktif apabila gangguan terjadi di luar zona perlindungan yang ditentukan, sehingga tidak memicu pemutusan yang tidak perlu.

2.3.4.3 Kecepatan operasi

Semakin lama arus gangguan mengalir, semakin besar potensi kerusakan pada peralatan. Oleh karena itu, bagian yang terganggu harus segera diputus sebelum generator yang terhubung secara sinkron kehilangan sinkronisasinya dengan sistem lainnya. Waktu pembebasan gangguan dalam sistem tegangan tinggi umumnya 140 ms, namun di masa mendatang diupayakan dipersingkat menjadi 80 ms, yang memerlukan penggunaan relai dengan kecepatan sangat tinggi (*very high-speed relaying*).

2.3.4.4 Sensitivitas

Sensitivitas sistem proteksi ditentukan oleh besarnya arus gangguan yang dapat mengaktifkan alat proteksi. Nilai ini dapat mengaktifkan alat proteksi. Nilai ini dapat diukur berdasarkan arus dalam jaringan aktual (arus primer) atau sebagai presentase dari arus sekunder yang berasal dari transformator arus.

2.3.5 Komponen-komponen Sistem Proteksi

- *Circuit Breaker*
- Relai
- Transformator arus
- Kabel kontrol
- Penyuplai Daya (Baterai)

2.4 Proteksi Generator

Generator memiliki peran yang penting sebagai sumber energi listrik dalam suatu sistem tenaga. Oleh karena itu, *trip CB* generator sangat tidak diinginkan karena dapat mengganggu sistem, terutama generator yang berdaya besar. Selain itu, karena letaknya di hulu, *CB* generator tidak boleh mudah *trip* tetapi juga harus aman bagi generator, walaupun dalam sistem banyak terjadi gangguan (Tasiam, 2012).

Oleh sebab itu, untuk keandalan operasional generator, penting untuk melengkapinya dengan perangkat proteksi yang memadai. Perangkat proteksi ini harus dirancang untuk mencegah kerusakan pada generator, karena kerusakan tersebut dapat mengakibatkan biaya perbaikan yang signifikan dan juga memengaruhi perlindungan terhadap mesin penggerak yang mengoperasikan generator.

2.4.1 Sistem Proteksi Generator

Proteksi untuk gangguan internal generator meliputi relai diferensial, untuk melindungi generator dari kerusakan akibat hubung-singkat (*short circuit*) antar-fase. Stator *Ground fault relay* untuk mendeteksi gangguan pentanahan/grounding pada generator. *Loss of field relay* untuk mendeteksi kehilangan medan penguat yang menyebabkan *over heating* pada kumparan stator dan pada kumparan rotor.

2.4.2 Gangguan Generator

Gangguan pada generator relatif jarang terjadi karena beberapa alasan:

- Instalasi listrik terlindung dari lingkungan, termasuk perlindungan terhadap petir dan gangguan tanaman.

- Adanya transformator blok dengan konfigurasi *Wye-Delta*, yang mencegah arus gangguan urutan nol dari saluran transmisi masuk ke generator.
- Instalasi listrik dari generator ke rel biasanya menggunakan kabel *duct*, sehingga kemungkinan gangguan sangat kecil.
- Sebagian besar (lebih dari 50%) pemutusan *CB* generator disebabkan oleh gangguan pada mesin penggerak generator.

Terdapat beberapa gangguan yang umum terjadi pada generator, seperti gangguan pada stator, rotor (sistem penguat), mesin penggerak dan instalasi pendukung di luar generator untuk melindungi generator dari gangguan luar, generator biasanya terhubung ke rel (*busbar*), yang menyuplai daya melalui saluran yang terhubung ke rel tersebut. Gangguan umumnya terjadi pada saluran yang mengambil daya dari rel, sedangkan instalasi penghubung generator dengan rel jarang mengalami gangguan karena rel dan saluran sudah dilengkapi dengan sistem proteksi sendiri, perlindungan generator dari gangguan luar cukup menggunakan relai arus lebih dengan penundaan waktu yang relatif lama dan dilengkapi dengan *voltage restrain*. *Voltage restrain* adalah:

- Arus hubung-singkat pada generator menurun seiring waktu.
- Penurunan ini disebabkan oleh meningkatnya arus stator yang melemahkan medan magnet kutub rotor, sehingga tegangan dan gaya gerak listrik (ggl) generator turun.
- Memastikan relai bekerja dengan baik meskipun arus hubung-singkat menurun, diperlukan *Voltage Restrain Coil*.

- Karena karakteristik hubung-singkat pada generator, pada generator besar juga digunakan relai impedans.

2.4.3 Pengaman Terhadap Gangguan pada Generator

2.4.3.1 Hubung-singkat antar-fase

Relai diferensial digunakan sebagai pengaman terhadap gangguan ini, yang mana ketika relai ini aktif, selain memutus *CB* generator, *CB* medan penguat generator juga harus diputus. Selain itu, melalui relai bantu, mesin penggerak harus dihentikan.

2.4.3.2 Hubung-singkat fase ke tanah

Menggunakan relai hubung tanah terbatas. Relai ini memerintahkan *CB* Generator untuk *trip*, *CB* Medan Penguat dan menghentikan mesin penggerak melalui relai bantu, relai tegangan untuk mengukur pergeseran tegangan titik netral terhadap tanah. Relai Arus untuk mengukur arus titik netral ke tanah melalui tahanan atau kumparan.

2.4.3.3 Suhu berlebih

Suhu tinggi dapat terjadi pada bantalan generator atau kumparan stator, yang masing-masing dideteksi oleh relai suhu. Pada awalnya, relai akan mengaktifkan alarm, kemudian memutuskan tenaga jika relai suhu bantalan yang aktif.

2.5 Relai Diferensial

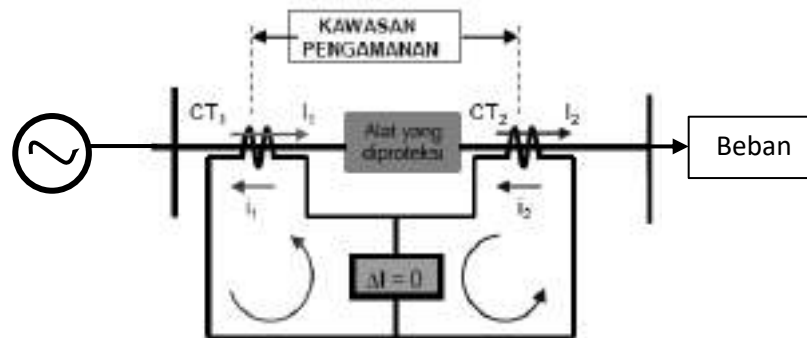
Relai diferensial adalah relai yang bekerja berdasarkan prinsip hukum *Kirchoff*, yaitu arus yang masuk ke suatu titik sama dengan arus yang keluar dari titik tersebut. Titik yang dimaksud dalam proteksi diferensial adalah area perlindungan yang dibatasi oleh dua transformator arus. Proteksi diferensial ini

merupakan salah satu pelindung utama pada transformator daya. Relai ini sangat selektif sehingga biasanya tidak memerlukan koordinasi dengan relai proteksi lainnya, dan memiliki respons yang sangat cepat tanpa memerlukan waktu tunda (Setijasa, 2013).

2.5.1 Prinsip Dasar Relai Diferensial

Prinsip kerja relai proteksi diferensial adalah dengan membandingkan dua atau lebih vektor arus yang masuk ke relai. Jika arus I_1 mengalir di sisi primer transformator arus (CT_1), maka arus I_2 akan mengalir di sisi primer transformator arus (CT_2). Pada saat yang sama, arus I_1 dan I_2 akan mengalir di sisi sekunder kedua transformator arus, tergantung pada rasio yang terpasang. Jika I_1 sama dengan I_2 , relai tidak akan beroperasi karena tidak ada perbedaan arus ($\Delta i = 0$). Namun, jika I_1 tidak sama dengan I_2 , relai akan beroperasi karena terdapat selisih arus ($\Delta \neq 0$), yang disebut arus diferensial. Arus inilah yang menjadi dasar operasi relai diferensial.

Dalam kondisi normal (tanpa gangguan), arus yang mengalir ke relai pengaman adalah nol, dan arus hanya bersirkulasi dalam rangkaian sekunder kedua transformator arus. Area perlindungan relai diferensial dibatasi oleh dua transformator arus (CT).



Gambar 2.5.1.1. Relai Diferensial Keadaan Normal
(Setijasa, 2013)

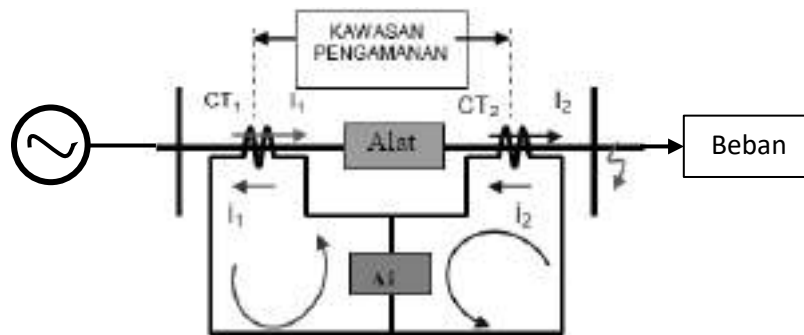
Agar relai diferensial tidak beroperasi dalam kondisi normal (tanpa gangguan), beberapa persyaratan harus dipenuhi:

- CT_1 dan CT_2 (termasuk transformator arus bantu atau ACT) harus memiliki rasio yang sedemikian rupa sehingga arus I_1 sama dengan I_2
- Sambungan dan polaritas CT_1 , CT_2 , serta ACT harus sama

2.5.2 Cara Kerja Proteksi Relai Diferensial saat Terjadi Gangguan

2.5.2.1 Jika terjadi gangguan di dalam area perlindungan (gangguan internal)

Apabila relai diferensial digunakan untuk melindungi suatu peralatan dan terjadi gangguan di dalam area perlindungannya (gangguan internal), maka relai diferensial harus beroperasi (*pickup*). Saat arus I_1 mengalir di CT_1 , tidak ada arus yang mengalir di CT_2 ($I_2 = 0$). Hal ini terjadi karena arus gangguan mengalir menuju titik gangguan, sehingga di CT_2 tidak ada arus. Akibatnya, di sisi sekunder CT_2 juga tidak ada arus ($I_2 = 0$), yang menyebabkan perbedaan arus antara I_1 dan I_2 ($I_1 \neq I_2$, $\Delta I \neq 0$). Perbedaan inilah yang memicu relai diferensial untuk beroperasi.



Gambar 2.5.2.2.1 Relai Diferensial Dalam Kondisi Gangguan Eksternal
(Setijasa, 2013)

2.5.3 Relai Diferensial (*Dual Slope*)

Proteksi diferensial dengan metode *biased* memerlukan pengaturan beberapa parameter, yaitu arus *pickup* awal (I_{S1}), tingkat bias (I_{S2}), serta kemiringan pertama dan kedua (K_1 dan K_2). Nilai I_{S1} biasanya disetel sebesar 5% dari arus nominal generator, sedangkan I_{S2} dan K_2 masing-masing diatur sebesar 120% dan 150%. Pengaturan nilai K_1 bertujuan untuk menjaga sensitivitas sistem terhadap gangguan internal pada arus rendah (Alstom 2011).



Gambar 2.5.3.1. Karakteristik Relai Diferensial
(PSCAD, V4.2)

Karakteristik pengekanan bias presentase dengan dua kemiringan (*dual-slope percentage biased restraint*) dirumuskan menjadi dua kondisi sebagai berikut:

Kondisi 1

$$|I_{diff}| > K_1 \cdot |I_{bias}| + IS_1 \dots\dots\dots(3)$$

Kondisi 2

$$|I_{diff}| > K_2 \cdot |I_{bias}| - (K_2 - K_1) \cdot IS_2 + IS_1 \dots\dots\dots(4)$$

Keterangan :

IS₁ : Pengaturan arus diferensial dasar

K₁ : Pengaturan bias presentase kemiringan pertama

IS₂ : Ambang batas arus bias

K₂ : Pengaturan bias presentase kemiringan kedua

Menurut (Le & Vu, 2019), dalam sistem proteksi diferensial generator, prinsip utama yang digunakan adalah membandingkan arus masuk dan arus keluar dari zona proteksi. Oleh karena itu, digunakan dua parameter utama, yaitu arus diferensial dan arus bias, yang masing-masing dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$I_{dif} = I_1 + I_2 \dots\dots\dots(5)$$

$$I_{bias} = \frac{|I_1| + |I_2|}{2} \dots\dots\dots(6)$$

Keterangan :

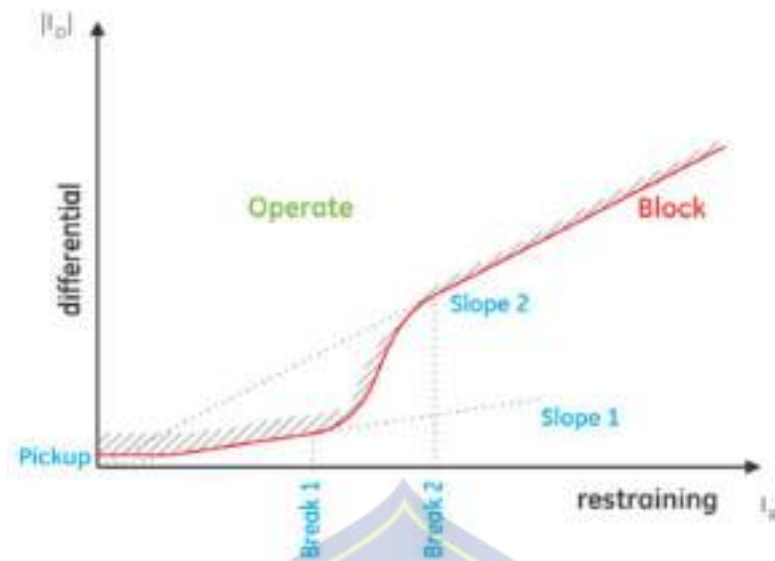
I_{dif} : Selisih total arus yang masuk dan keluar

I_{bias} : Rata-rata dari besar arus pada kedua sisi

I_1 : Arus yang masuk di sisi pertama

I_2 : Arus yang keluar di sisi kedua

Adapun proteksi diferensial stator adalah sistem proteksi utama yang digunakan untuk mendeteksi gangguan internal pada belitan stator generator. Salah satunya adalah relai GE G60, proteksi ini memiliki beberapa parameter pengaturan, seperti nilai *pickup* sebesar 0,100 pu yang menentukan batas awal sensitivitas deteksi. *Dual Slope*, yaitu *Slope1* (10%) dan *Slope2* (80%), digunakan untuk membedakan antara gangguan internal dan kondisi normal yang tidak berbahaya, seperti arus *inrush*. Titik transisi antar *slope* ditentukan oleh nilai *break point*, yaitu *Break1* sebesar 1,15 pu dan *Break2* sebesar 8,00 pu (Solutions, 2017). Setelan karakteristik relai G60 ditunjukkan pada Gambar 2.5.3.2. Dengan konfigurasi tersebut, sistem proteksi ini mampu bekerja cepat, selektif, dan andal dalam menjaga keselamatan serta keandalan operasi generator.



Gambar 2.5.3.2. Karakteristik Relai GE G60
(Solutions, 2017)

2.6 Gangguan Hubung-Singkat

Gangguan dalam sistem tenaga listrik adalah suatu ketidaknormalan yang menyebabkan aliran arus menjadi tidak seimbang dalam sistem tiga-fase. Gangguan ini juga dapat diartikan sebagai segala bentuk kerusakan yang mengganggu aliran normal arus menuju beban (Adrial, 2008).

2.6.1 Klasifikasi Gangguan pada Sistem Tiga-Fase

Gangguan hubung-singkat pada tiga-fase terdiri atas 4 jenis:

2.6.1.1 Gangguan tiga-fase, gangguan ini biasa juga disebut gangguan simetris yang mana merupakan fenomena hubung-singkat yang melibatkan ketiga-fase secara sekaligus.

2.6.1.2 Gangguan antar-fase, gangguan hubung-singkat yang melibatkan kedua-fase.

2.6.1.3 Gangguan dua-fase ke tanah, gangguan yang menghubungkan dua-fase ke tanah.

2.6.1.4 Gangguan satu-fase ke tanah, gangguan yang menghubungkan satu-fase ke tanah.

Tiga gangguan yang disebutkan terakhir termasuk gangguan asimetris atau gangguan tidak seimbang.

2.6.2 Gangguan Tiga-Fase

Gangguan hubung-singkat tiga-fase termasuk dalam kategori gangguan simetris, yang mana arus dan tegangan di setiap fase tetap seimbang setelah gangguan terjadi. Oleh karena itu, analisis untuk sistem seperti ini dapat dilakukan hanya dengan menggunakan komponen urutan positif dengan rumus sebagai berikut:

$$I_A = I_{A1} \dots\dots\dots (7)$$

dan

$$I_A = \frac{V_f}{Z_1} \dots\dots\dots (8)$$

Keterangan :

V_f = Tegangan di titik gangguan sebelum terjadinya gangguan

Z_1 = Impedans urutan positif dilihat dari titik gangguan

I_A = Arus pada fase A

I_{A1} = Arus urutan positif dari fase A

Gangguan yang memengaruhi semua fase sehingga arus dan tegangan tetap seimbang setelah gangguan, terdiri dari:

- Gangguan hubung-singkat tiga-fase
- Gangguan hubung-singkat tiga-fase ke tanah

2.6.3 Berdasarkan Durasi Terjadinya Gangguan

2.6.3.1 Gangguan transien

Gangguan transien adalah gangguan yang akan hilang dengan sendirinya ketika pemutus tenaga membuka saluran transmisi untuk waktu singkat, kemudian dapat disambungkan kembali.

2.6.3.2 Gangguan permanen

Gangguan permanen adalah gangguan yang tetap ada meskipun pemutus tenaga membuka saluran transmisi untuk waktu singkat dan tidak hilang saat disambungkan kembali.

Selain klasifikasi di atas, terbukanya pemutus tenaga selalu disebabkan oleh gangguan dalam sistem, melainkan bisa juga disebabkan oleh kerusakan pada relai, kabel kontrol, atau pengaruh eksternal seperti induksi atau interferensi. Gangguan ini dikenal sebagai gangguan non sistem.

Gangguan dalam sistem tenaga listrik adalah kondisi abnormal yang mengganggu aliran normal arus listrik dalam jaringan. Gangguan ini dapat menyebabkan ketidakseimbangan tegangan, arus berlebih, atau bahkan kerusakan pada peralatan listrik. Gangguan yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik umumnya bersifat asimetris, sehingga diperlukan metode komponen simetris untuk menganalisis tegangan dan arus saat gangguan berlangsung. Analisis gangguan

dilakukan dengan menghubungkan-singkat semua sumber tegangan di sistem dan mengganti titik gangguan dengan sumber tegangan yang nilainya sama seperti gangguan terjadi. Metode ini memungkinkan sistem tiga-fase yang tak seimbang untuk dipresentasikan dengan teori komponen simetris, yang didasarkan pada komponen urutan positif, negatif, dan nol.

2.7 MVA Hubung-Singkat

Metode *MVA* hubung-singkat dilakukan dengan menghitung nilai MVA_{SC} untuk setiap elemen atau komponen dalam sistem tenaga listrik yang disusun dalam diagram satu garis (Faharuddin, 2002). Perhitungan ini dilakukan dengan menggunakan rumus-rumus tertentu yang telah ditetapkan, sebagai berikut:

- Jika yang diketahui adalah nilai reaktans komponen dalam persen (%) :

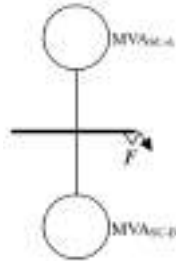
$$MVA_{SC} = \frac{MVA_{rated}}{\%X_{equip}} \dots\dots\dots (9)$$

- Jika yang diketahui adalah nilai reaktans komponen dalam Ohm (Ω) :

$$MVA_{SC} = \frac{(kV_{LL})^2}{X_{act}} \dots\dots\dots (10)$$

Setelah nilai MVA_{SC} diperoleh dari masing-masing komponen, seluruh nilai tersebut disatukan sehingga menghasilkan nilai MVA_{SC} total yang menggambarkan keseluruhan sistem

- Menjumlahkan nilai MVA_{SC} yang terhubung paralel untuk mendapatkan nilai ekuivalen



(a) MVA_{SC-A} paralel dengan MVA_{SC-B}

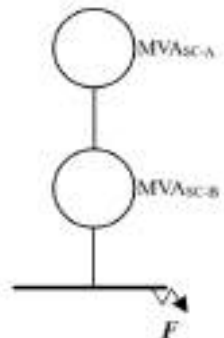


(b) $MVA_{ekivalen}$ dari (a)

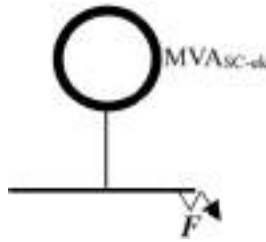
Gambar 2.7.1. Ekuivalensi antara Dua Nilai MVA , yang Paralel untuk Gangguan di F

$$MVA_{SC-ek} = MVA_{SC-A} + MVA_{SC-B} \dots\dots\dots (11)$$

- Nilai MVA_{SC} terhubung seri



(a) MVA_{SC-A} seri dengan MVA_{SC-B}



(b) MVA_{SC} ekivalensi dari (a)

Gambar 2.7.2. Ekivalensi antara Dua Nilai MVA , yang Seri untuk Gangguan di F

$$MVA_{SC-ek} = \frac{MVA_{SC-A} \times MVA_{SC-B}}{MVA_{SC-A} + MVA_{SC-B}} \dots\dots\dots(12)$$

Dalam analisis sistem tenaga listrik, penggunaan satuan per unit merupakan praktik yang lazim dilakukan untuk mengevaluasi dan menyampaikan nilai-nilai seperti tegangan, arus, daya, serta impedans (PSE, 2015). Nilai-nilai per unit ini dihitung berdasarkan suatu nilai dasar tertentu, sebagaimana dijelaskan dalam persamaan berikut:

$$kuantitas \text{ per unit} = \frac{kuantitas \text{ aktual}}{kuantitas \text{ dasar}} \dots\dots\dots(13)$$

$$persentase \text{ kuantitas} = kuantitas \text{ per unit} \times 100 \dots\dots\dots(14)$$

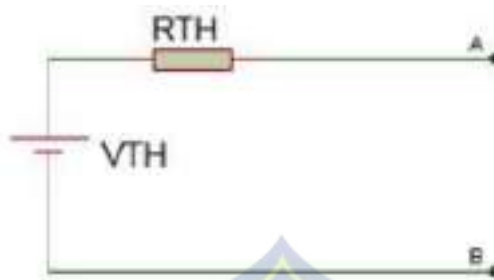
Untuk mengubah nilai per unit maka dikonversi ke tegangan aktual seperti persamaan berikut:

$$kuantitas \text{ per unit} \times kuantitas \text{ dasar} = kuantitas \text{ aktual} \dots\dots\dots(15)$$

2.8 Teorema Thevenin

Teorema Thevenin merupakan salah satu prinsip dasar dalam analisis rangkaian listrik yang menyatakan bahwa suatu rangkaian listrik yang kompleks dapat disederhanakan menjadi sebuah rangkaian ekivalen yang terdiri dari sebuah sumber tegangan (V_{Th}) dan sebuah impedans (R_{Th}) yang dihubungkan secara seri

(Verson, 2018). Penyederhanaan ini bertujuan untuk mempermudah proses analisis dan pengukuran pada rangkaian-rangkaian listrik yang memiliki konfigurasi komponen yang rumit.



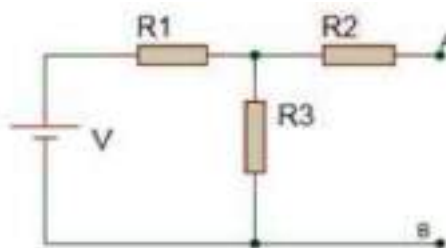
Gambar 2.8.1. Rangkaian Thevenin
(Verson, 2018)

Nilai tegangan Thevenin (V_{Th}) dan hambatan Thevenin (R_{Th}) yang dapat ditentukan melalui perhitungan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$V_{Th} = \frac{R_3}{R_1 + 3} \times V \dots\dots\dots (16)$$

$$R_{Th} = R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} \dots\dots\dots (17)$$

Dimana R_1 , R_2 , R_3 dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.8.2. Rangkaian Terhubung Seri Paralel
(Verson, 2018)

Keterangan :

R_i : Tegangan pada hambatan i

V_{Th} : Tegangan Thevenin

R_{Th} : Hambatan Thevenin

Untuk membuat model sumber thevenin dengan menggunakan data arus hubung-singkat tiga-fase serta tegangan hubung-buka dapat dihitung dengan menggunakan persamaan seperti berikut:

$$MVA_{SC} = \sqrt{3} \times (\text{nominal kV}) \times I_{SC} \dots\dots\dots (18)$$

Setelah nilai MVA_{SC} diperoleh, maka nilai tersebut digunakan untuk menghitung nilai induktans menggunakan rumus berikut:

- Untuk menghitung nilai impedans dasar

$$Z = \frac{(V_{base})^2}{S_{Th}} \dots\dots\dots (19)$$

- Setelah diperoleh nilai impedans, selanjutnya menentukan nilai reaktans induktif

$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L \dots\dots\dots (20)$$

- Berdasarkan nilai reaktans X_L yang telah diketahui, selanjutnya nilai induktans L dapat ditentukan

$$L = \frac{X_L}{2\pi \cdot f} \dots\dots\dots (21)$$

2.9 Perangkat Lunak *PSCAD*

PSCAD merupakan salah satu perangkat lunak simulasi yang sangat krusial dan banyak digunakan dalam analisis sistem tenaga listrik. Perangkat lunak ini menyediakan pustaka model yang mencakup berbagai elemen untuk analisis sistem tenaga dan elektronika daya. Selain itu, tersedia pustaka relai yang mencakup sejumlah model dan komponen relai dasar. *PSCAD* juga memungkinkan pengguna untuk merancang model dan komponen khusus yang belum tersedia dalam pustaka bawaan (Liu, 2004).

Sebagai perangkat simulasi yang telah menjadi standar di industri, *PSCAD* sangat andal dalam memodelkan dan menganalisis fenomena transien pada jaringan tenaga listrik. Antarmuka grafis yang disediakan memungkinkan seluruh proses simulasi mulai dari perancangan sirkuit, pengaturan waktu simulasi, analisis hasil, hingga penyusunan laporan dilakukan dalam satu lingkungan kerja yang terpadu. Dengan dukungan pustaka model yang luas, *PSCAD* mampu memodelkan sebagian besar komponen dan sistem kontrol pembangkit listrik, termasuk sistem *FACTS*, sistem tenaga khusus, dan transmisi *HVDC*, secara efisien dan akurat. Oleh karena itu, perangkat lunak ini menjadi sumber daya yang sangat bermanfaat dalam mengevaluasi dampak penerapan teknologi energi baru terhadap sistem jaringan tenaga listrik.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini termasuk dalam jenis penelitian deskriptif dengan pendekatan model dan simulasi berbasis Perangkat Lunak *PSCAD*. Pendekatan ini digunakan untuk mengetahui tentang kinerja relai diferensial-fase Generator #GE1 PLTG Tello ketika terjadi gangguan hubung-singkat simetris di sepanjang belitan stator.

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di lantai 3, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Makassar dengan melakukan pelatihan program perangkat lunak *PSCAD* dan PLN untuk pelengkapan data reaktans generator dan tipe relai diferensial serta setelan yang berlaku. Waktu penelitian pada prinsipnya terbagi dua yaitu pra registrasi (non formal) dan preregistrasi (formal). Waktu informalnya Agustus 2024 sampai Juni 2025. Sementara secara formal dilakukan dari Juli sampai Agustus 2025.

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

- Laptop *Hawlett-Packard Company (HP)*

Spesifikasi :

Prosesor : *AMD Athlon Gold 3150U, Radeon Graphics 2.40 GHz*

RAM : 4 GB

Jenis sistem : Sistem operasi 64-bit, prosesor berbasis x64

- Perangkat Lunak *PSCAD student version 4.2*.
- *Microsoft Word 2019, Microsoft Excel 2019, dan Powerpoint 2019*.

3.2.2 Bahan

Adapun bahan materi yang digunakan pada penelitian ini adalah paper dan buku-buku yang terlampir pada daftar pustaka.

3.3 Langkah Penelitian

3.3.1 Studi Pustaka

Tahap ini dilakukan untuk memperoleh pemahaman teoritis yang mendalam mengenai sistem proteksi, khususnya relai diferensial-fase pada generator sinkron, serta karakteristik gangguan hubung-singkat simetris. Selain itu, juga dipelajari prinsip kerja perangkat lunak simulasi *PSCAD* sebagai alat bantu dalam pemodelan sistem daya. Studi pustaka mencakup buku teks, jurnal ilmiah, standar *IEEE*, dan laporan penelitian terdahulu.

3.3.2 Pelatihan Dasar *PSCAD*

Kegiatan pelatihan ini mencakup cara membuat model sistem daya, menyusun konfigurasi relai, mengatur parameter simulasi, serta membaca hasil keluaran berupa grafik domain waktu dan data numeris. Kemampuan ini penting agar model yang dibuat sesuai dengan kondisi sistem nyata.

3.3.3 Penentuan Judul/Topik Penelitian

Setelah memiliki pemahaman teoritis dan keterampilan teknis dasar, langkah selanjutnya adalah menentukan topik dan judul penelitian. Pemilihan judul dilakukan dengan mempertimbangkan urgensi permasalahan di lapangan, ketersediaan data, serta relevansi dengan perkembangan teknologi proteksi sistem tenaga. Judul yang diambil berfokus pada analisis kinerja relai diferensial-fase terhadap gangguan internal pada generator PLTG Tello.

3.3.4 Perumusan Masalah

Masalah utama dalam penelitian ini perlu dirumuskan secara sistematis untuk menjadi dasar penyusunan tujuan dan arah pembahasan. Rumusan masalah difokuskan pada bagaimana relai diferensial-fase merespons gangguan hubung-singkat simetris yang terjadi pada berbagai titik di sepanjang belitan stator, serta seberapa efektif relai dalam membedakan antara gangguan internal dan eksternal.

3.3.5 Penetapan Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian dirumuskan berdasarkan rumusan masalah yang telah dibuat. Dalam konteks penelitian ini, tujuannya adalah untuk mengetahui dan menganalisis kinerja relai diferensial-fase generator dalam mendeteksi dan merespons gangguan hubung-singkat simetris, serta mengevaluasi titik kerja relai terhadap lokasi gangguan menggunakan simulasi berbasis perangkat lunak *PSCAD*.

3.3.6 Pembuatan Skema/Konfigurasi

Setelah tahapan persiapan dan pengumpulan data selesai dilakukan, langkah selanjutnya dalam penelitian ini adalah membangun skema konfigurasi sistem sebagai dasar untuk simulasi seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.5.1 dan Gambar 4.5.2 Pembuatan skema dibagi menjadi dua bagian sistem utama, yaitu sistem daya dan sistem relai diferensial.

3.3.7 Tahap Realisasi Program

Setelah skema/konfigurasi sistem daya dan sistem proteksi selesai dibuat, tahap berikutnya adalah realisasi program dalam lingkungan kerja *PSCAD*. Pada tahap ini, seluruh blok sistem yang telah dirancang diimplementasikan secara utuh

dan terintegrasi. Komponen seperti generator, transformator, sistem relai, serta titik-titik gangguan dimasukkan dan dihubungkan sesuai logika sistem.

Realisasi program ini mencakup pengujian awal terhadap konektivitas antar blok, pengecekan rasio *CT*, kestabilan sistem saat kondisi normal, serta sinkronisasi waktu antar pengukuran. Tujuannya adalah memastikan model sudah siap digunakan untuk tahap simulasi tanpa kesalahan rangkaian atau perhitungan.

3.3.8 Tahap Pelengkapan Data

Tahap ini yaitu melengkapi seluruh data teknis yang dibutuhkan dalam simulasi. Data diperoleh dari PLTG Tello serta referensi dari pustaka. Data ini digunakan untuk mengisi *input* pada tiap blok sistem dalam *PSCAD* secara akurat, agar hasil simulasi mendekati kondisi nyata.

3.3.9 Tahap Input Data ke dalam Program

Setelah data terkumpul, seluruh parameter teknis dimasukkan ke dalam model *PSCAD*. Proses ini mencakup pengisian nilai impedans generator, konfigurasi logika kerja relai, dan pemilihan titik gangguan yang akan disimulasikan. Setiap *input* diperiksa kembali untuk memastikan kesesuaian satuan (misalnya per unit, ampere, ohm) serta keterkaitan antar parameter. Tahap ini menjadi penting karena kesalahan *input* akan berpengaruh langsung terhadap validitas hasil simulasi.

3.3.10 Tahap Simulasi

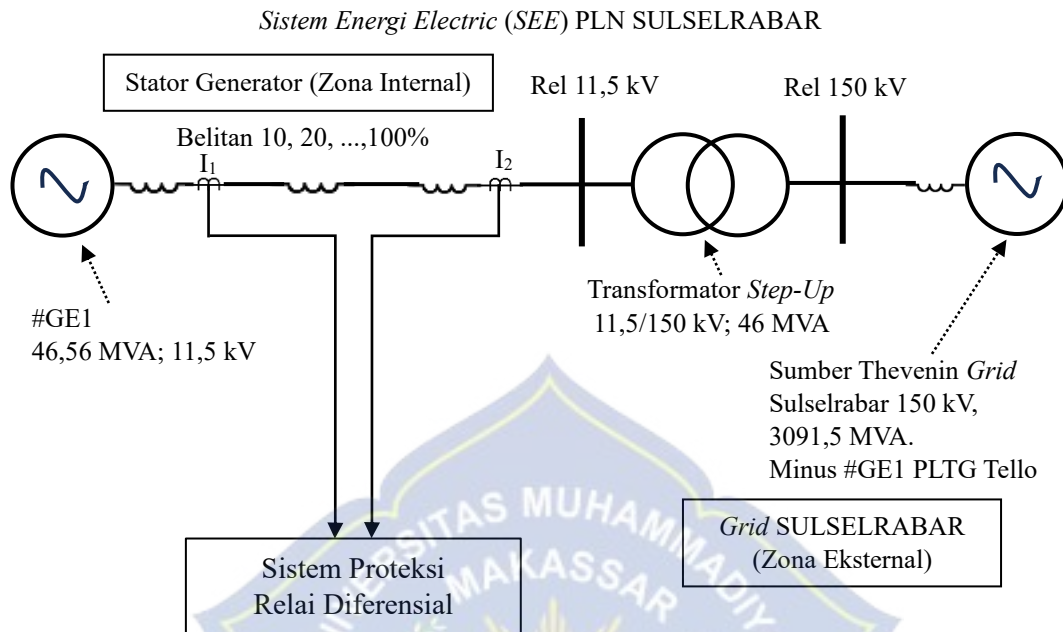
Tahap simulasi merupakan inti dari penelitian ini. Simulasi dilakukan untuk menganalisis bagaimana sistem proteksi diferensial merespons gangguan hubung-singkat simetris yang terjadi di sepanjang belitan stator generator dan saat terjadi gangguan di Rel 11,5 kV dan 150 kV GI Tello. Hasil simulasi kemudian digunakan

untuk mengevaluasi kinerja relai berdasarkan besarnya arus diferensial, arus bias, respons relai, apakah respons relai *pickup* atau *reset*. Simulasi dilakukan secara berulang dengan variasi lokasi gangguan untuk memperoleh kesimpulan yang komprehensif.

3.4 Variabel Penelitian

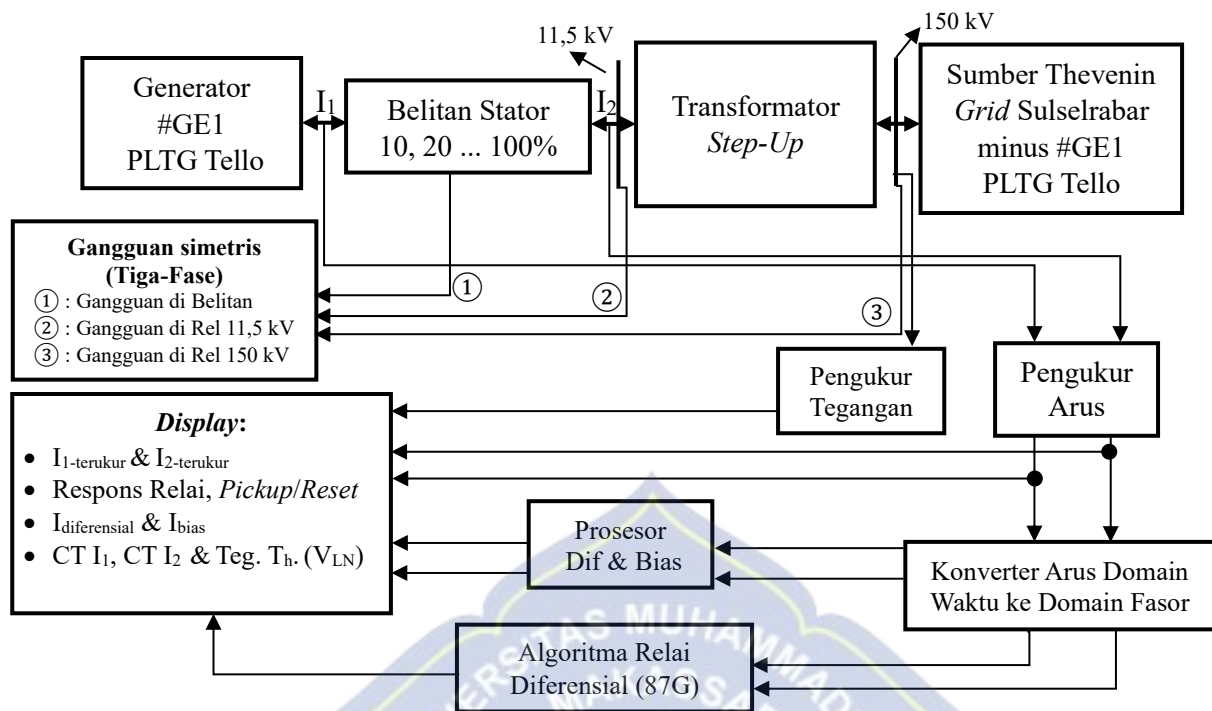
Variabel yang menjadi fokus penelitian ini antara lain arus dari CT_1 , CT_2 , $I_{\text{diferensial}}$, I_{bias} , hingga status operasi relai. Arus CT_1 adalah arus dari ujung 1 dari belitan stator dan arus CT_2 adalah arus dari ujung yang lain dari belitan stator. Sementara itu $I_{\text{diferensial}}$ adalah arus yang akan menghasilkan torsi operasi untuk relai diferensial. Sebaliknya, I_{bias} itu adalah arus yang akan menghasilkan torsi lawan untuk relai diferensial. Torsi operasi akan mempunyai kecenderungan untuk menghasilkan operasi *pickup* pada relai. Sementara itu, torsi lawan akan menyebabkan operasi *reset* pada relai. Hasil pengolahan relai terhadap status fenomena sistem akan menghasilkan status operasi *pickup* jika gangguan merupakan gangguan internal. Sebaliknya, akan menghasilkan status operasi *reset* jika gangguan merupakan gangguan eksternal.

3.5 Skema Penelitian



Gambar 3.5.1. Diagram Segaris Skema Penelitian
(Sumber: Penulis)

Gambar 3.5.1 memperlihatkan diagram segaris skema penelitian pada sistem daya PLTG Tello. Generator #GE1 dengan kapasitas 46,56 MVA dan tegangan 11,5 kV terhubung ke sistem melalui belitan stator. Sistem proteksi menggunakan relai diferensial untuk mendeteksi gangguan pada zona internal. Sementara itu, sisi eksternal dihubungkan ke sistem *Grid* Sulselrabar melalui transformator *Step-Up* 11,5/150 kV; 46 MVA, dengan sumber Thevenin yang telah dikurangi kontribusi dari #GE1 PLTG Tello.

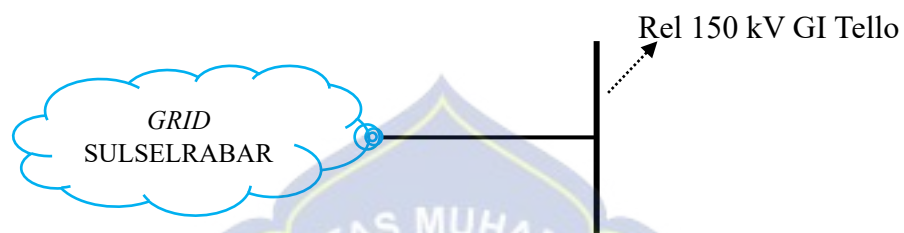


Gambar 3.5.2. Diagram Balok Skema Penelitian
(Sumber: Penulis)

Gambar 3.5.2 menjelaskan diagram balok skema penelitian yang menggambarkan alur data dan komponen yang terlibat dalam analisis kinerja relai diferensial (87G) terhadap gangguan simetris Tiga-Fase. Arus dari kedua sisi belitan stator I_1 dan I_2 diukur menggunakan amperemeter dengan CT 1/1, kemudian data arus diubah dari domain waktu ke fasor, setelah itu dikirim ke prosesor diferensial dan bias untuk dilakukan proses perhitungan dan analisis. Nilai arus bias dan diferensial diteruskan ke algoritma relai diferensial, yang selanjutnya memutuskan apakah kondisi sistem termasuk gangguan internal atau eksternal. Selain itu, tegangan Thevenin (V_{Th}) di Rel 150 kV diukur menggunakan voltmeter. Hasil akhir ditampilkan di dalam *display* yang juga menunjukkan status relai, *pickup* atau *reset*, serta parameter pendukung lainnya seperti tegangan dan arus pengukuran.

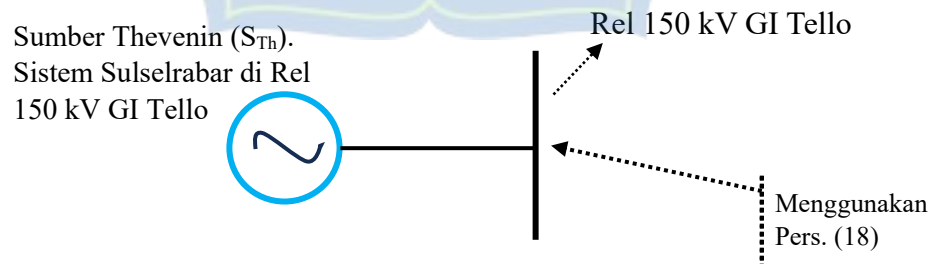
3.6 Prosedur Menentukan Sumber Thevenin (STh)

Sistem Selselrabar adalah sistem jaringan listrik yang saling terinterkoneksi dan mewakili seluruh sistem, mulai dari pembangkit, transmisi, dan distribusi jika ditinjau di Rel 150 GI Tello, yang merepresentasikan menjadi Sumber Thevenin,



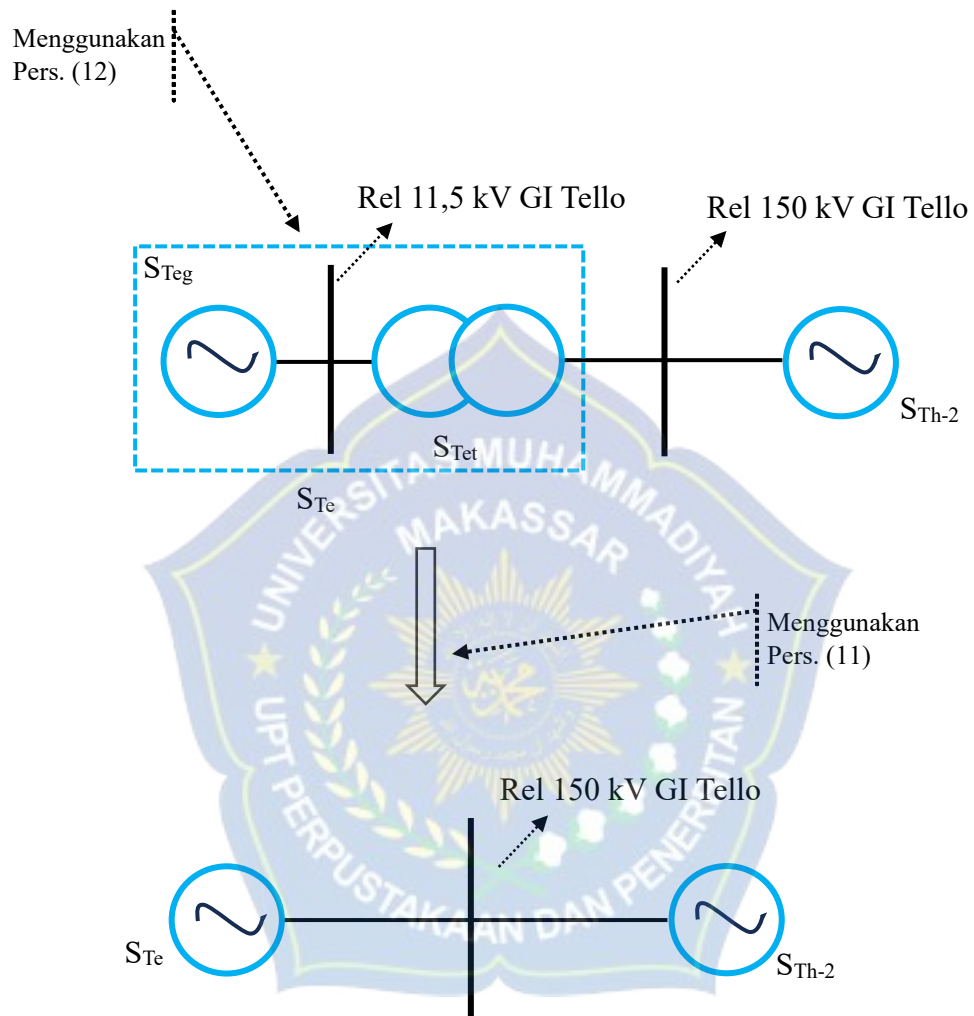
Gambar 3.6.1. Diagram Model *Grid* Selselrabar di Rel 150 kV GI Tello
(Sumber: Penulis)

Selanjutnya, untuk memodelkan sistem proteksi diferensial, maka perlu dilakukan pemodelan Sumber Thevenin di Rel 150 GI Tello,



Gambar 3.6.2 Diagram Model Ekuivalen *Grid* Selselrabar di Rel 150 kV GI Tello
(Sumber: Penulis)

Kemudian, dilakukan ekstraksi dengan mengeluarkan sistem #GE1 Tello dari ekivalen *Grid* Sulselrabar di Rel 150 kV GI Tello.



Gambar 3.6.3 Diagram Model Proses Ekstraksi #GE1 dengan Ekivalen *Grid* Sulselrabar di Rel 150 kV Tello
(Sumber: Penulis)

Diagram segaris sistem Sulselrabar ditampilkan pada bagian lampiran, yakni Lampiran B.4.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Sistem

Unit PLTG Tello terdiri atas dua unit GE yaitu #GE1 dan #GE2 dengan spesifikasi yang sama. Adapun data *nameplate* dari generator tersebut ditampilkan di dalam Tabel 4.1.1. Kedua generator tersebut memiliki daya sebesar 46,56 MVA dan tegangan 11,5 kV.

Tabel 4.1.1. Data Generator PLTG Tello (PLN, 2025)

Data Teknis	#GE1 (MS 6001 B)	#GE2 (MS 6001 B)
No. Seri	Gek-103741	Gek-103741
Tipe	6A3	6A3
Daya Semu	45,4/46,56 MVA	45,4/46,56 MVA
Tegangan	11,5 kV	11,5 kV
Arus	2279/2337 A	2279/2337 A
Hubungan	Wye	Wye
Impedans	0,143 pu	0,143 pu
Faktor Daya	0,8	0,8
Putaran	3000 <i>rpm</i>	3000 <i>rpm</i>
Frekuensi	50 Hz	50 Hz
Fase	3 Fase	3 Fase

Selain itu, unit PLTG Tello juga memiliki dua unit transformator *Step-Up* 11,5/150 kV dengan masing-masing memiliki kapasitas 46 MVA. Adapun data *nameplate* dari transformator *Step-Up* tersebut ditampilkan di Tabel 4.1.2.

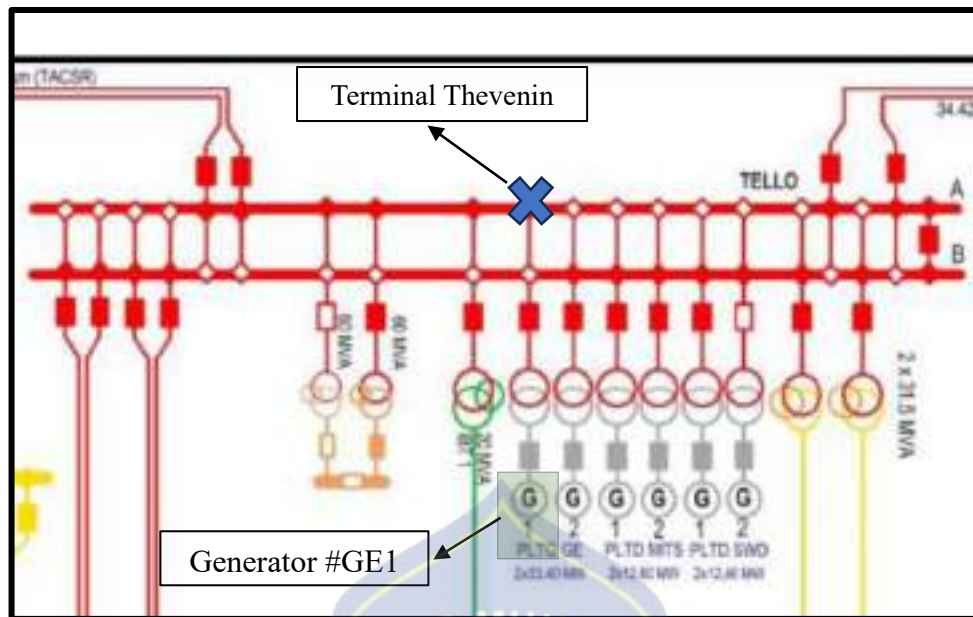
Tabel 4.1.2. Data Transformator *Step-Up* PLTG Tello (PLN, 2025)

Data Teknis	Transformator <i>Takaoka Electric</i>	Transformator <i>Takaoka Electric</i>
Standard	<i>IEC 76 (1993)</i>	<i>IEC 76 (1993)</i>
<i>Type Of Cooling</i>	<i>ONAN/ONAF</i>	<i>ONAN/ONAF</i>
MVA Rating	38/46 MVA	38/46 MVA
Hubungan	Delta-Wye	Delta-Wye
Tegangan	11,5/150 kV	11,5/150 kV
Arus	2309/177 A	2309/177 A
Faktor Daya	0,8	0,8
Impedans	12 %	12 %
Frekuensi	50 Hz	50 Hz
Fase	3 Fase	3 Fase

Sementara itu, data tegangan Hubung-Buka serta arus Hubung-Singkat di Rel 150 kV GI Tello itu disajikan dalam Tabel 4.1.3. Data tegangan Hubung-Buka dan arus Hubung-Singkat selengkapnya disajikan dalam lampiran, yakni Lampiran B.7.

Tabel 4.1.3 Data Tegangan Hubung-Buka dan Arus Hubung-Singkat di Rel 150 kV GI Tello (PLN, 2025)

Tegangan Rel / Teg. Hubung-Buka (kV)	Arus Hubung-Singkat Tiga-Fase	
	Maks. (kA)	Min. (kA)
150	13,37	11,18



Gambar 4.1.1. Terminal untuk Sumber Thevenin di Rel 150 kV GI Tello (PLN, 2015)

4.2 Pemodelan Sumber Thevenin di Rel 150 kV GI Tello

Model Sumber Thevenin dibangun dengan menggunakan data arus Hubung-Singkat Tiga-Fase maksimum sebesar 13,37 kA serta tegangan Hubung-Buka di GI Tello, sebesar 150 kV seperti yang disajikan pada Tabel 4.1.3.

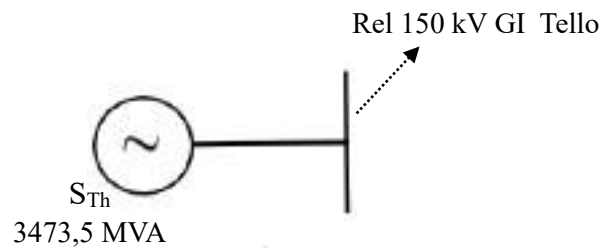
Daya Hubung-Singkat Thevenin maksimum (S_{Th}) dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan (18),

$$S_{Th} = 1,732 \times 150 \text{ kV} \times 13,37 \text{ kA}$$

$$= 3.473.526.000 \text{ VA}$$

$$= 3473,5 \text{ MVA}$$

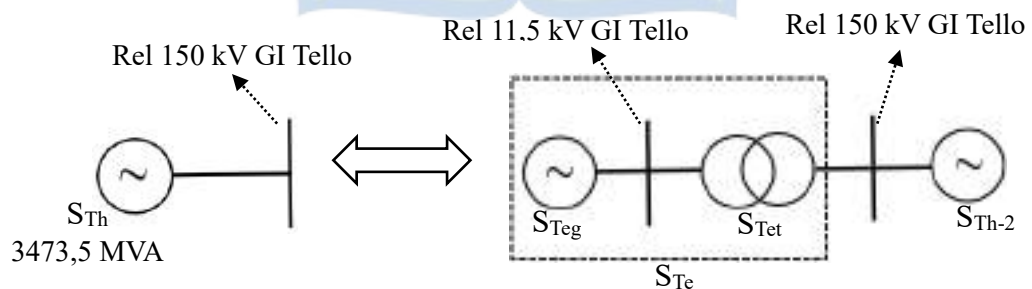
Jadi daya Hubung-Singkat untuk Sumber Thevenin di Rel 150 kV adalah 3473,5 MVA. Diagram Sumber Thevenin di Rel 150 kV GI Tello diperlihatkan dalam Gambar 4.2.1.



Gambar 4.2.1. Model Generator Thevenin PLN Sulselrabar di Rel 150 kV GI Tello

4.2.1 Ekstraksi Kapasitas Hubung-Singkat Generator #GE1

Data kapasitas Hubung-Singkat dari Sumber Thevenin Gambar 4.2.1, masih mencakup generator #GE1 Tello. Oleh karena itu, generator #GE1 harus diekstraksi dari kapasitas Hubung-Singkat di Rel 150 kV GI Tello (S_{Th}). Diagram yang digunakan untuk melakukan ekstraksi kapasitas Hubung-Singkat #GE1 diperlihatkan pada Gambar 4.2.1.1.



Gambar 4.2.1.1. Diagram Ekstraksi Kapasitas Hubung-Singkat #GE1 (Tahap Pertama)

4.2.2 Kapasitas Hubung-Singkat Generator #GE1 dan Transformator *Step-Up*

Nilai kapasitas Hubung-Singkat #GE1 dengan daya 46,56 MVA dan impedans sebesar 0,143 pu diperoleh dengan menggunakan Persamaan (9) sebagai berikut,

$$S_{Teg} = \frac{S}{Z_{pu}} = \frac{46,560 \text{ MVA}}{0,143} = 325,594 \text{ MVA}$$

Keterangan:

$$MVA_{rated} = S = 46,560 \text{ MVA}$$

$$\%X_{equip} = X_{pu} = Z_{pu} = 0,143$$

Sementara itu, nilai kapasitas Hubung-Singkat Transformator (S_{Tet}) dengan nilai daya sebesar 46 MVA dan impedans sebesar 0,12 pu (12 %), diperoleh dengan menggunakan Persamaan (9), sebagai berikut,

$$S_{Tet} = \frac{S}{Z_{pu}} = \frac{46 \text{ MVA}}{0,12} = 383,3 \text{ MVA}$$

Gambar 4.2.1.1 dengan mengacu ke Persamaan (12), secara matematis dinyatakan oleh persamaan berikut,

$$S_{Te} = \frac{S_{Teg} \times S_{Tet}}{S_{Teg} + S_{Tet}}$$

Sehingga diperoleh,

$$\begin{aligned}
 S_{Te} &= \frac{(325,594 \times 383,3)}{(325,594 + 383,3)} \\
 &= \frac{124.800,2}{708,894} \\
 &= 176,05 \text{ MVA}
 \end{aligned}$$

Jadi kapasitas Hubung-Singkat kombinasi seri dari #GE1 dengan transformator *Step-Up* adalah 176,05 MVA. Sehingga diagram Thevenin di Rel 150 kV GI Tello adalah seperti pada Gambar 4.2.2.1



Gambar 4.2.2.1. Diagram Ekstraksi Kapasitas Hubung-Singkat #GE1 (Tahap Kedua)

Dengan menerapkan Persamaan (11) ke diagram pada Gambar 4.2.2.1, maka akan diperoleh persamaan sebagai berikut,

$$\begin{aligned}
 S_{Th} &= S_{Te} + S_{Th-2} \\
 S_{Th-2} &= S_{Th} - S_{Te} \\
 &= 3473,5 - 176,05 \\
 &= 3297,4 \text{ MVA}
 \end{aligned}$$

Jadi nilai kapasitas Hubung-Singkat di *Grid* Rel 150 kV GI Tello untuk PLN Sulselrabar dengan #GE1 terekstraksi adalah 3297,4 MVA.

Selanjutnya, dengan menggunakan Persamaan (19), maka nilai parameter induktans dapat diperoleh seperti berikut, dengan terlebih dahulu menghitung nilai impedans (resistans diabaikan),

$$\begin{aligned} Z &= (150 \text{ kV})^2 / S_{Th-2} \\ &= (22500) MV^2 / 3297,4 \text{ MVA} \\ &= 6,823 \Omega \end{aligned}$$

Jadi nilai impedans di *Grid* Rel 150 kV GI Tello minus #GE1 adalah sebesar 6,823 Ω .

Selanjutnya, untuk menghitung nilai induktans digunakan Persamaan (20) yang dimana $Z = X_L$ sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} X_L &= 2\pi \cdot F \cdot L \\ L &= X_L / 2\pi \cdot F \\ &= 6,823 / 314 \\ &= 0,0217 \text{ H} \end{aligned}$$

Jadi, nilai induktans Generator Thevenin adalah 0,0217 H, berdasarkan reaktans. Data parameter Sumber Thevenin pada Rel 150 kV GI Tello, secara lengkap disajikan dalam Tabel 4.2.1.

Tabel 4.2.1. Parameter Sumber Thevenin di Rel 150 kV GI Tello

Tegangan Th./Teg. Hubung-Buka (kV)	Daya Hubung-Singkat Sulselrabar (MVA)	Daya Hubung-Singkat minus #GE1 Tello (MVA)	Impedans Th. [R=0] (Ohm)	Induktans (H)	Frekuensi (Hz)
150	3473,5	3297,4	6,823	0,0217	50

4.3 Pemodelan Generator #GE1 PLTG Tello

Nilai parameter induktans pada S_{Te} dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan (19), dengan terlebih dahulu menghitung nilai impedans (resistans diabaikan),

$$\begin{aligned}
 Z_D &= \frac{V^2}{S} \\
 &= \frac{(11,5 \text{ kV})^2}{46,560 \text{ MVA}} \\
 &= \frac{132,25 \text{ MV}^2}{46,560 \text{ MVA}} \\
 &= 2,840 \Omega
 \end{aligned}$$

Kemudian mengonversi nilai impedans dasar ke impedans aktual menggunakan Persamaan (15) sebagai berikut,

$$\begin{aligned}
 Z_{akt} &= Z_{pu} \times Z_D \\
 &= 0,143 \times 2,840 \\
 &= 0,41 \Omega
 \end{aligned}$$

Oleh karena nilai resistans diabaikan maka nilai reaktans, X_L , sama dengan impedans, yakni $0,41 \Omega$.

Selanjutnya, nilai induktans (L) dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan (20) yakni sebagai berikut,

$$Z_{akt} = X_{akt} = 2\pi fL$$

$$L = \frac{X_{akt}}{314}$$

$$= \frac{0,41}{314}$$

$$= 0,00130 \text{ H}$$

Jadi, nilai induktans Generator (S_{Te}) adalah 0,00130 H.

Nilai induktans untuk per segmen belitan dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan di bawah ini,

$$X_L/10 = 0,00130/10$$

$$= 0,00013 \text{ H}$$

Jadi, nilai induktans per segmen belitan adalah 0,00013 H. Data parameter Generator #GE1 PLTG Tello, secara lengkap disajikan dalam Tabel 4.3.1.

Tabel 4.3.1. Parameter Generator #GE1

Teg. Generator (kV)	Kapasitas Generator (MVA)	Impedans Dasar (Ohm)	Impedans Aktual (Ohm)	Induktans (H)	Induktans Per Segmen (H)
11,5	46,560	2,840	0,41	0,00130	0,00013

4.4 Desain Setelan Karakteristik Relai Diferensial Generator #GE1 Tello

Dengan menggunakan setelan karakteristik GE G60, parameter proteksi diferensial pada relai ditentukan berdasarkan nilai arus nominal generator #GE1

PLTG Tello sebesar 2337 A. Nilai *pickup* disetel sebesar 10% dari arus nominal, yaitu sebesar 233,7 A, yang berarti bahwa relai akan mulai merespons jika terjadi perbedaan arus melebihi nilai tersebut. Selanjutnya, kemiringan awal atau *Slope1* ditetapkan sebesar 0,1 pu (10%), yang setara dengan sudut $\tan^{-1}(0,1)$ dalam satuan derajat, sama dengan sudut $5,71^\circ$. *Break1* disetel pada 115%, yaitu saat arus mencapai 1,15 kali arus nominal sebesar 2687 A. Setelah melewati titik ini, digunakan *Slope2* sebesar 0,8 pu (80%), yang dikonversi ke bentuk sudut sebesar $\tan^{-1}(0,8)$ sama dengan sudut $38,66^\circ$. Parameter yang dipakai secara lengkap disajikan dalam Tabel 4.4.1.

Tabel 4.4.1. Parameter Setelan Karakteristik

<i>I_n</i>	<i>Pickup</i>	<i>Slope1</i>	<i>Breake1</i>	<i>Slope2</i>
2337 A	10%	0,1 pu / $\tan^{-1}(0,1)$ dalam derajat	115%	0,8 pu / $\tan^{-1}(0,8)$ dalam derajat

Asumsi (pendekatan) *Break2* sama dengan *Break1*, maka digunakan persamaan di bawah ini,

$$\begin{aligned}
 I_p &= 10\% \times I_n \\
 &= 0,1 \times 2337 = 233,7 \text{ A} = 0,2337 \text{ kA}
 \end{aligned}$$

$$Slope_1 = \text{arctan}(0,1) = \angle 5,71^\circ$$

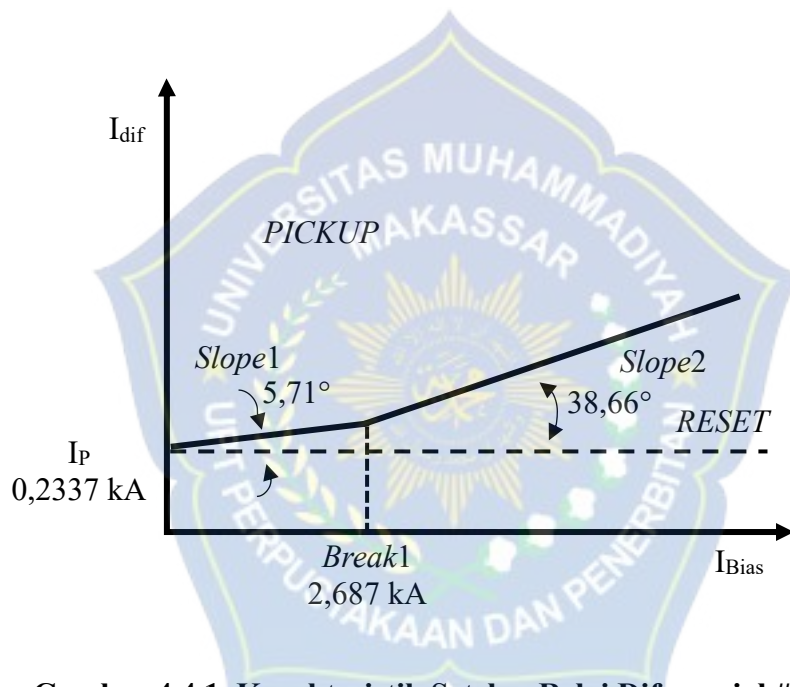
$$\begin{aligned}
 I_B &= 115\% \times I_n \\
 &= 1,15 \times 2337 = 2687 \text{ A} = 2,687 \text{ kA}
 \end{aligned}$$

$$Slope_2 = \text{arctan}(0,8) = \angle 38,66^\circ$$

Data parameter karakteristik setelan relai diferensial untuk #GE1, secara lengkap disajikan dalam Tabel 4.4.2.

Tabel 4.4.2. Nilai Parameter Setelan Relai Relai Diferensial #GE1

<i>Arus Pickup</i> (I_P)	<i>Slope1</i> (Derajat)	<i>Arus</i> <i>Break1/Break2</i> (I_B)	<i>Slope2</i> (Derajat)
0,2337 kA	5,71	2,687 kA	38,66



Gambar 4.4.1. Karakteristik Setelan Relai Diferensial #GE1

Gambar 4.4.1 memperlihatkan kurva karakteristik *dual-slope* dari relai diferensial yang digunakan untuk mendeteksi gangguan internal pada belitan stator generator. Titik awal kerja relai ditentukan oleh arus *pickup* (I_P) sebesar 10% dari arus nominal, yaitu 0,2337 kA . Setelah nilai arus bias (I_{bias}) mencapai 115% dari arus nominal atau sebesar 2,687 kA, maka kemiringan kurva berubah dari *Slope1* menjadi *Slope2*. *Slope1* dengan sudut $5,71^\circ$ berlaku untuk gangguan kecil di bawah titik *Break*, sedangkan *Slope2* dengan sudut $38,66^\circ$ digunakan untuk gangguan

besar yang melewati titik *break*. Daerah di atas kurva merupakan area *pickup*, yang menandakan gangguan internal, sementara di bawah kurva merupakan area *reset*, yang menandakan gangguan eksternal. Setelan ini dirancang untuk mencapai sensitivitas yang tinggi sehingga relai mampu mendeteksi gangguan internal sekecil mungkin, sekaligus memiliki selektivitas yang baik agar tidak salah bekerja saat terjadi gangguan eksternal.

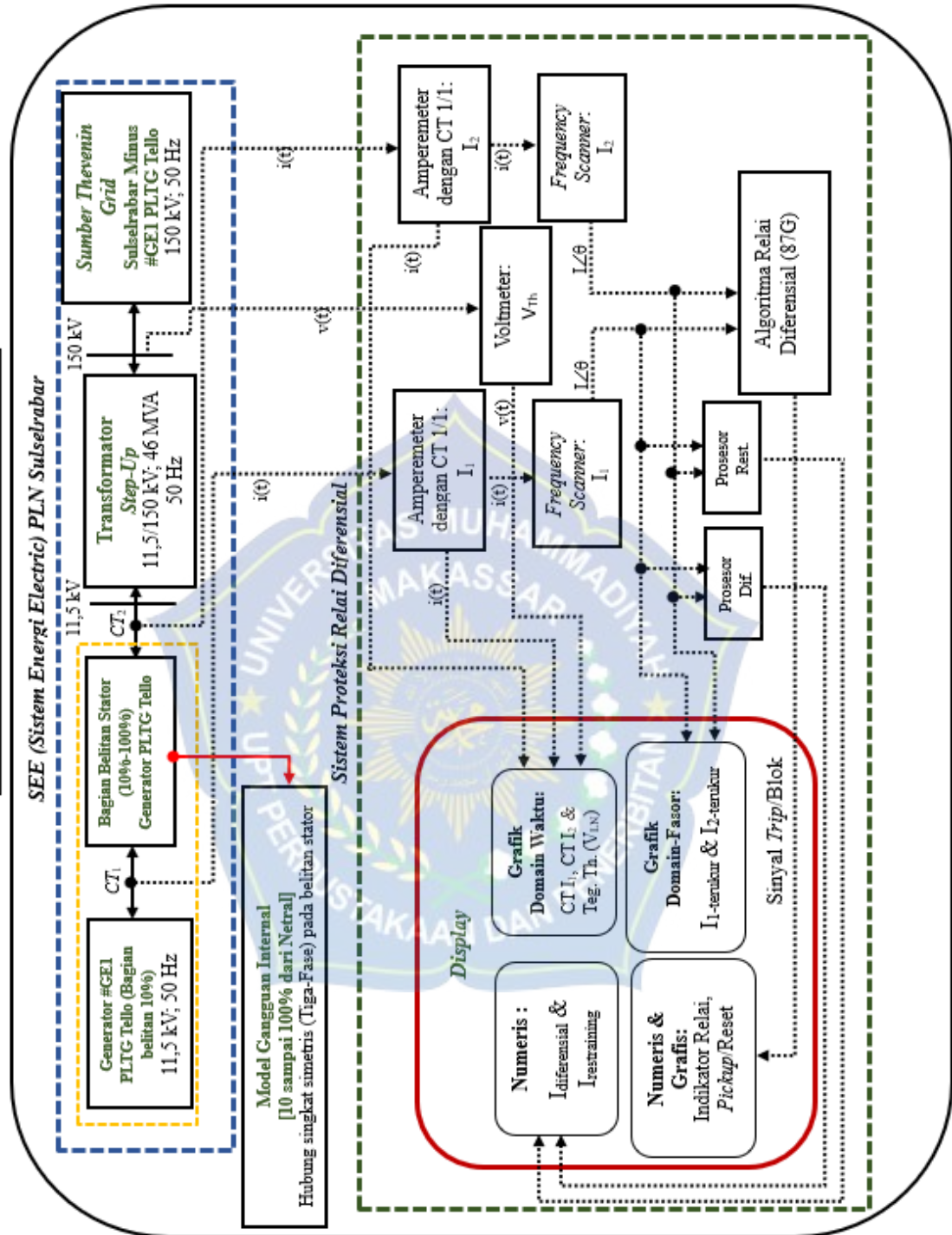
4.5 Model Sistem Daya dan Sistem Relai Diferensial Menggunakan Perangkat Lunak *PSCAD*

Penelitian ini dilakukan pemodelan sistem daya dan sistem relai diferensial kemudian disimulasikan di dalam lingkungan perangkat lunak *PSCAD*. Model sistem daya terdapat dalam dua kondisi, yakni gangguan eksternal (Gambar 4.5.3) dan internal (Gambar 4.5.4). Model sistem daya ini terdapat dua sistem yang saling terhubung yakni sistem Generator #GE1 PLTG Tello (zona internal) dan sistem *Grid* Sulselrabar (zona eksternal). Sedangkan model sistem relai diferensial dalam perangkat lunak *PSCAD* untuk mendeteksi gangguan internal dan eksternal dengan model sistem relai yang sama, seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.5.5. Model sistem relai ini menggunakan *CT* dengan rasio 1/1 untuk mengukur arus pada masing-masing ujung belitan stator generator. Arus yang diukur kemudian diproses dalam dua blok utama, yaitu prosesor arus diferensial dan prosesor arus bias, untuk memperoleh nilai arus diferensial (I_{dif}) dan arus bias (I_{bias}) yang kemudian ditampilkan pada model *display* (Gambar 4.5.6).

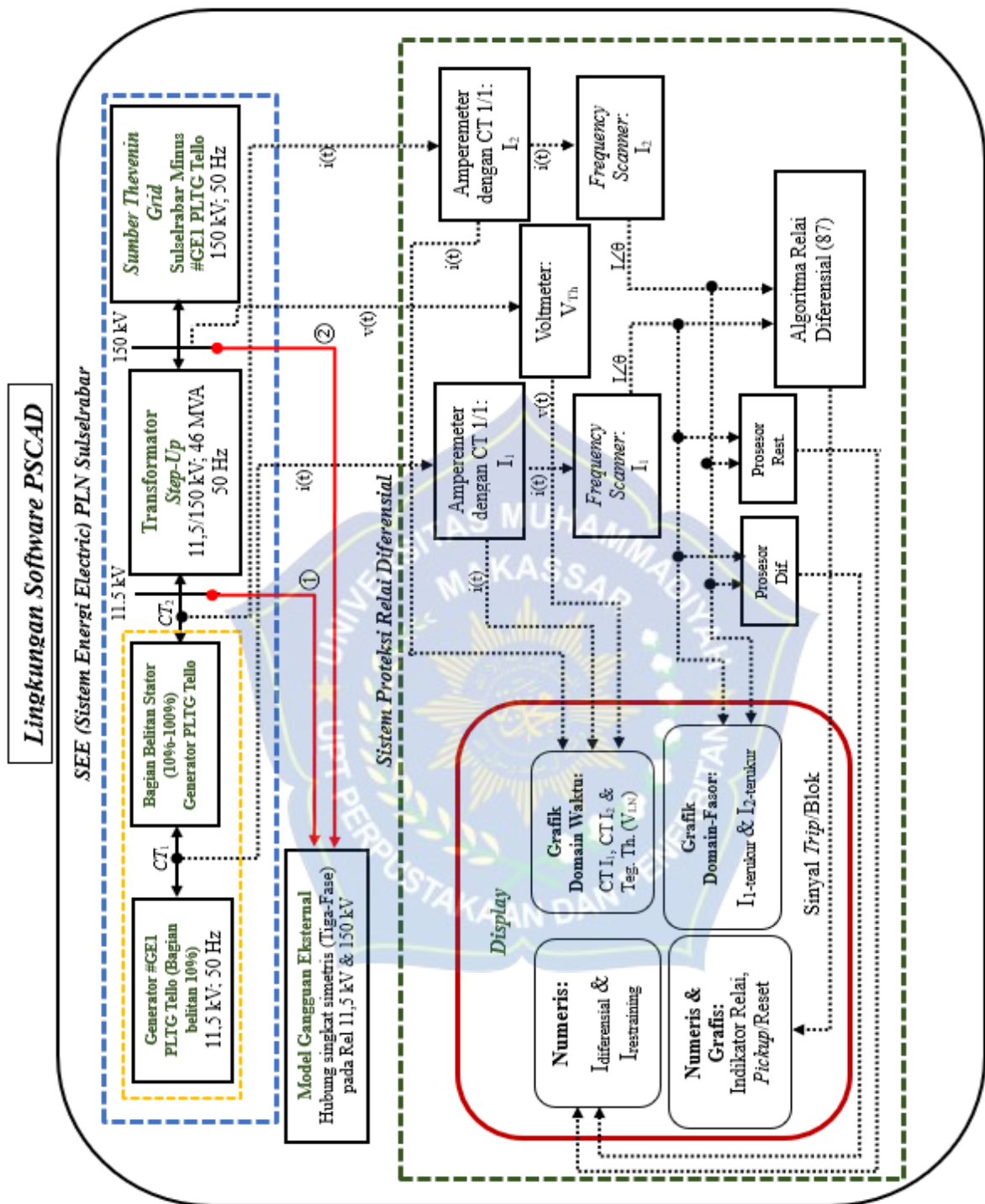
Adapun skema/konfigurasi berfungsi untuk mempresentasikan sistem dalam gangguan internal dan eksternal. (Gambar 4.5.1) berfungsi untuk mempresentasikan sistem dalam kondisi gangguan eksternal. Sementara itu, (Gambar 4.5.2) berfungsi untuk mempresentasikan sistem dalam kondisi gangguan internal. Konfigurasi sistem ini terdiri dari beberapa komponen yaitu Model *SEE* yang berfungsi memodelkan *Sistem Energi Elektrik (SEE)* yang terdiri atas Generator #GE1 PLTG Tello 11,5 kV; 50 Hz, Belitan Stator Generator PLTG Tello, Transformator *Step-Up* 11,5/150 kV; 50 Hz, dan Sumber Thevenin *Grid* Sulselrabar minus #GE1 PLTG Tello, 150 kV; 50 Hz.

Selain itu, terdapat instrumen seperti amperemeter dan voltmeter yang digunakan untuk mengukur besaran-besaran yang dibutuhkan. Algoritma relai diferensial (87G) digunakan untuk menghitung arus diferensial dan arus bias, lalu membandingkan keduanya. Jika arus diferensial lebih besar dari arus bias maka akan dikirimkan sinyal *trip* ke *CB*, sebaliknya jika arus bias lebih besar maka akan dikirimkan sinyal blok. Sistem ini juga dilengkapi Frekuensi *Scanner* yang berfungsi untuk mengonversi sinyal arus dari domain waktu ke domain fasor, yaitu FFT_1 untuk arus dari amperemeter I_1 dan FFT_2 untuk arus dari amperemeter I_2 . Prosesor bias menghitung nilai arus bias, sementara prosesor diferensial menghitung nilai arus diferensial. Semua hasil pengukuran dan respons proteksi ditampilkan melalui *display* dalam bentuk data numeris maupun grafik, baik pada domain waktu maupun domain fasor.

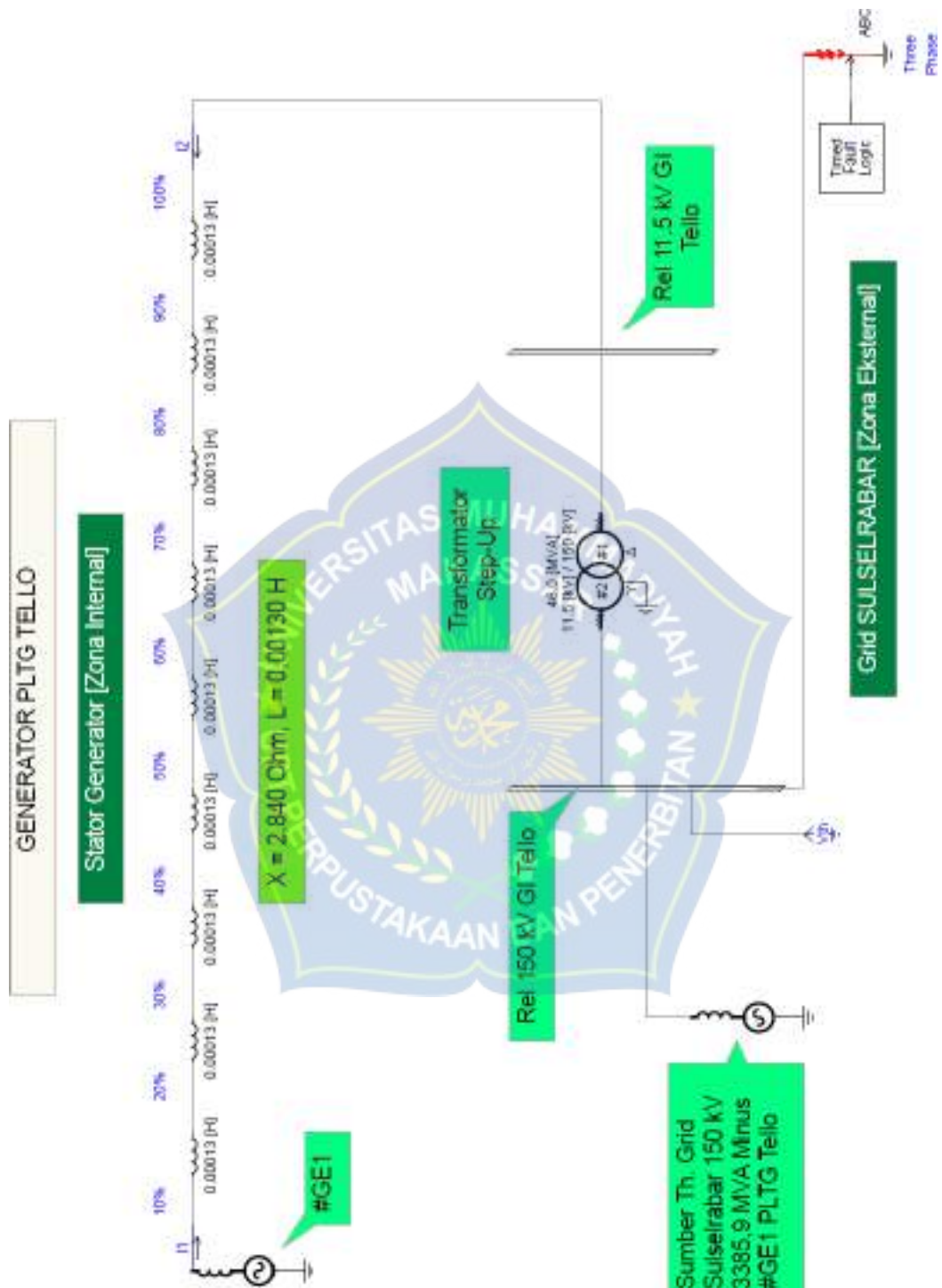
Lingkungan Software PSCAD



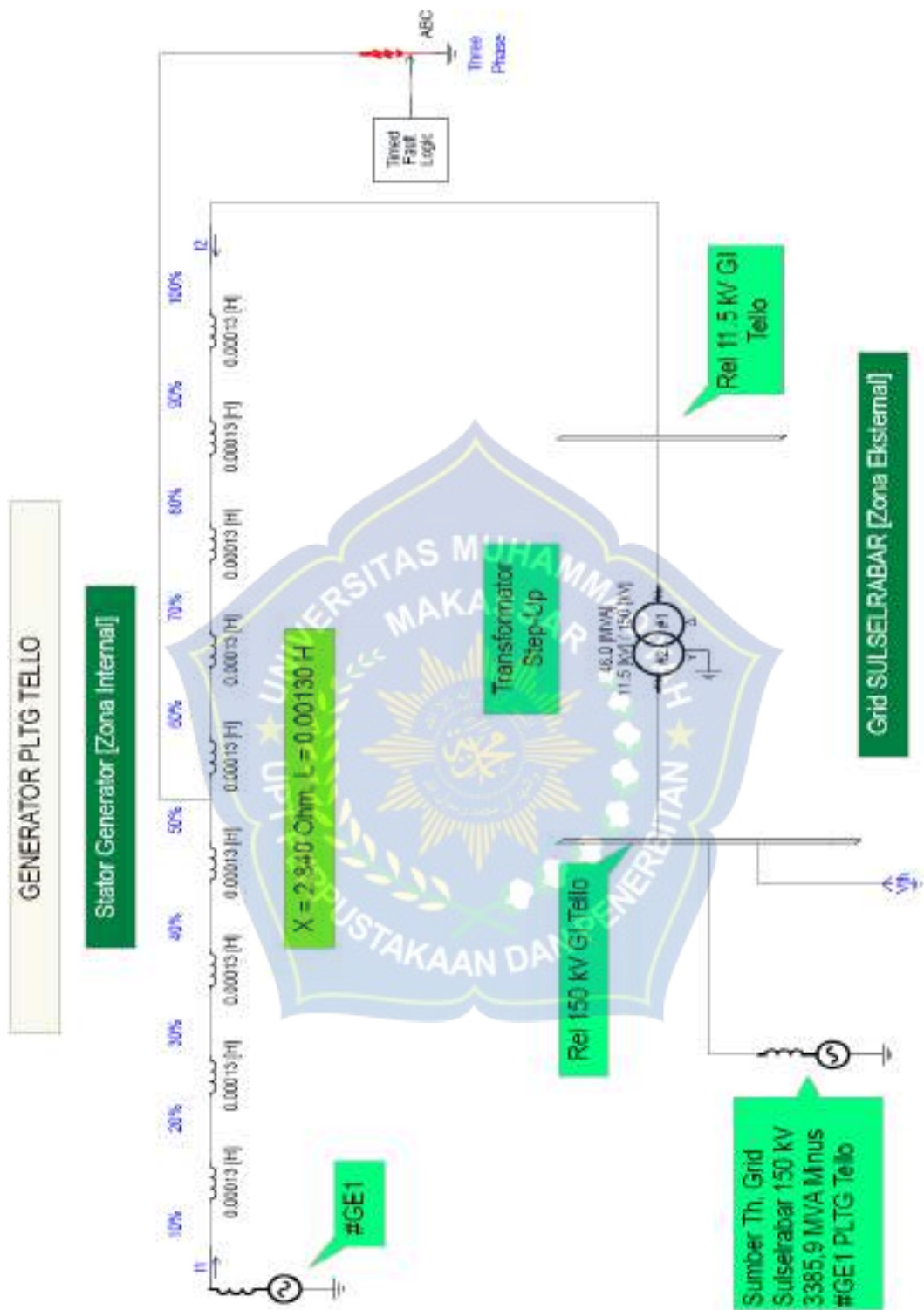
Gambar 4.5.1. Skema/Gangguan Eksternal



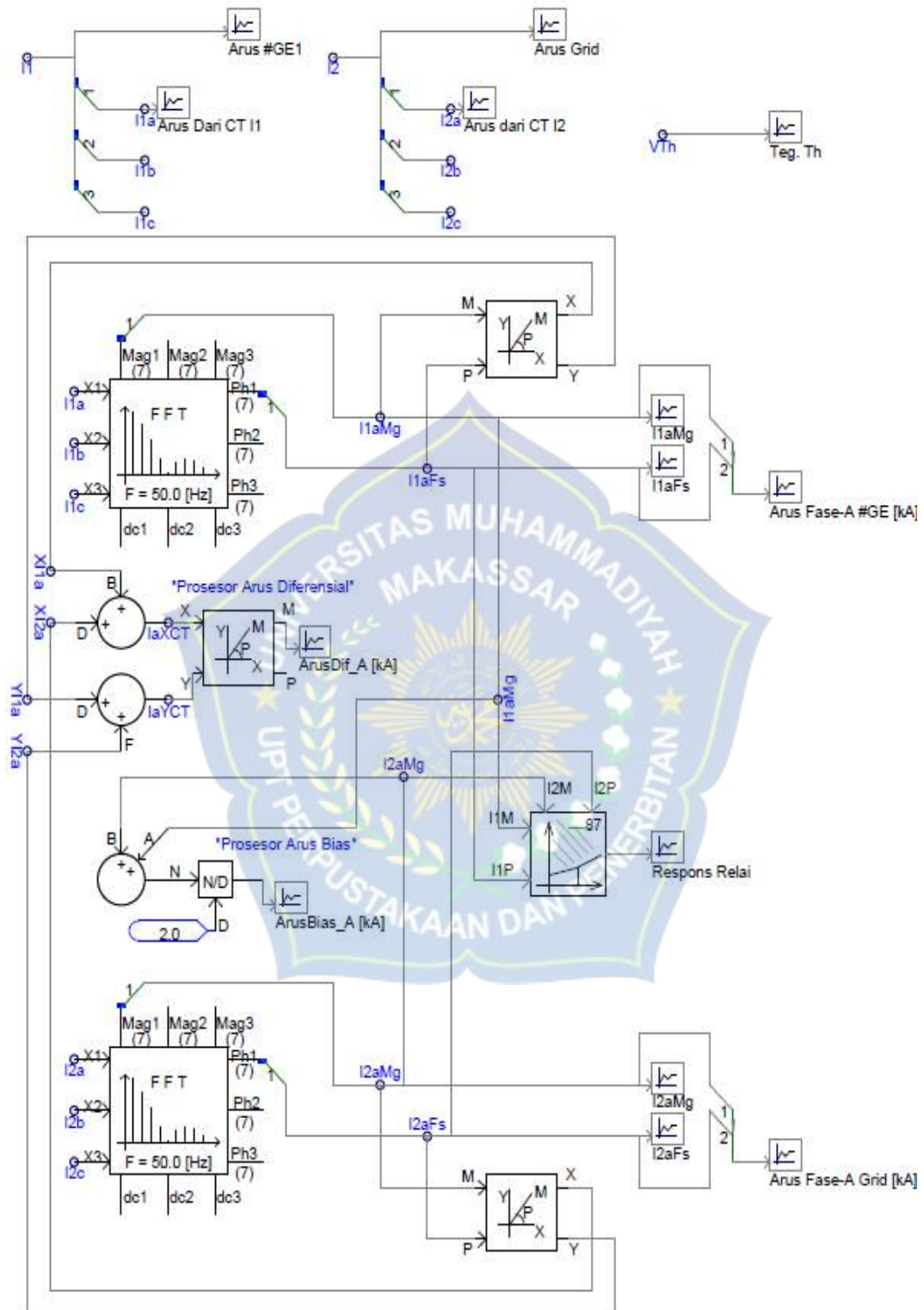
Gambar 4.5.2. Skema/Konfigurasi Gangguan Internal



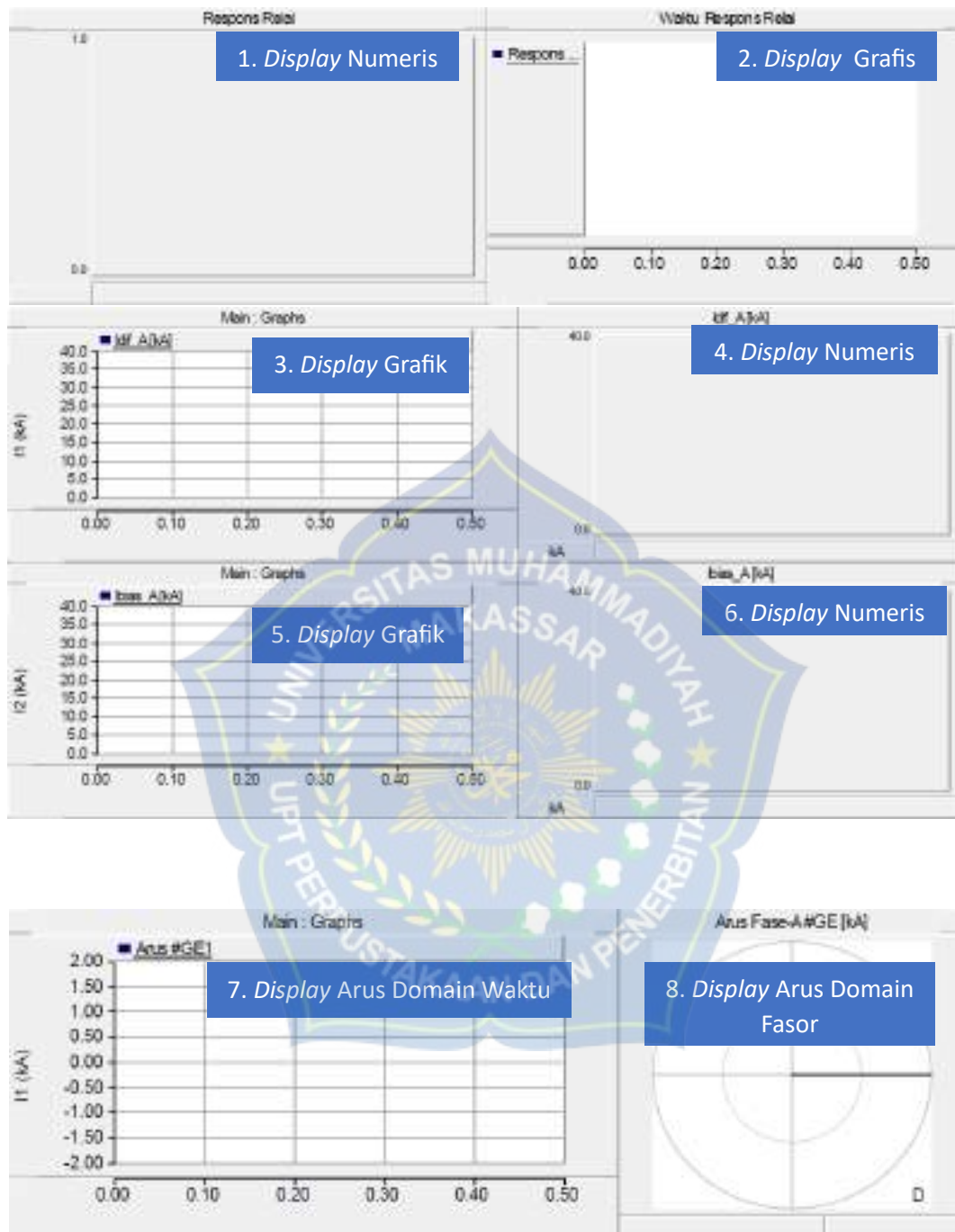
Gambar 4.5.3. Model *PSCAD* Sistem Daya Gangguan Eksternal

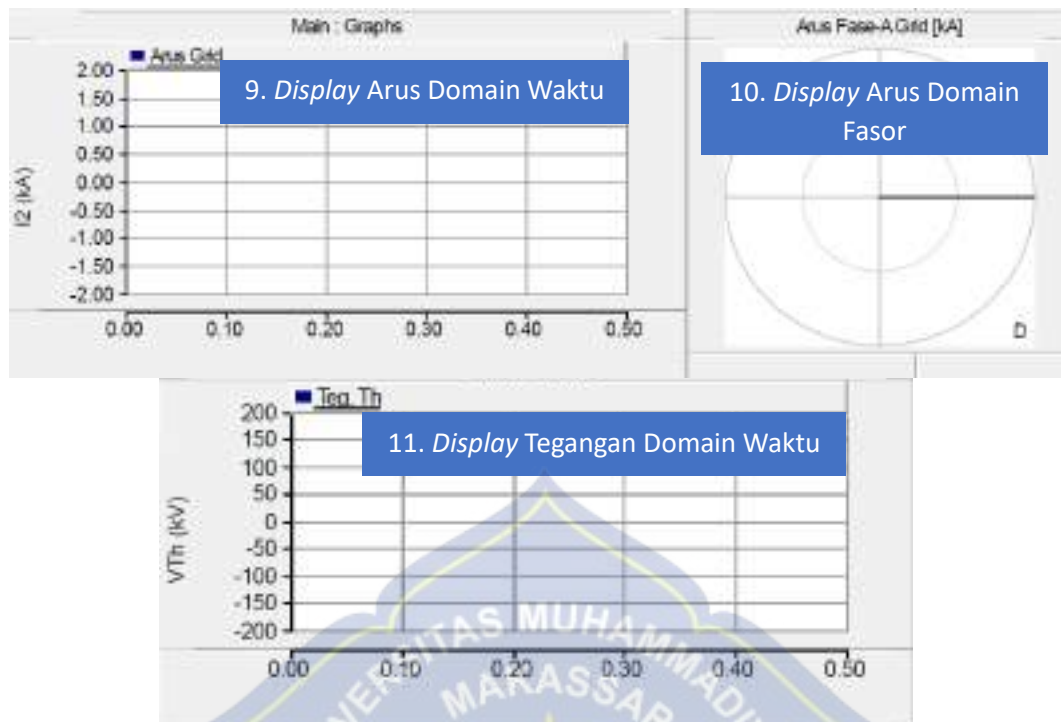


Gambar 4.5.4. Model Awal PSCAD Sistem Daya Kondisi Gangguan Internal



Gambar 4.5.5. Model PSCAD Sistem Relai Diferensial





Gambar 4.5.6. Model Awal *Display* Sebelum Simulasi

Keterangan:

- 1 : Menampilkan respons relai (digit 1 = *pickup*, digit 0 = *reset*)
- 2 : Menampilkan waktu respons relai
- 3 dan 5 : Menampilkan arus diferensial
- 4 dan 6 : Menampilkan arus bias
- 7 dan 9 : Menampilkan arus domain waktu
- 8 dan 10 : Menampilkan arus domain fasor
- 11 : Menampilkan tegangan domain waktu

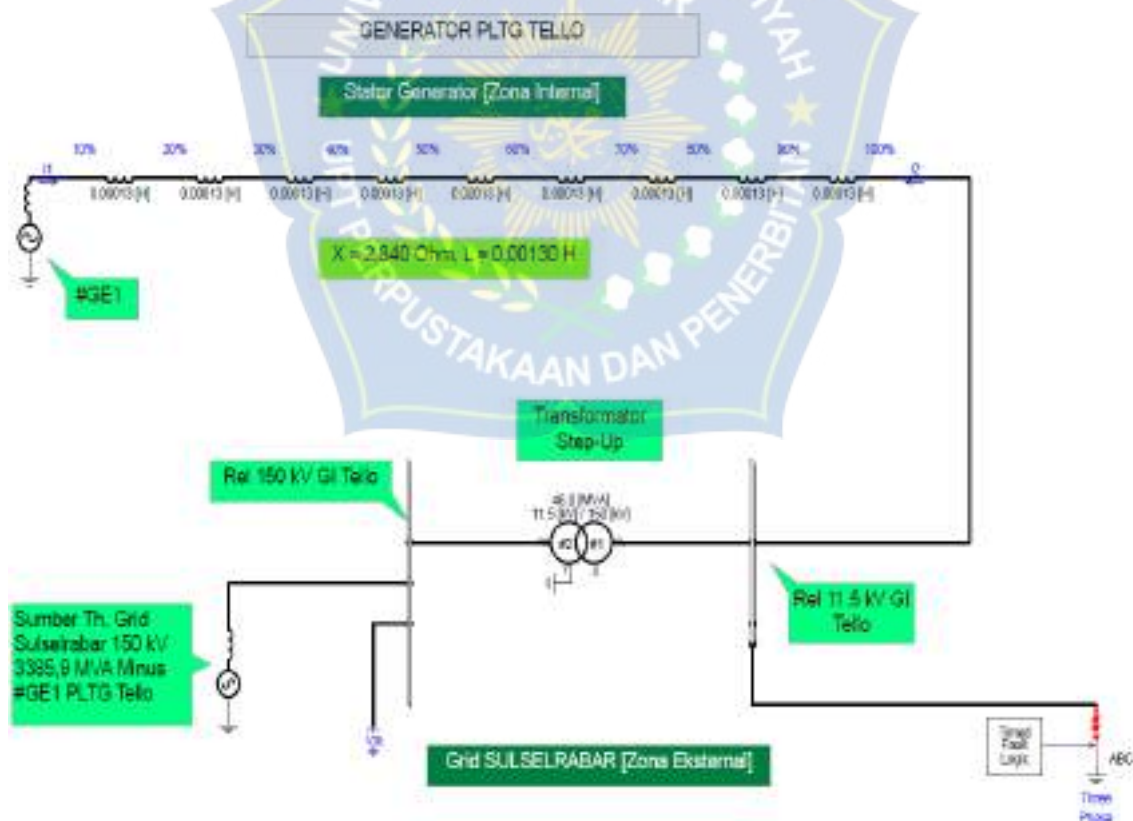
4.6 Model *PSCAD* dan Hasil Simulasi Gangguan Eksternal

Model dan simulasi gangguan eksternal pada sistem *Grid* Sulselrabar dilakukan di Rel 11,5 kV dan 150 kV Tello. Adapun model dan hasil simulasi gangguan sebagai berikut:

4.6.1 Gangguan Eksternal di Rel 11,5 kV Tello

4.6.1.1 Model *PSCAD*

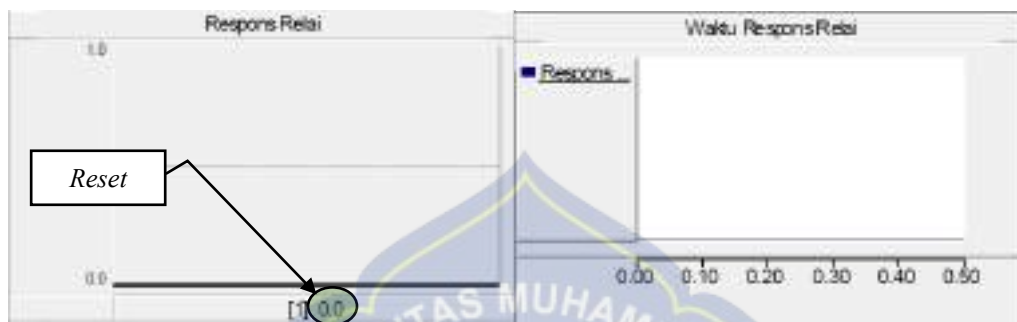
Gambar 4.6.1.1.1 menunjukkan model *PSCAD* sistem daya yang mana sistem generator #GE1 PLTG Tello terhubung ke sistem *Grid* Sulselrabar dalam kondisi gangguan eksternal di Rel 11,5 kV Tello.



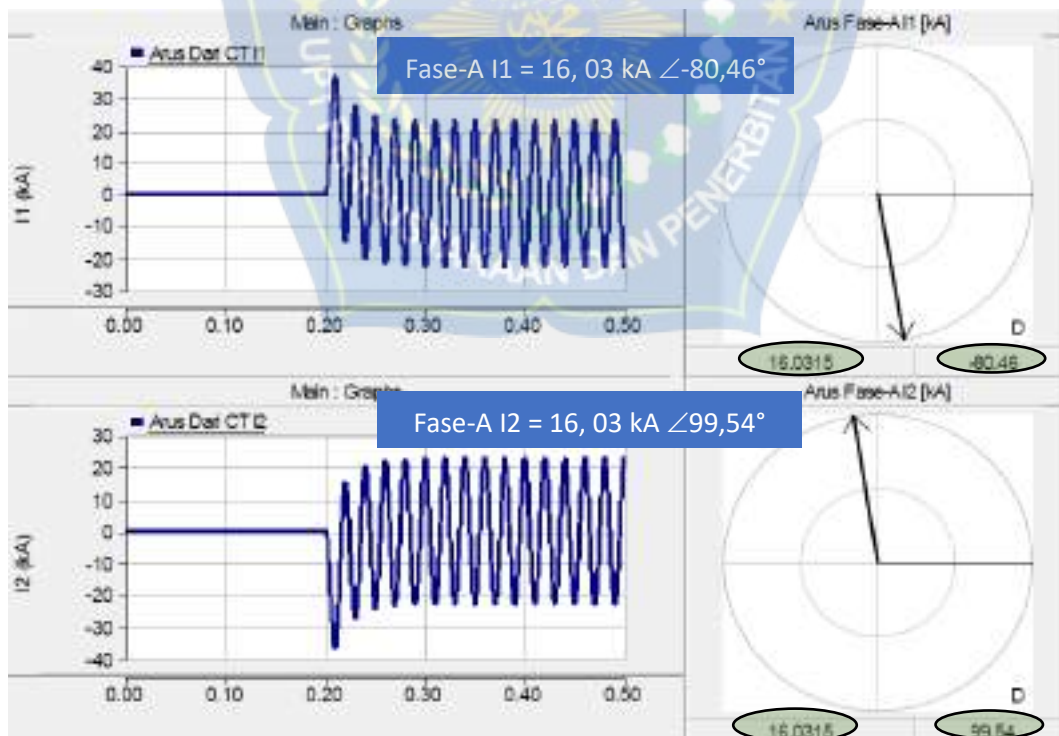
Gambar 4.6.1.1.1 Model *PSCAD* untuk Generator #GE1 PLTG Tello yang Terhubung ke *Grid* Sulselrabar pada Kondisi Gangguan Eksternal di Rel 11,5 kV

4.6.1.2 Hasil simulasi

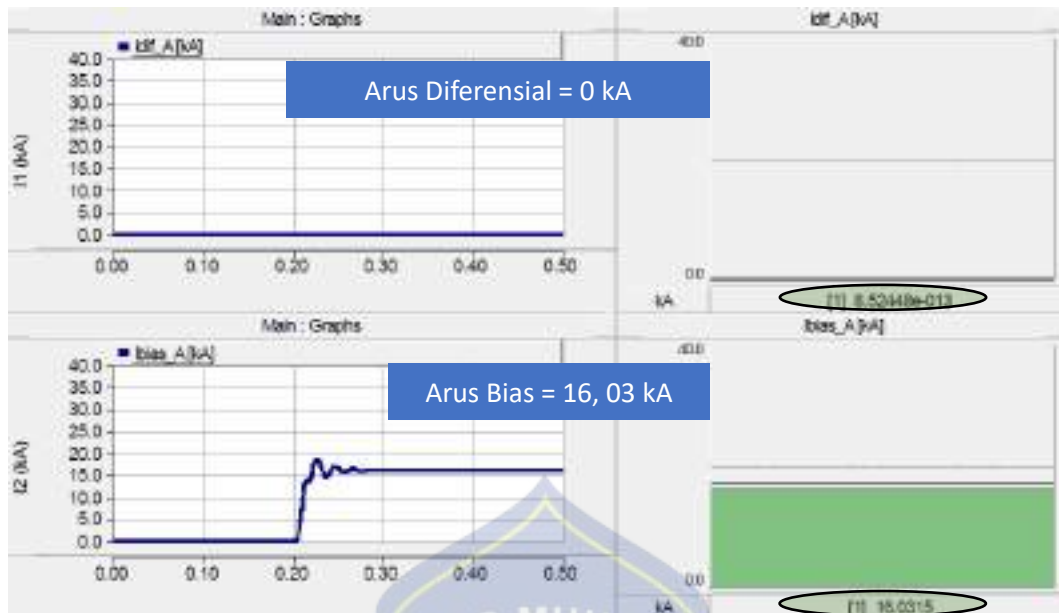
Gangguan disimulasikan di Rel 11,5 kV dengan resistans gangguan (R_F) 1 Ohm. Gangguan terjadi diatur pada waktu 0,2 s. *Display* hasil simulasi gangguan ditampilkan sebagai berikut:



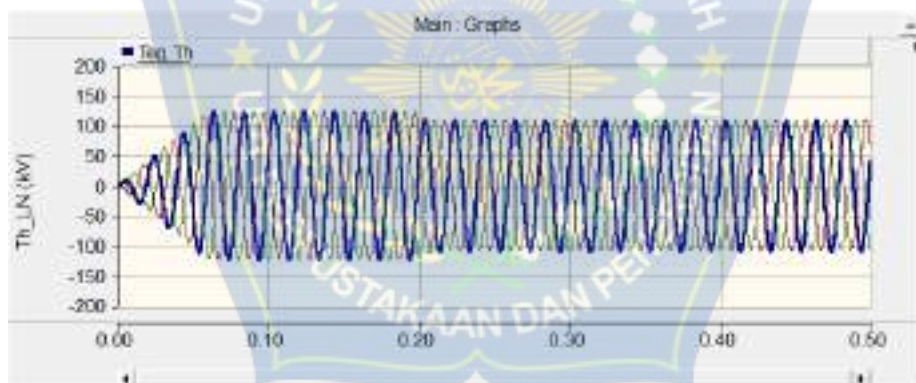
Gambar 4.6.1.2.1. *Display* Numeris dan Grafis pada Kondisi Gangguan Eksternal di Rel 11,5 kV



Gambar 4.6.1.2.2. *Display* Grafik Arus Domain Waktu dan Grafik Arus Domain Fasor Fase-A pada Kondisi Gangguan Eksternal di Rel 11,5 kV



Gambar 4.6.1.2.3. Display Grafik, Numeris Arus Diferensial dan Arus Bias Fase-A pada Kondisi Gangguan Eksternal di Rel 11,5 kV



Gambar 4.6.1.2.4. Display Grafik Tegangan Domain Waktu di Rel 150 kV pada Kondisi Gangguan Eksternal di Rel 11,5 kV

Hasil simulasi gangguan di Rel 11,5 kV dengan R_F 1 ohm menunjukkan bahwa arus bias lebih besar dari arus diferensial yang mana relai menghasilkan status operasi *reset* (digit 0) seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.6.1.2.1. Nilai arus diferensial (I_{dif}) terukur sebesar 0 kA dan arus bias (I_{bias}) sebesar 16,03 kA (Gambar 4.6.1.2.3). Selain itu, nilai arus yang terukur pada $CT I_1$ sebesar 16,03 kA

$\angle -80,46^\circ$ dan arus $CT I_2$ sebesar 16,03 kA $\angle 99,54^\circ$ yang menandakan bahwa $I_1 = I_2$ (Gambar 4.6.1.2.2). Adapun Gambar 4.6.1.2.4 menampilkan gelombang tegangan yang terukur di Rel 150 kV saat terjadi gangguan, tegangan mengalami penurunan pada waktu 0,2 s.

Secara matematis, menggunakan Persamaan (5), arus diferensial diperoleh sebagai berikut,

$$\begin{aligned} I_1 &= 16,03 \angle -80,46^\circ \\ &= 16,03 \cos(-80,46^\circ) + j 16,03 \sin(-80,46^\circ) \\ &= 2,65 - j 15,80 \\ I_2 &= 16,03 \angle 99,54^\circ \\ &= 16,03 \cos(99,54^\circ) + j 16,03 \sin(99,54^\circ) \\ &= -2,65 + j 15,80 \\ I_{dif} &= 0 + 0 \\ &= 0 \text{ kA} \end{aligned}$$

Selanjutnya, menggunakan Persamaan (6), arus bias diperoleh sebagai berikut,

$$\begin{aligned} I_{bias} &= \frac{16,03}{2} + \frac{16,03}{2} \\ &= \frac{32,06}{2} \\ &= 16,03 \text{ kA} \end{aligned}$$

Dengan kondisi tersebut ($I_{bias} = 16,03 \text{ kA}$) digunakan Persamaan (4), maka diperoleh persamaan di bawah ini,

Kondisi,

$$|I_{bias}| \geq I_{S2} = Break1$$

Maka,

$$|I_{dif}| > [K2 \cdot I_{bias}] - [(K2 - K1) \times I_{S2}] + I_{S1}$$

$$|I_{dif}| > [Slope2 \cdot I_{bias}] - [(Slope2 - Slope1) \times Break1] + I_p$$

Bagian kanan dari pertaksamaan di atas adalah,

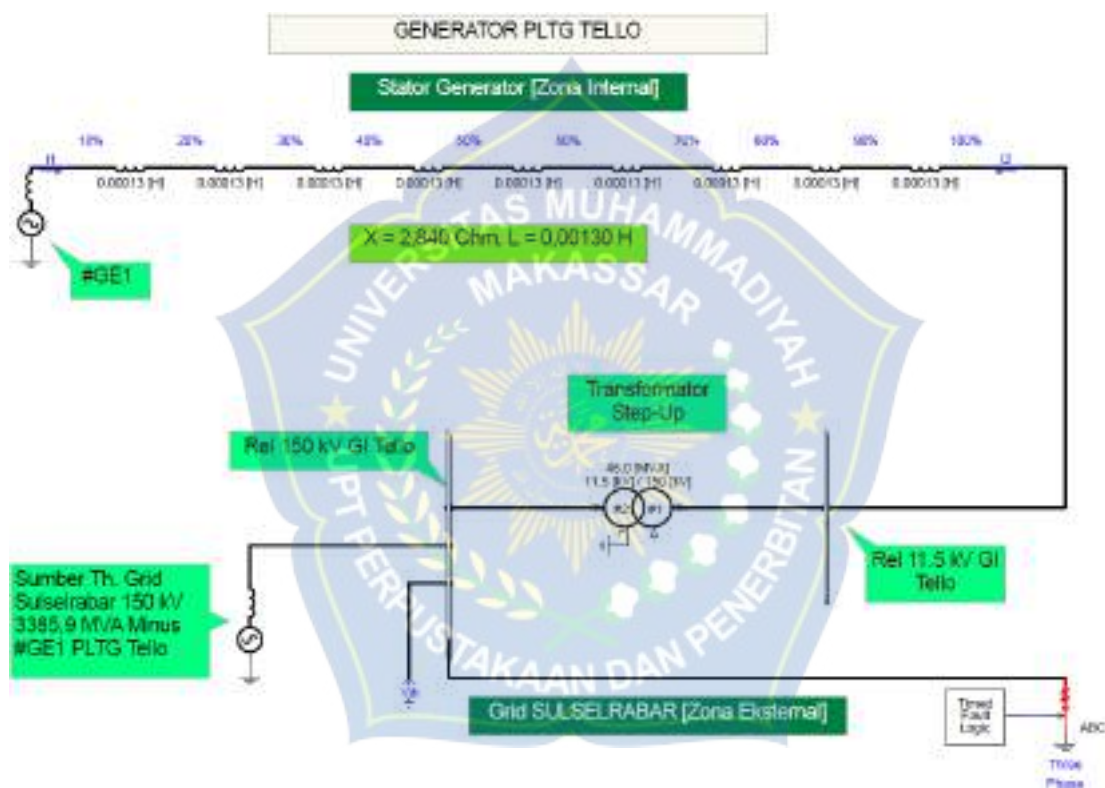
$$\begin{aligned} &= [0,8 \times 16,03] - (0,8 - 0,1) \times 2,687 + 0,2337 \\ &= [12,82] - (0,7) \times 2,687 + 0,2337 \\ &= 12,82 - 1,88 + 0,2337 \\ &= 10,94 + 0,2337 \\ &= 11,17 \text{ kA} \end{aligned}$$

Jadi, komponen momen lawan sebesar 11,17 kA. Oleh karena itu, dengan arus diferensial 0 kA, maka diperoleh, $0 \text{ kA} < 11,17 \text{ kA}$. Hal ini menyebabkan relai mengambil keputusan *reset*.

4.6.2 Gangguan Eksternal di Rel 150 kV GI Tello

4.6.2.1 Model *PSCAD*

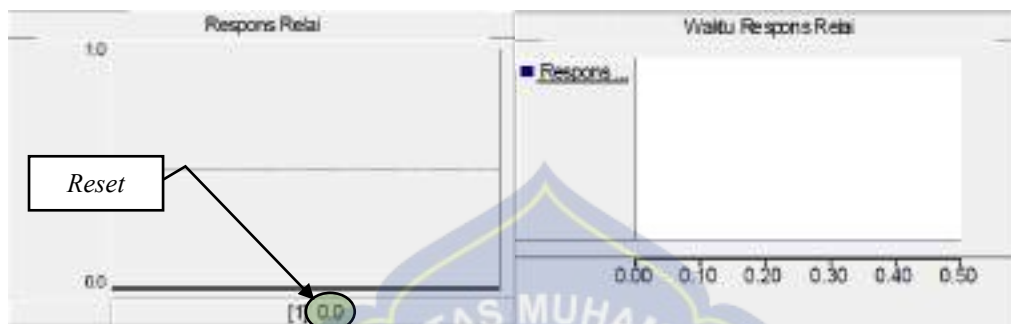
Gambar 4.6.2.1.1 menunjukkan model *PSCAD* sistem daya yang mana sistem generator #GE1 PLTG Tello terhubung ke sistem *Grid* Sulselrabar dalam kondisi gangguan eksternal di Rel 150 kV GI Tello.



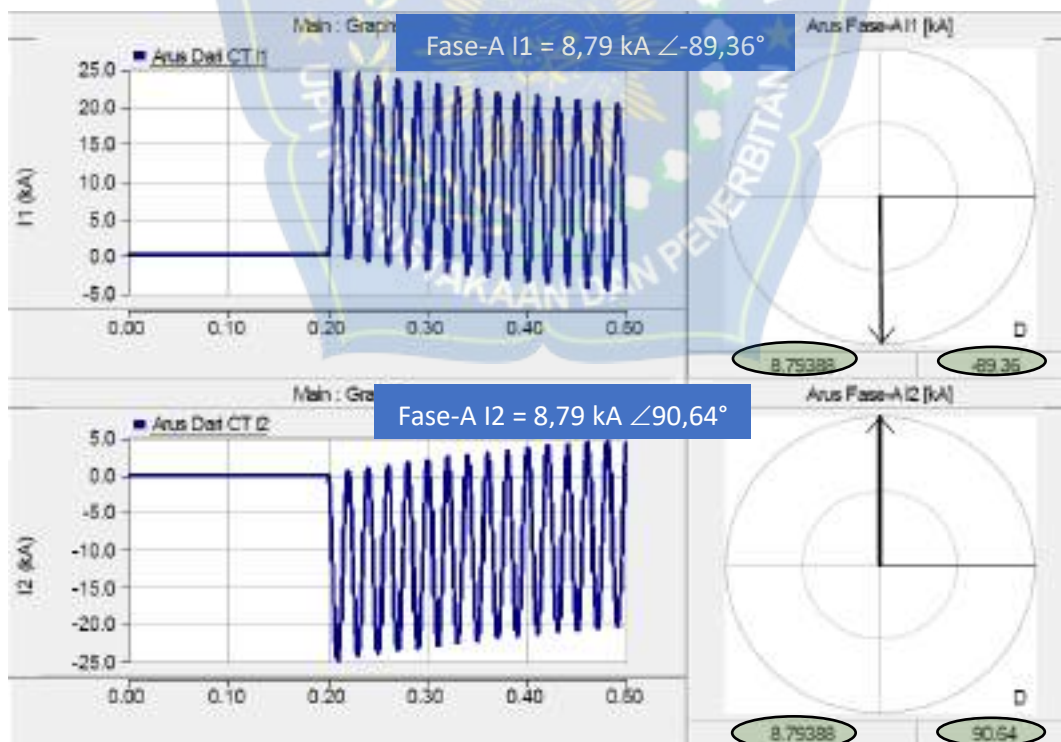
Gambar 4.6.2.1.1. Model *PSCAD* untuk Generator #GE1 PLTG Tello yang Terhubung ke *Grid* Sulselrabar pada Kondisi Gangguan Eksternal di Rel 150 kV

4.6.2.2 Hasil simulasi

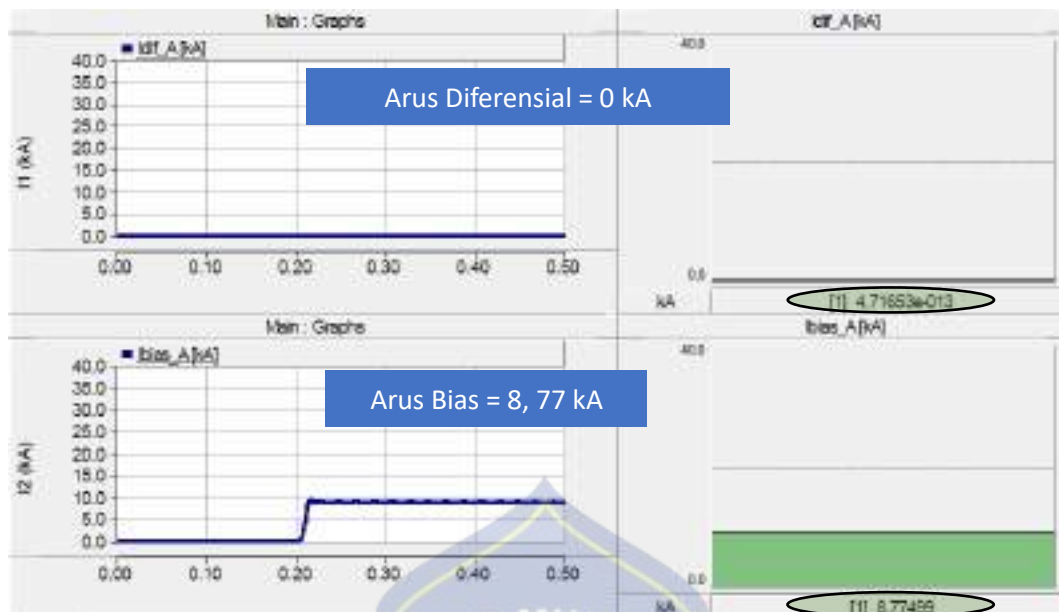
Gangguan disimulasikan di Rel 150 kV dengan resistans gangguan (R_F) 1 Ohm. Gangguan terjadi diatur pada waktu 0,2 s. *Display* hasil simulasi gangguan ditampilkan sebagai berikut:



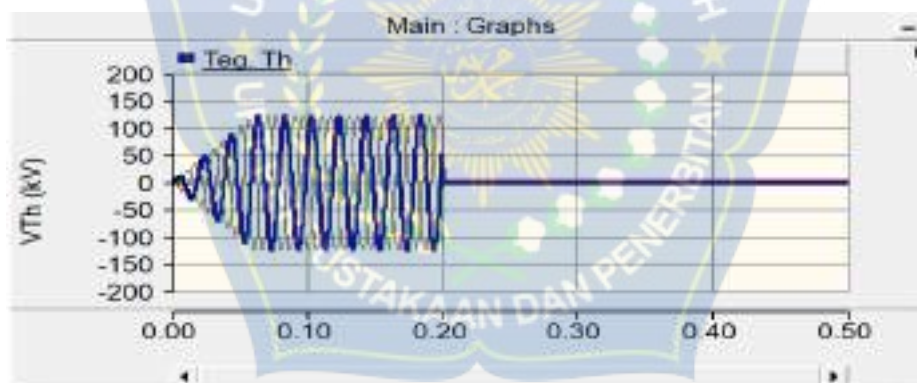
Gambar 4.6.2.2.1. *Display* Numeris dan Grafis pada Kondisi Gangguan Eksternal di Rel 150 kV



Gambar 4.6.2.2.2. *Display* Grafik Arus Domain Waktu dan Grafik Arus Domain Fasor Fase-A pada Kondisi Gangguan Eksternal di Rel 150 kV



Gambar 4.6.2.2.3. Display Grafik, Numeris Arus Diferensial dan Arus Bias Fase-A pada Kondisi Gangguan Eksternal di Rel 150 kV



Gambar 4.6.2.2.4. Display Grafik Tegangan Domain Waktu di Rel 150 kV pada Kondisi Gangguan Eksternal di Rel 150 kV

Hasil simulasi gangguan di Rel 150 kV dengan R_F 1 ohm menunjukkan bahwa arus bias lebih besar dari arus diferensial yang mana relai menghasilkan status operasi *reset* (digit 0) seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.6.2.2.1. Nilai arus diferensial (I_{dif}) terukur sebesar 0 kA dan arus bias (I_{bias}) sebesar 8,77 kA (Gambar 4.6.2.2.3). Selain itu, nilai arus yang terukur pada CT I1 sebesar 8,79 kA

$\angle -89,36^\circ$ dan arus $CT I_2$ sebesar 8,79 kA $\angle 90,64^\circ$ yang menandakan $I_1 = I_2$ (Gambar 4.6.2.2.2). Adapun Gambar 4.6.2.2.4 menampilkan tegangan yang terukur di Rel 150 kV saat terjadi gangguan di waktu 0,2 s, tegangan menurun ke 0 kV.

Secara matematis, menggunakan Persamaan (5), arus diferensial diperoleh sebagai berikut,

$$I_1 = 8,79 \angle -89,36^\circ$$

$$= 8,79 \cos(-89,36^\circ) + j 8,79 \sin(-89,36^\circ)$$

$$= 0,10 - j 8,8$$

$$I_2 = 8,79 \angle 90,64^\circ$$

$$= 8,79 \cos(90,64^\circ) + j 8,79 \sin(90,64^\circ)$$

$$= -0,10 + j 8,8$$

$$I_{dif} = 0 + 0$$

$$= 0 \text{ kA}$$

Selanjutnya, menggunakan Persamaan (6), arus bias diperoleh sebagai berikut,

$$I_{bias} = \frac{8,79}{2} + \frac{8,79}{2}$$

$$= \frac{17,58}{2}$$

$$= 8,79 \text{ kA}$$

Dengan kondisi tersebut ($I_{bias} = 8,79 \text{ kA}$) digunakan Persamaan (4), maka diperoleh persamaan di bawah ini,

Kondisi,

$$|I_{bias}| \geq I_{S2} = Break1$$

Maka,

$$|I_{dif}| > [K2 \cdot I_{bias}] - [(K2 - K1) \times I_{S2}] + I_{S1}$$

$$|I_{dif}| > [Slope2 \cdot I_{bias}] - [(Slope2 - Slope1) \times Break1] + I_p$$

Bagian kanan dari pertaksamaan di atas adalah,

$$\begin{aligned} &= [0,8 \times 8,79] - (0,8 - 0,1) \times 2,687 + 0,2337 \\ &= [7,03] - (0,7) \times 2,687 + 0,2337 \\ &= 7,03 - 1,88 + 0,2337 \\ &= 5,15 + 0,2337 \\ &= 5,38 \text{ kA} \end{aligned}$$

Jadi, komponen momen lawan sebesar 5,38 kA. Oleh karena itu, dengan arus diferensial sebesar 0 kA, maka diperoleh, $0 \text{ kA} < 5,38 \text{ kA}$. Hal ini menyebabkan relai mengambil keputusan *reset*.

Rekapitulasi hasil simulasi gangguan eksternal dengan R_F 1 ohm di Rel 11,5 kV dan 150 kV Tello tersebut disajikan pada Tabel 4.6.1 dan hasil perhitungan secara matematis disajikan dalam Tabel 4.6.2.

Tabel 4.6.1. Hasil Kinerja Sistem Proteksi untuk Gangguan Eksternal

Lokasi	Arus $CT I_1$ (kA)	Arus $CT I_2$ (kA)	Arus Dif. (kA)	Arus Bias (kA)	Respons Relai	Status Relai	Keterangan
Rel 11,5 kV	16,03 $\angle -80,4^\circ$	16,03 $\angle 99,5^\circ$	≈ 0	16,03	<i>Reset</i>	✓	Sesuai Standar
Rel 150 kV	8,79 $\angle -89,3^\circ$	8,79 $\angle 90,6^\circ$	≈ 0	8,77	<i>Reset</i>	✓	Sesuai Standar

Tabel 4.6.2. Hasil Perhitungan Secara Matematis untuk Gangguan Eksternal

Lokasi	Arus Diferensial (kA)	Arus Bias (kA)	Kondisi	Respons Relai
Rel 11,5 kV	0	16,03	$I_{dif} < I_{bias}$	<i>Reset</i>
Rel 150 kV	0	8,79	$I_{dif} < I_{bias}$	<i>Reset</i>

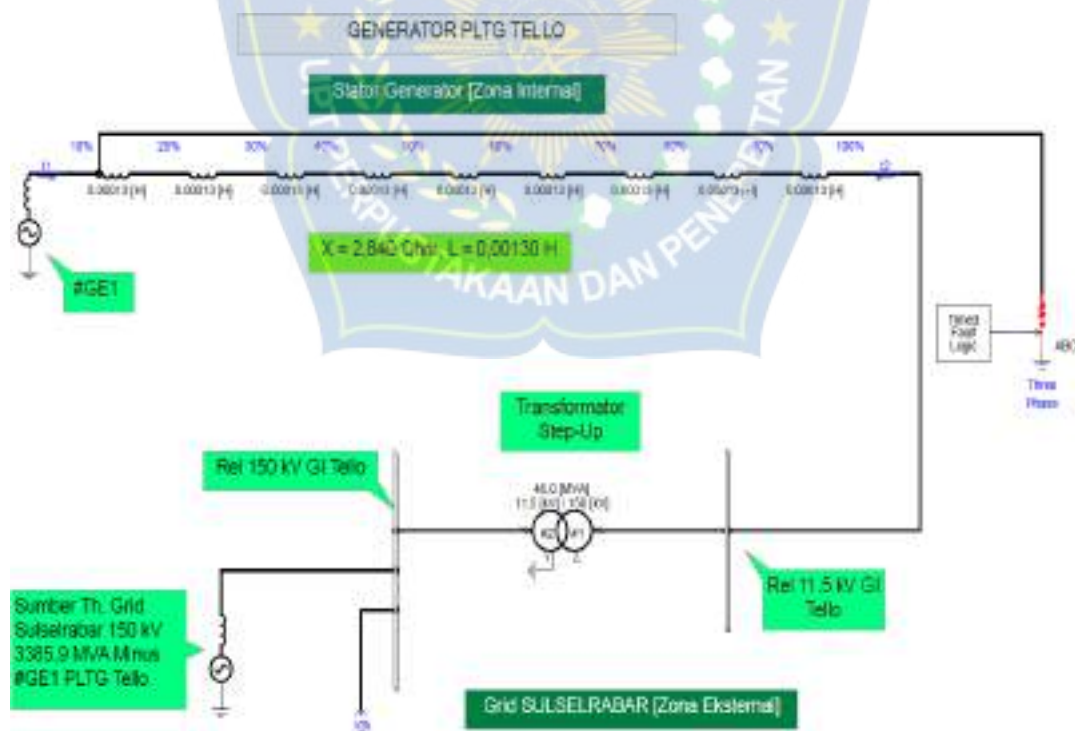
4.7 Model PSCAD dan Hasil Simulasi Gangguan Internal

Model dan simulasi gangguan internal pada belitan stator Generator #GE1 PLTG Tello dilakukan pada titik 10, 20, ... 100% dari netral. Tiga di antara itu yakni 10%, 50%, dan 100% diperlihatkan di bagian pembahasan, sementara selainnya ditampilkan di bagian lampiran, yakni Lampiran A.

4.7.1 Gangguan Internal di Titik 10%

4.7.1.1 Model PSCAD

Gambar 4.7.1.1.1 menunjukkan model PSCAD sistem daya yang mana sistem Generator #GE1 PLTG Tello terhubung ke sistem Grid Sulselrabar dalam kondisi gangguan internal di titik 10% dari netral Generator #GE1.



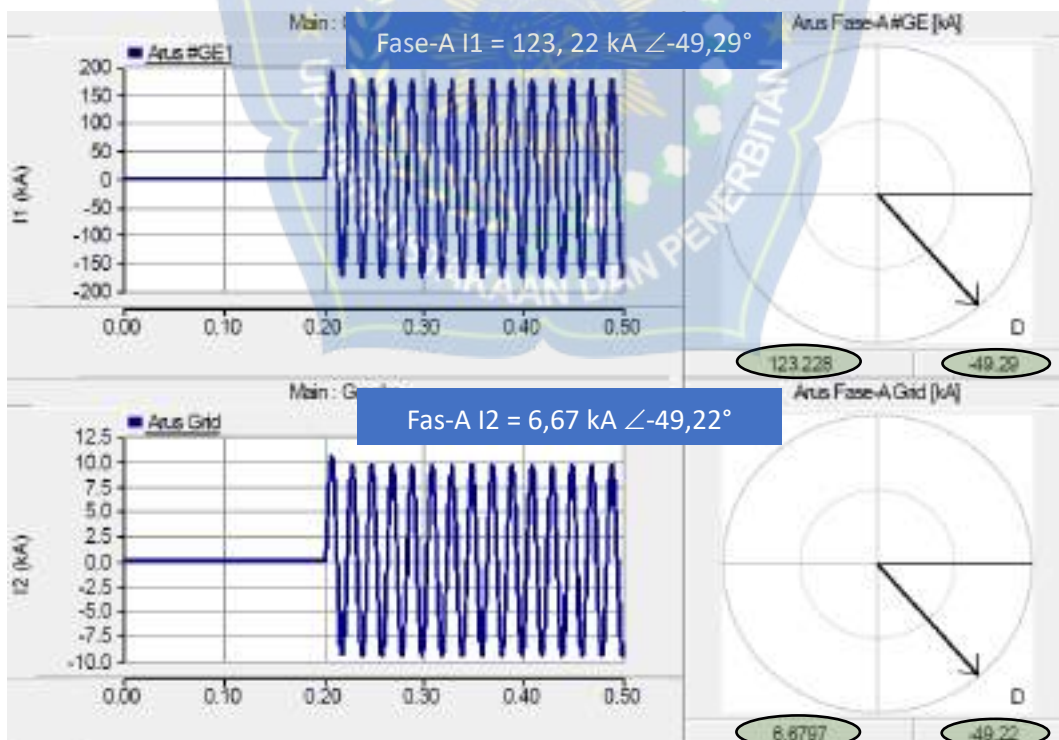
Gambar 4.7.1.1.1, Model PSCAD untuk Generator #GE1 PLTG Tello yang Terhubung ke Grid Sulselrabar pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 10%

4.7.1.2 Hasil simulasi

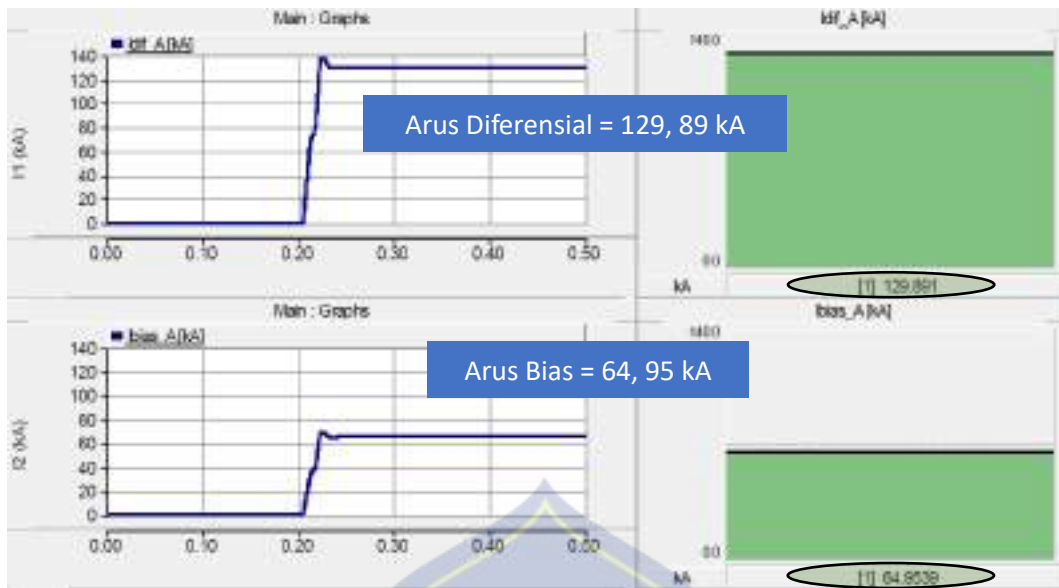
Gangguan disimulasikan di titik 10% dari netral Generator #GE1 dengan resistans gangguan (R_F) 1 Ohm. Gangguan terjadi diatur pada waktu 0,2 s. *Display* hasil simulasi gangguan ditampilkan sebagai berikut:



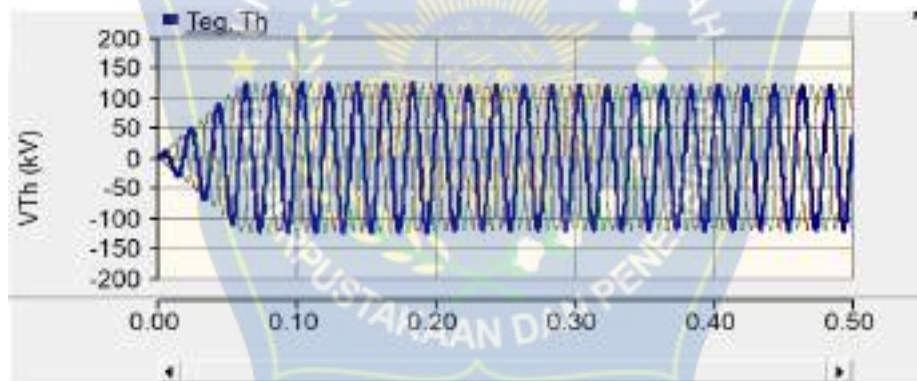
Gambar 4.7.1.2.1. *Display* Numeris dan Grafis pada Kondisi Gangguan Internal di titik 10%



Gambar 4.7.1.2.2. *Display* Grafik Arus Domain Waktu dan Grafik Arus Domain Fasor Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 10%



Gambar 4.7.1.2.3. Display Grafik, Numeris Arus Diferensial dan Arus Bias Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 10%



Gambar 4.7.1.2.4 Display Grafik Tegangan Domain Waktu di Rel 150 kV pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 10%

Hasil simulasi gangguan di titik 10% dengan R_F 1 ohm menunjukkan bahwa arus diferensial lebih besar dari arus bias yang mana relai menghasilkan status operasi *pickup* (digit 1) dan waktu respons relai terlihat yang mana relai aktif sesaat atau bersamaan setelah gangguan terjadi pada waktu 0,2 s (secara teoritis waktu operasi relai diferensial adalah instan atau nol detik), seperti yang ditampilkan pada

Gambar 4.7.1.2.1. Nilai arus diferensial (I_{dif}) terukur sebesar 129,89 kA dan arus bias (I_{bias}) sebesar 64,95 kA (Gambar 4.7.1.2.3). Selain itu, nilai arus yang terukur pada $CT I_1$ (#GE1) sebesar 123,22 kA $\angle -49,29^\circ$ dan arus $CT I_2$ (*Grid*) sebesar 6,67 kA $\angle -49,22^\circ$ yang menandakan $I_1 \neq I_2$ (Gambar 4.7.1.2.2). Adapun Gambar 4.7.1.2.4 menampilkan tegangan yang terukur di Rel 150 kV saat terjadi gangguan pada waktu 0,2 s, tegangan tidak mengalami perubahan.

Secara matematis, menggunakan Persamaan (5), arus diferensial diperoleh sebagai berikut,

$$\begin{aligned}
 I_1 &= 123,22 \angle -49,29^\circ \\
 &= 123,22 \cos(-49,29^\circ) + j 123,22 \sin(-49,29^\circ) \\
 &= 80,36 - j 93,40 \\
 I_2 &= 6,67 \angle -49,22^\circ \\
 &= 6,67 \cos(-49,22^\circ) + j 6,67 \sin(-49,22^\circ) \\
 &= 4,35 - j 5,05 \\
 I_{dif} &= 84,71 - j 98,45 \\
 I_{dif} &= \sqrt{(84,71)^2 + (98,45)^2} \\
 &= \sqrt{7175 + 9692} \\
 &= \sqrt{16867} \\
 &= 129,87 \text{ kA}
 \end{aligned}$$

Selanjutnya, menggunakan Persamaan (6), arus bias diperoleh sebagai berikut,

$$\begin{aligned}
 I_{bias} &= \frac{I_1 + I_2}{2} \\
 &= \frac{123,22}{2} + \frac{6,67}{2} \\
 &= \frac{129,89}{2} \\
 &= 64,94 \text{ kA}
 \end{aligned}$$

Dengan kondisi tersebut ($I_{bias} = 64,94 \text{ kA}$) digunakan Persamaan (4), maka diperoleh persamaan di bawah ini,

Kondisi,

$$|I_{bias}| > I_{S2} = Break1$$

Maka,

$$|I_{dif}| > [K2 \cdot I_{bias}] - [(K2 - K1) \times I_{S2}] + I_{S1}$$

$$|I_{dif}| > [Slope2 \cdot I_{bias}] - [(Slope2 - Slope1) \times Break1] + I_p$$

Bagian kanan dari pertaksamaan di atas adalah,

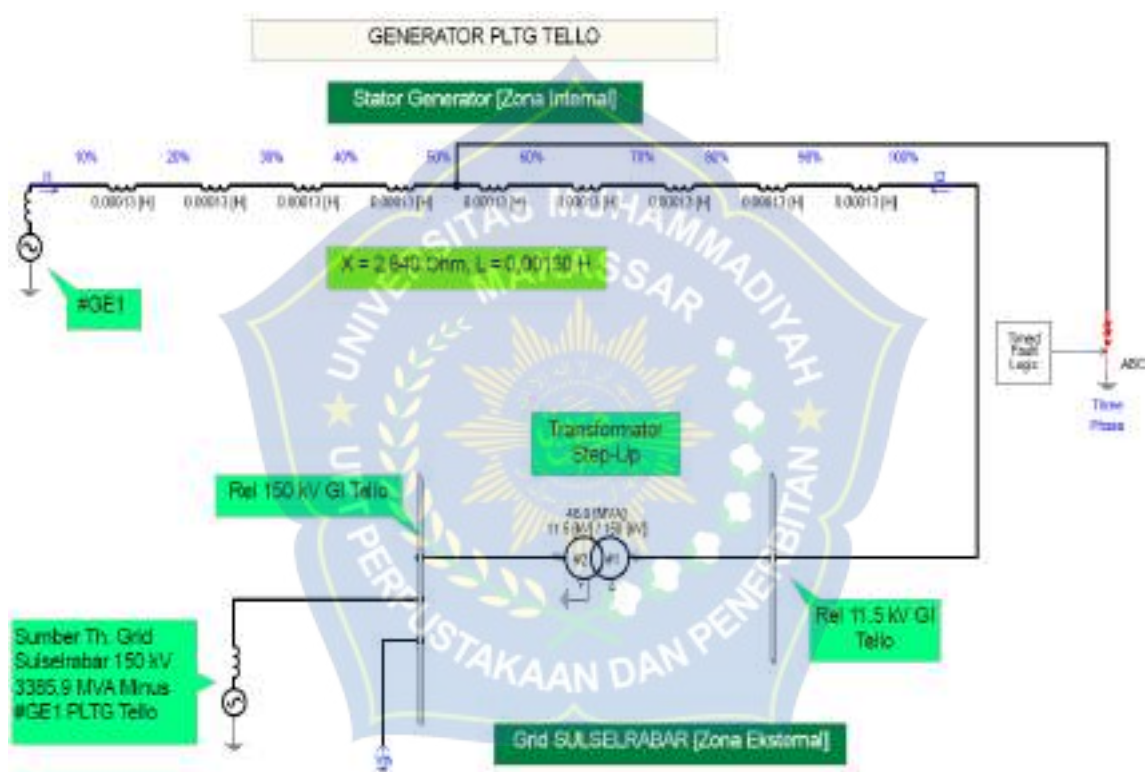
$$\begin{aligned}
 &= [0,8 \times 64,94] - (0,8 - 0,1) \times 2,687 + 0,2337 \\
 &= [51,95] - (0,7) \times 2,687 + 0,2337 \\
 &= 51,95 - 1,88 + 0,2337 \\
 &= 50,07 + 0,2337 \\
 &= 50,30 \text{ kA}
 \end{aligned}$$

Jadi, komponen momen lawan sebesar 50,30 kA. Oleh karena itu, dengan arus diferensial sebesar 129,87 kA, maka diperoleh, $129,87 \text{ kA} > 50,30 \text{ kA}$. Hal ini menyebabkan relai mengambil keputusan *pickup*.

4.7.2 Gangguan Internal di Titik 50%

4.7.2.1 Model PSCAD

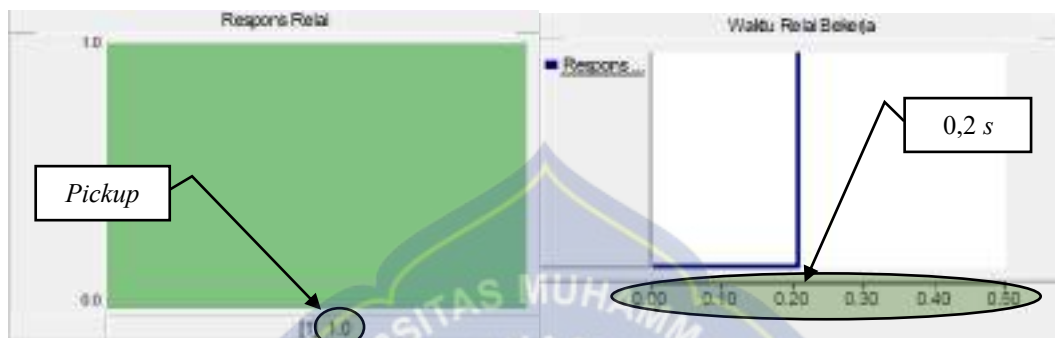
Gambar 4.7.2.1.1 menunjukkan model PSCAD sistem daya yang mana sistem Generator #GE1 PLTG Tello terhubung ke sistem *Grid* Sulselrabar dalam kondisi gangguan internal di titik 50% dari netral Generator #GE1.



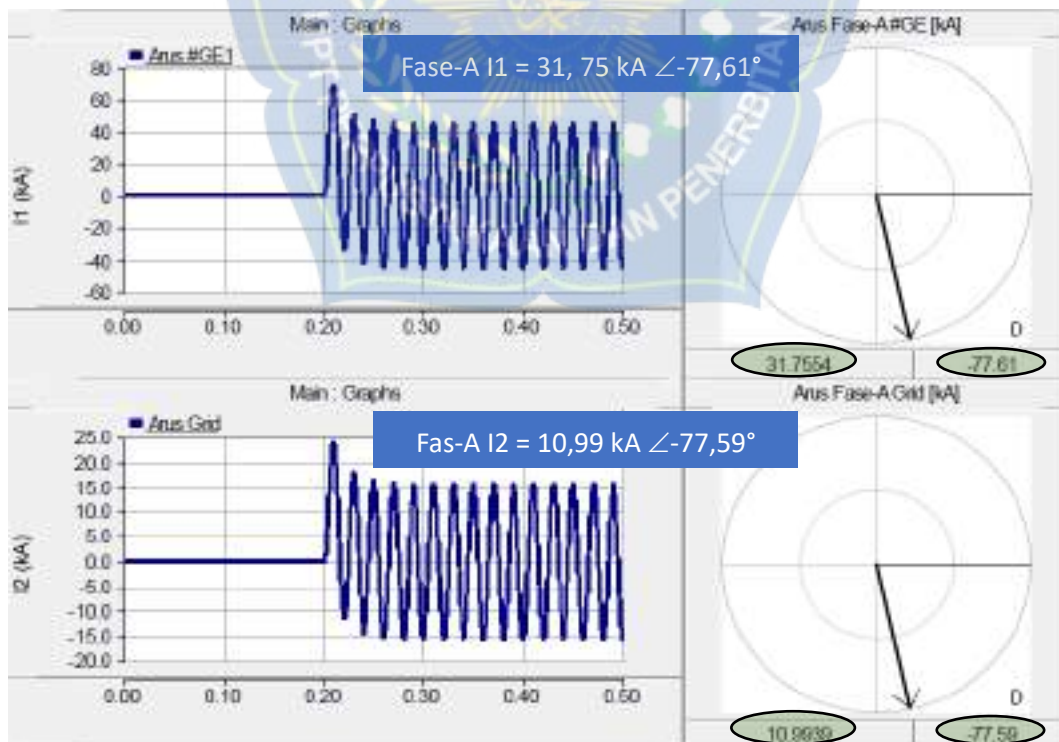
Gambar 4.7.2.1.1. Model PSCAD untuk Generator #GE1 PLTG Tello yang Terhubung ke Grid Sulselrabar pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 50%

4.7.2.2 Hasil simulasi

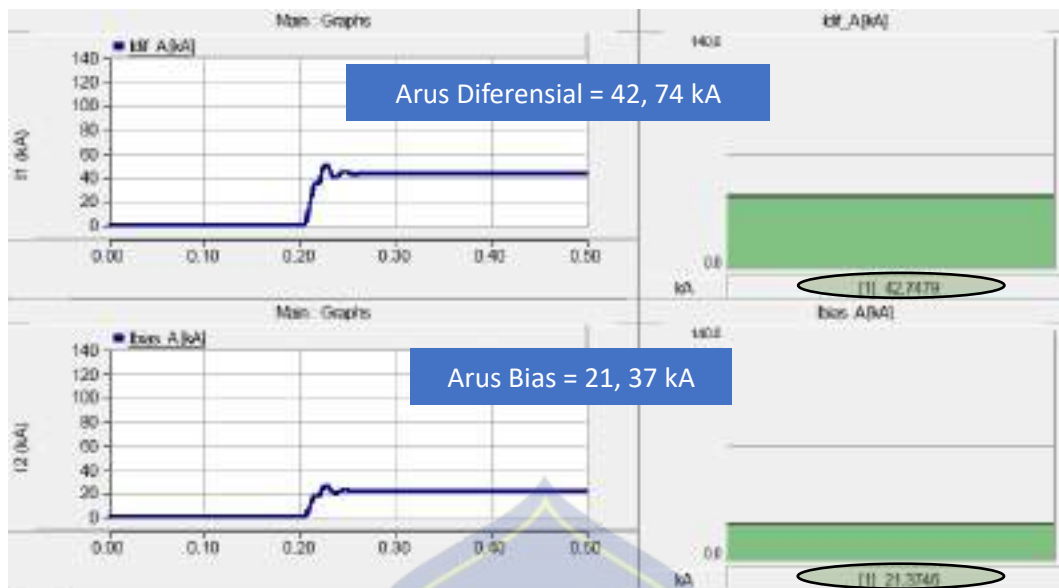
Gangguan disimulasikan di titik 50% dari netral Generator #GE1 dengan resistans gangguan (R_F) 1 Ohm. Gangguan terjadi diatur pada waktu 0,2 s. *Display* hasil simulasi gangguan ditampilkan sebagai berikut:



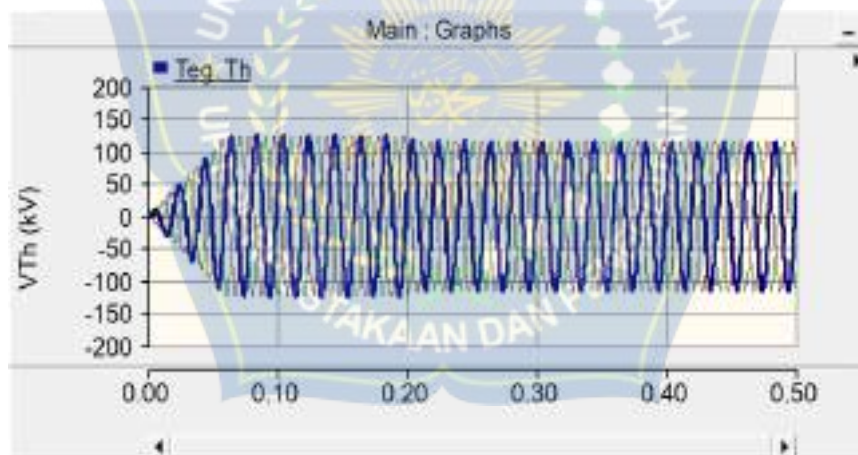
Gambar 4.7.2.2.1. *Display* Numeris dan Grafis pada Kondisi Gangguan Internal di titik 50%



Gambar 4.7.2.2.2 *Display* Grafik Arus Domain Waktu dan Grafik Arus Domain Fasor Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 50%



Gambar 4.7.2.2.3. Display Grafik, Numeris Arus Diferensial dan Arus Bias Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 50%



Gambar 4.7.2.2.4. Display Grafik Tegangan Domain Waktu di Rel 150 kV pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 50%

Hasil simulasi gangguan di titik 50% dengan R_F 1 ohm menunjukkan bahwa arus diferensial lebih besar dari arus bias yang mana relai menghasilkan status operasi *pickup* (digit 1) dan waktu respons relai terlihat yang mana relai aktif sesaat atau bersamaan setelah gangguan terjadi pada waktu 0,2 s, seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.7.2.2.1. Nilai arus diferensial (I_{dif}) terukur sebesar 42,74 kA dan

arus bias (I_{bias}) sebesar 21,37 kA (Gambar 4.7.2.2.3). Selain itu, nilai arus yang terukur pada CTI_1 (#GE1) sebesar 31,75 kA $\angle -77,61^\circ$ dan arus CTI_2 (*Grid*) sebesar 10,99 kA $\angle -77,59^\circ$ yang menandakan $I_1 \neq I_2$ (Gambar 4.7.2.2.2). Adapun Gambar 4.7.2.2.4 menampilkan tegangan yang terukur di Rel 150 kV saat terjadi gangguan pada waktu 0,2 s, tegangan mengalami sedikit penurunan.

Secara matematis, menggunakan Persamaan (5), arus diferensial diperoleh sebagai berikut,

$$\begin{aligned}
 I_1 &= 31,75 \angle -77,61^\circ \\
 &= 31,75 \cos(-77,61^\circ) + j 31,75 \sin(-77,61^\circ) \\
 &= 6,81 - j 31,01 \\
 I_2 &= 10,99 \angle -77,59^\circ \\
 &= 10,99 \cos(-77,59^\circ) + j 10,99 \sin(-77,59^\circ) \\
 &= 2,36 - j 10,73 \\
 I_{dif} &= 9,17 - j 41,74 \\
 I_{dif} &= \sqrt{(9,17)^2 + (41,74)^2} \\
 &= \sqrt{84,08 + 1742} \\
 &= \sqrt{1826} \\
 &= 42,73 \text{ kA}
 \end{aligned}$$

Selanjutnya, menggunakan Persamaan (6), arus bias diperoleh sebagai berikut,

$$\begin{aligned} I_{bias} &= \frac{31,75}{2} + \frac{10,99}{2} \\ &= \frac{42,74}{2} \\ &= 21,37 \text{ kA} \end{aligned}$$

Dengan kondisi tersebut ($I_{bias} = 21,37 \text{ kA}$) digunakan Persamaan (4), maka diperoleh persamaan di bawah ini,

Kondisi,

$$|I_{bias}| \geq I_{S2} = Break1$$

Maka,

$$|I_{dif}| \geq [K2 \cdot I_{bias}] - [(K2 - K1) \times I_{S2}] + I_{S1}$$

$$|I_{dif}| \geq [Slope2 \cdot I_{bias}] - [(Slope2 - Slope1) \times Break1] + I_p$$

Bagian kanan dari pertaksamaan di atas adalah,

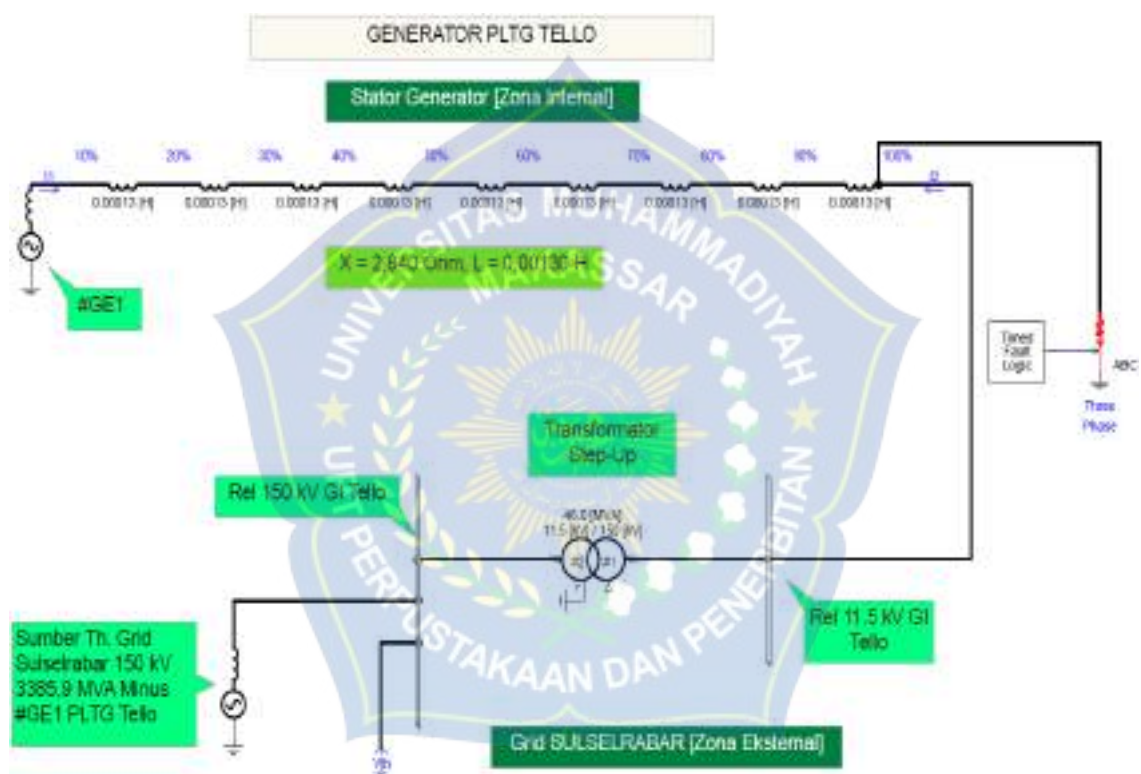
$$\begin{aligned} &= [0,8 \times 21,37] - (0,8 - 0,1) \times 2,687 + 0,2337 \\ &= [17,10] - (0,7) \times 2,687 + 0,2337 \\ &= 17,10 - 1,88 + 0,2337 \\ &= 15,22 + 0,2337 \\ &= 15,45 \text{ kA} \end{aligned}$$

Jadi, komponen momen lawan sebesar 15,45 kA. Oleh karena itu, dengan arus diferensial sebesar 42,73 kA, maka diperoleh, $42,73 \text{ kA} > 15,45 \text{ kA}$. Hal ini menyebabkan relai mengambil keputusan *pickup*.

4.7.3 Gangguan Internal di Titik 100%

4.7.3.1 Model PSCAD

Gambar 4.7.3.1.1 menunjukkan model PSCAD sistem daya yang mana sistem Generator #GE1 PLTG Tello terhubung ke sistem *Grid* Sulselrabar dalam kondisi gangguan internal di titik 100% dari netral Generator #GE1.



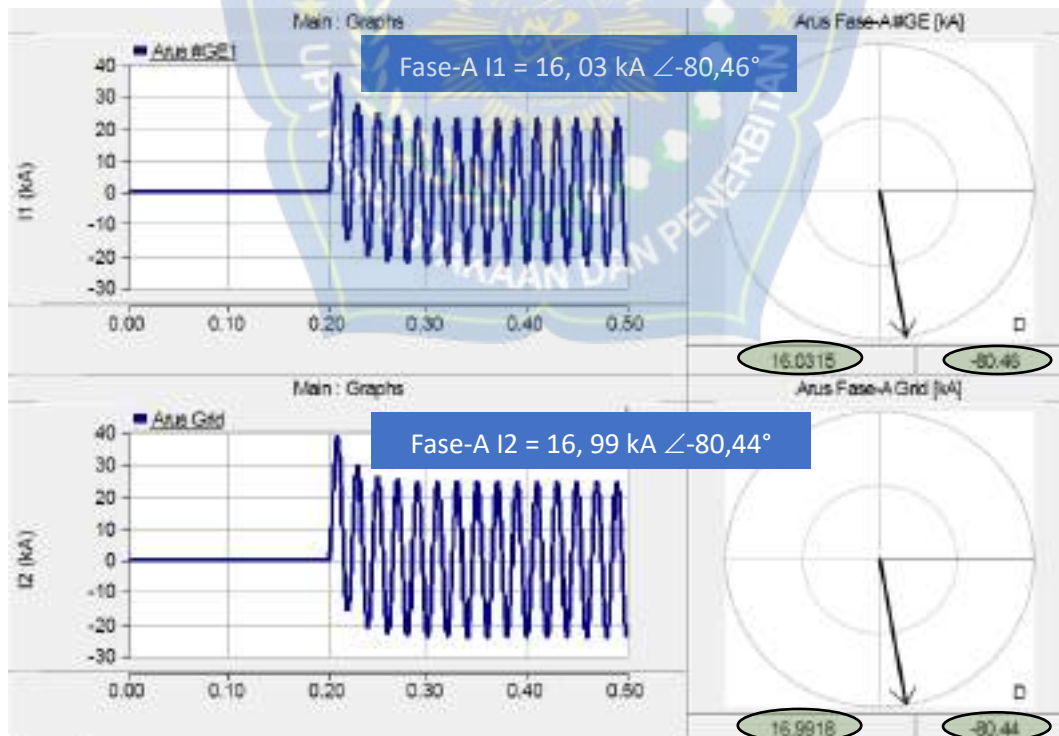
Gambar 4.7.3.1.1. Model PSCAD untuk Generator #GE1 PLTG Tello yang Terhubung ke Grid Sulselrabar pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 100%

4.7.3.2 Hasil simulasi

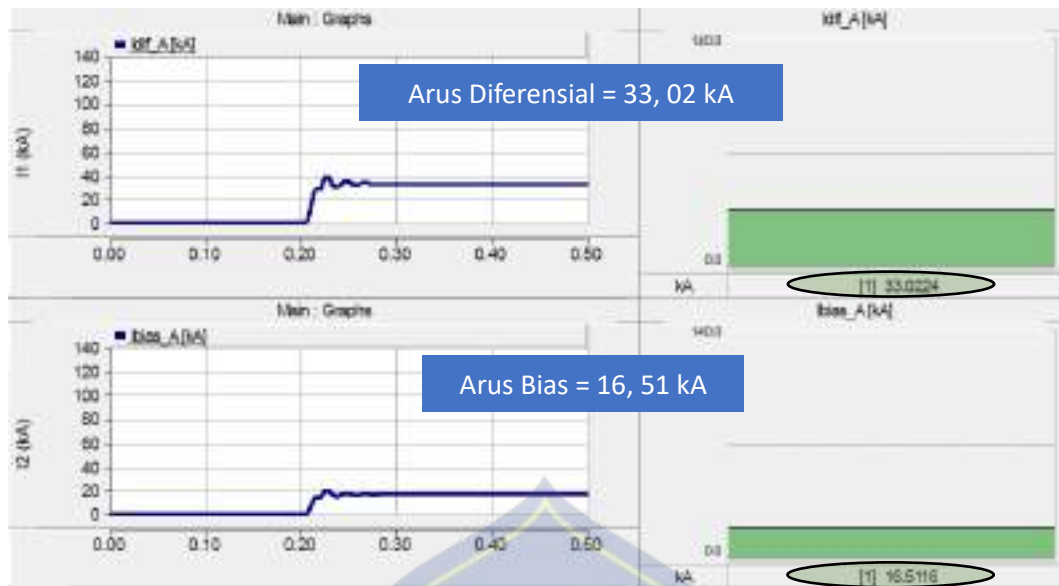
Gangguan disimulasikan di titik 100% dari netral Generator #GE1 dengan resistans gangguan (R_F) 1 Ohm. Gangguan terjadi diatur pada waktu 0,2 s. *Display* hasil simulasi gangguan ditampilkan sebagai berikut:



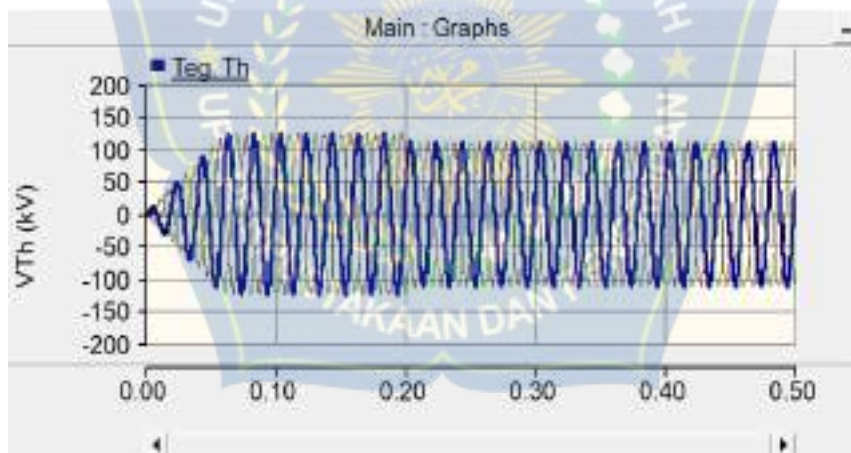
Gambar 4.7.3.2.1. *Display* Numeris dan Grafis pada Kondisi Gangguan Internal di titik 100%



Gambar 4.7.3.2.2. *Display* Grafik Arus Domain Waktu dan Grafik Arus Domain Fasor Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 100%



Gambar 4.7.3.2.3. Display Grafik, Numeris Arus Diferensial dan Arus Bias Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 100%



Gambar 4.7.3.2.4 Display Grafik Tegangan Domain Waktu di Rel 150 kV pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 100%

Hasil simulasi gangguan di titik 100% dengan R_F 1 ohm menunjukkan bahwa arus diferensial lebih besar dari arus bias yang mana relai menghasilkan status operasi *pickup* (digit 1) dan waktu respons relai terlihat yang mana relai aktif sesaat atau bersamaan setelah gangguan terjadi pada waktu 0,2 s, seperti yang ditampilkan

pada Gambar 4.7.3.2.1. Nilai arus diferensial (I_{dif}) terukur sebesar 33,02 kA dan arus bias (I_{bias}) sebesar 16,51 kA (Gambar 4.7.3.2.3). Selain itu, nilai arus yang terukur pada $CT I_1$ (#GE1) sebesar 16,03 kA $\angle -80,46^\circ$ dan arus $CT I_2$ (*Grid*) sebesar 16,99 kA $\angle -80,44^\circ$ yang menandakan $I_1 \neq I_2$ (Gambar 4.7.3.2.2). Adapun Gambar 4.7.3.2.4 menampilkan tegangan yang terukur di Rel 150 kV saat terjadi gangguan pada waktu 0,2 s, tegangan mengalami sedikit penurunan.

Secara matematis, menggunakan Persamaan (5), arus diferensial diperoleh sebagai berikut,

$$\begin{aligned}
 I_1 &= 16,03 \angle -80,46^\circ \\
 &= 16,03 \cos(-80,46^\circ) + j 16,03 \sin(-80,46^\circ) \\
 &= 2,65 - j 15,80 \\
 I_2 &= 16,99 \angle -80,44^\circ \\
 &= 16,99 \cos(-80,44^\circ) + j 16,99 \sin(-80,44^\circ) \\
 &= 2,82 - j 16,75 \\
 I_{dif} &= 5,47 - j 32,55 \\
 I_{dif} &= \sqrt{(5,47)^2 + (32,55)^2} \\
 &= \sqrt{29,92 + 1059} \\
 &= \sqrt{1088} \\
 &= 33 \text{ kA}
 \end{aligned}$$

Selanjutnya, menggunakan Persamaan (6), arus bias diperoleh sebagai berikut,

$$\begin{aligned} I_{bias} &= \frac{16,03}{2} + \frac{16,99}{2} \\ &= \frac{33,02}{2} \\ &= 16,51 \text{ kA} \end{aligned}$$

Dengan kondisi tersebut ($I_{bias} = 16,51 \text{ kA}$) digunakan Persamaan (4), maka diperoleh persamaan di bawah ini,

Kondisi,

$$| I_{bias} | > I_{S2} = Break1$$

Maka,

$$| I_{dif} | > [K2 \cdot I_{bias}] - [(K2 - K1) \times I_{S2}] + I_{S1}$$

$$| I_{dif} | > [Slope2 \cdot I_{bias}] - [(Slope2 - Slope1) \times Break1] + I_p$$

Bagian kanan dari pertaksamaan di atas adalah,

$$\begin{aligned} &= [0,8 \times 16,51] - (0,8 - 0,1) \times 2,687 + 0,2337 \\ &= [13,21] - (0,7) \times 2,687 + 0,2337 \\ &= 13,21 - 1,88 + 0,2337 \\ &= 11,33 + 0,2337 \\ &= 11,56 \text{ kA} \end{aligned}$$

Jadi, komponen momen lawan sebesar 11,56 kA. Oleh karena itu, dengan arus diferensial sebesar 33 kA, maka diperoleh, $33 \text{ kA} > 11,56 \text{ kA}$. Hal ini menyebabkan relai mengambil keputusan *pickup*.

Rekapitulasi hasil simulasi gangguan internal dengan R_F 1 ohm di titik 10, 20 ... 100% dari netral Generator #GE1 PLTG Tello, disajikan pada Tabel 4.7.1 dan hasil perhitungan secara matematis untuk gangguan di titik 10%, 50%, dan 100% disajikan dalam Tabel 4.7.2.

Tabel 4.7.1. Hasil Kinerja Sistem Proteksi untuk Gangguan Internal

Lokasi	Arus CT I ₁ #GE1 (kA)	Arus CT I ₂ Grid (kA)	Arus Dif. (kA)	Arus Bias (kA)	Respons Relai	Status Relai	Keterangan
10%	123,22 ∠-49,2°	6,67 ∠49,2°	129,89	64,95	<i>Pickup</i>	✓	Sesuai Standar
20%	73,98 ∠-65,5°	8,48 ∠-65,5°	82,46	41,23	<i>Pickup</i>	✓	Sesuai Standar
30%	51,58 ∠-72,1°	9,41 ∠-72,1°	60,99	30,49	<i>Pickup</i>	✓	Sesuai Standar
40%	39,36 ∠-75,5°	10,19 ∠-75,5°	49,55	24,77	<i>Pickup</i>	✓	Sesuai Standar
50%	31,75 ∠-77,6°	10,99 ∠-77,5°	42,74	21,37	<i>Pickup</i>	✓	Sesuai Standar
60%	26,58 ∠-78,8°	11,86 ∠-78,8°	38,45	19,22	<i>Pickup</i>	✓	Sesuai Standar
70%	22,84 ∠-79,6°	12,85 ∠-79,6°	35,70	17,85	<i>Pickup</i>	✓	Sesuai Standar
80%	20,02 ∠-80,1°	14,00 ∠-80,1°	34,02	17,01	<i>Pickup</i>	✓	Sesuai Standar
90%	17,81 ∠-80,4°	15,35 ∠-80,4°	33,16	16,58	<i>Pickup</i>	✓	Sesuai Standar

100%	16,03 $\angle -80,4^\circ$	16,99 $\angle -80,4^\circ$	33,02	16,51	<i>Pickup</i>	✓	Sesuai Standar
------	-------------------------------	-------------------------------	-------	-------	---------------	---	----------------

Tabel 4.7.2. Hasil Perhitungan Secara Matematis untuk Gangguan Internal

Lokasi	Arus Diferensial (kA)	Arus Bias (kA)	Kondisi	Respons Relai
10%	129,87	64,94	$I_{dif} > I_{bias}$	<i>Pickup</i>
50%	42,73	21,37	$I_{dif} > I_{bias}$	<i>Pickup</i>
100%	33	16,51	$I_{dif} > I_{bias}$	<i>Pickup</i>

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan hasil simulasi yang telah dilakukan, disimpulkan:

1. Model relai diferensial terdiri atas 2 sensor arus, 2 frekuensi *scanner*, algoritma relai diferensial *Dual Slope*, prosesor arus diferensial dan prosesor arus bias, serta tampilan *display*. Sementara itu, setelan karakteristik untuk relai menggunakan karakteristik dua kemiringan (*Dual Slope*) yakni: arus *pickup* sebesar 0,2337 kA, dengan sudut kemiringan pertama (*Slope1*) sebesar $5,71^\circ$, dan arus *Break1* ($=Break2$) sebesar 2,687 kA, dengan sudut kemiringan kedua (*Slope2*) sebesar $38,66^\circ$.
2. Relai diferensial (87G) #GE1, menunjukkan kinerja yang akurat terhadap seluruh kasus gangguan simetris (Tiga-Fase) yang disimulasikan baik saat terjadi gangguan internal maupun eksternal. Relai memberikan respons *pickup* saat terjadi gangguan di titik 10, 20 ... 100% dari netral Generator #GE1 PLTG Tello dan sebaliknya, respons *reset* saat terjadi gangguan di Rel 11,5 kV dan 150 kV GI Tello.

5.2 Saran

Berhubung penelitian ini hanya membahas gangguan Hubung-Singkat simetris (Tiga-Fase) terhadap kinerja relai diferensial, maka disarankan pada penelitian selanjutnya untuk mengaji gangguan fase ke tanah. Hal ini penting guna memberikan pemahaman yang lebih menyeluruh terhadap respons relai diferensial terhadap berbagai jenis gangguan yang mungkin terjadi pada sistem generator.



DAFTAR PUSTAKA

- Faharuddin, A. (2002). *ANALISIS GANGGUAN SIMETRIS DENGAN MENGGUNAKAN METODE MVA HUBUNG-SINGKAT (MVA SC)*. 2, 1–7.
- Hardi, S., Adam, M., & Arisandy, I. (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.
- Ibrahim T.H, Kamil M, Al Doori W.H, A, Al-Sammarraie A.T, B. F. (2019). Study of the performance of the gas turbine power plants from the simple to complex cycle: A technical review. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 57(2), 228–250.
- Le, K. H., & Vu, P. H. (2019). Performance Evaluation of a Generator Differential Protection Function for a Numerical Relay. *Engineering, Technology and Applied Science Research*, 9(4), 4342–4348.
<https://doi.org/10.48084/etasr.2754>
- Liu, J. E. (2004). A Pscad/Emtdc Based Simulation Study Of Protective Relay. *Developments in Power System Protection, 2004. Eighth IEE International Conference On*, 264–267.
- Mardensyah, A. (2008). *Studi Perencanaan Koordinasi*. Depok: FT UI.
- Nabilah, V., & Marpaung, R. S. (2022). Analisis Pengaruh Pemeliharaan Komponen PLTG Terhadap Unjuk Kerja Turbin Gas PT PLN UPDK Belawan. *Konferensi Nasional Sosial Dan Engineering Politeknik Negeri Medan*, 1047–1055.
- PLN. (2025a). *IMPEDANS SUMBER DAN DATA HUBUNG SINGKAT GARDU INDUK TERSEBAR SISTEM SULBAGSEL-UIP3B SULAWESI*.
- PLN. (2025b). *PT.PLN (PERSERO)UNIT INDUK PEMBANGKITAN DAN*

*PENYALURAN SULAWESI UNIT PELAKSANAN PENGENDALIAN
PEMBANGKITAN TELLO UL PLTG/U TELLO.*

Rizqi, W, Nur, S. (2021). Simulasi Proteksi Transformator Daya Dengan Relai Diferensial Dual-Bias Presentase Menggunakan Perangkat Lunak Pscad. *Vertex Elektro*, 13(01), 25–29.

Sitajasa, H. (2013). Pengujian Relay Differensial Gi. *EKSERGI Jurnal Teknik Energi*, 9(2), 74–79.

Solutions, G. E. G. (2017). *G60 GENERATOR PROTECTION SYSTEM* (Version 7.). GE Multilin inc.
<https://www.gegridsolutions.com/multilin/catalog/g60.htm>

Suripto, S. (2017). *Sistem tenaga listrik*. Yogyakarta: LP3M UMY.

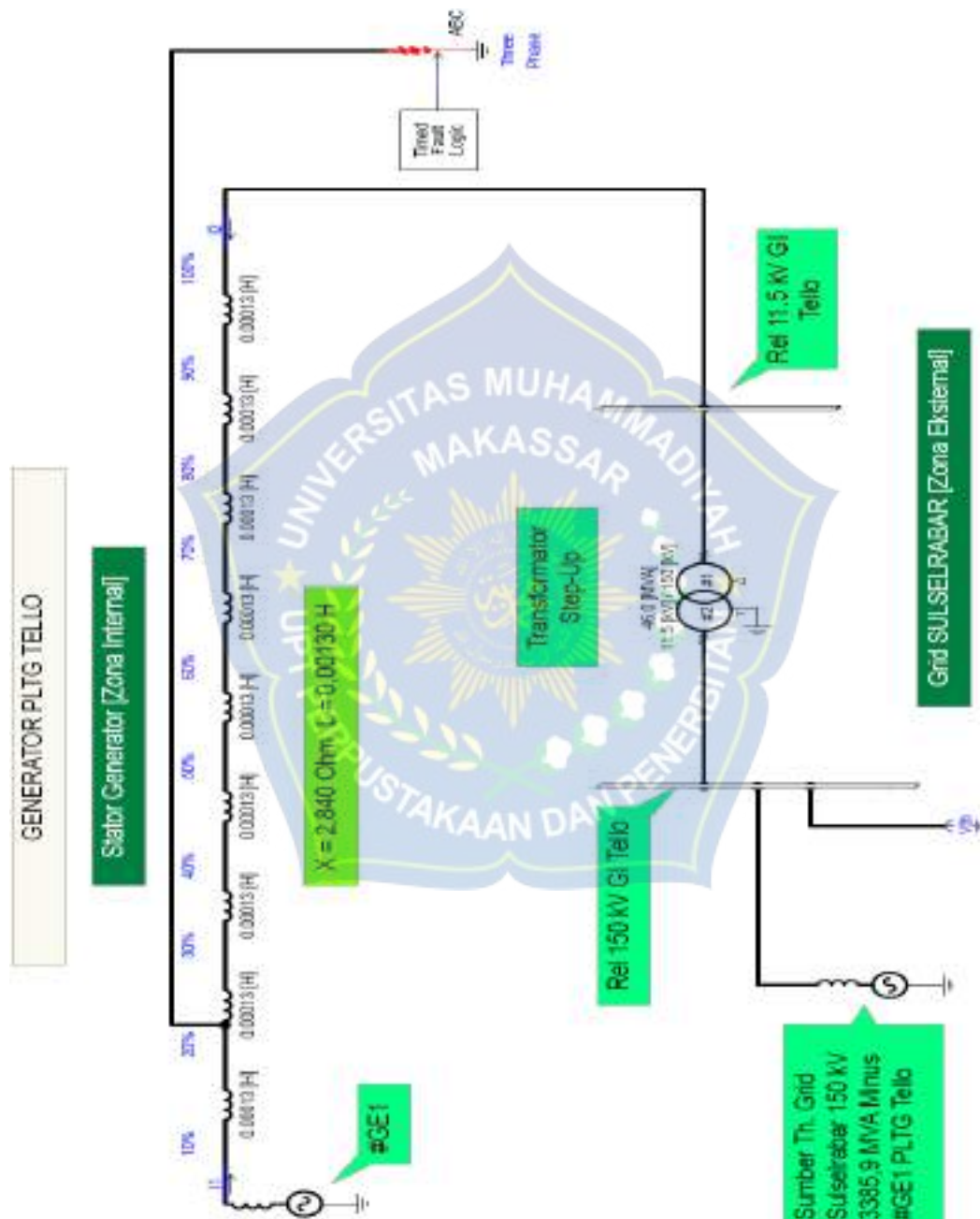
Tasiam F.J. (2012). Proteksi Sistem Tenaga Listrik. *Teknosain*, 105–197.

Verson, T. (2018). *Modul 01 Dasar Pengukuran*. 1–2.

LAMPIRAN A
MODEL *PSCAD* DAN HASIL SIMULASI
GANGGUAN INTRENAL

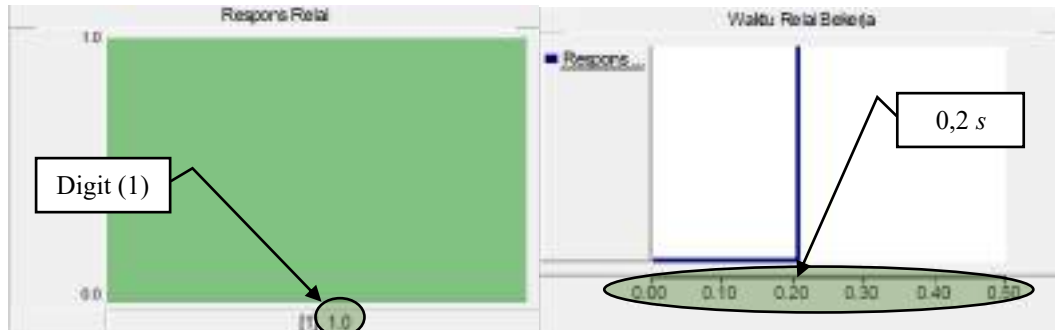
LAMPIRAN A

1. Model gangguan di titik 20%

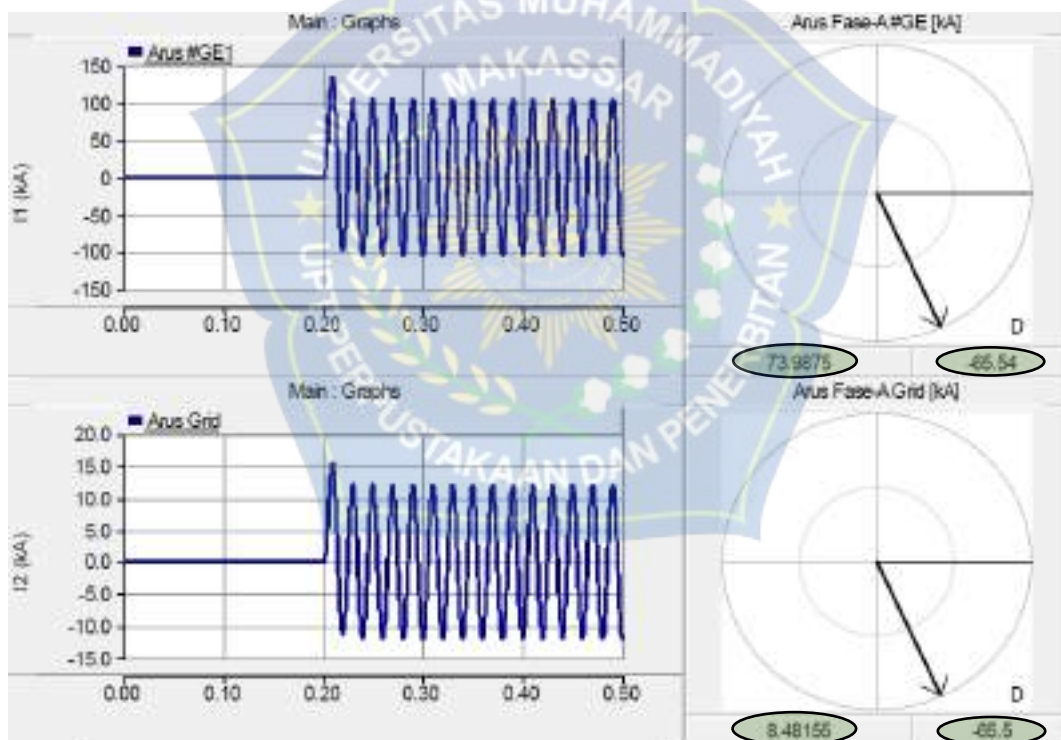


Lampiran A.1. Model *PSCAD* untuk Generator #GE1 PLTG Tello yang Terhubung ke *Grid* Sulselrabar pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 20%

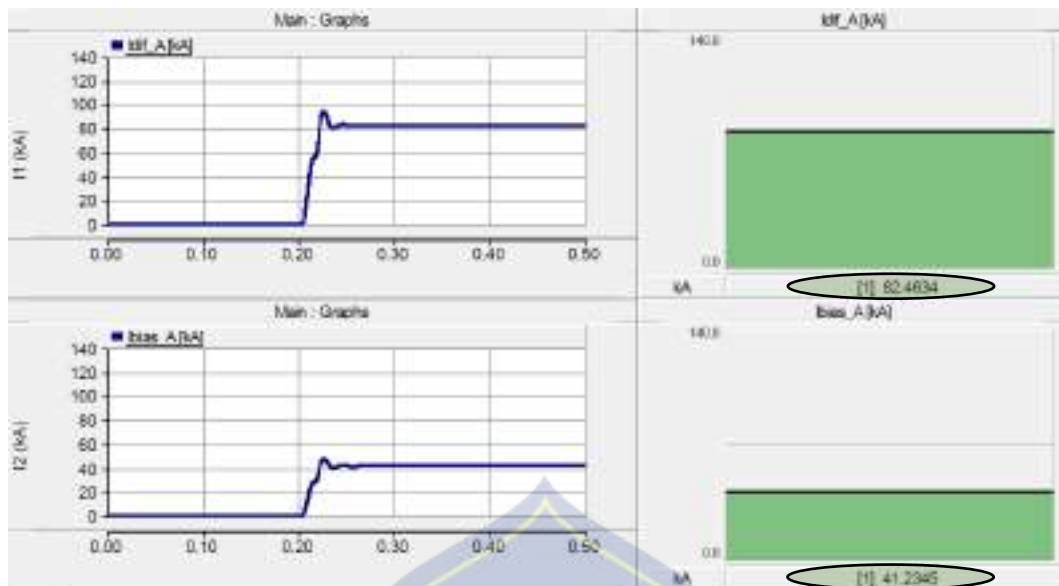
- Hasil simulasi di titik 20%



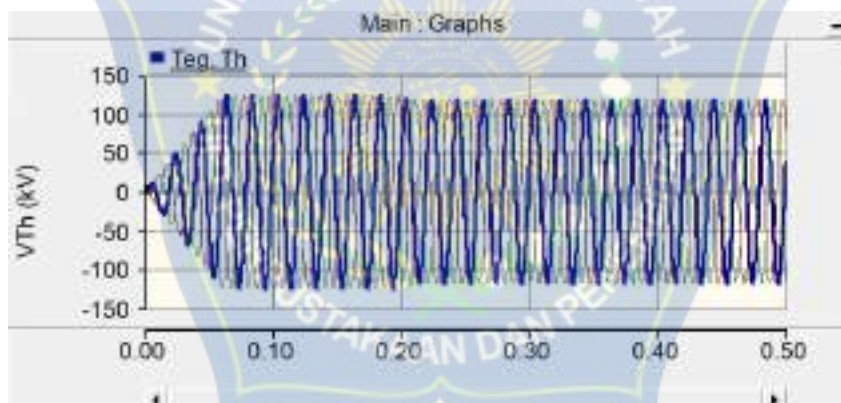
Lampiran A.2a. *Display* Numeris dan Grafis pada Kondisi Gangguan Internal di titik 20%



Lampiran A.2b. *Display* Grafik Arus Domain Waktu dan Grafik Arus Domain Fasor Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 20%

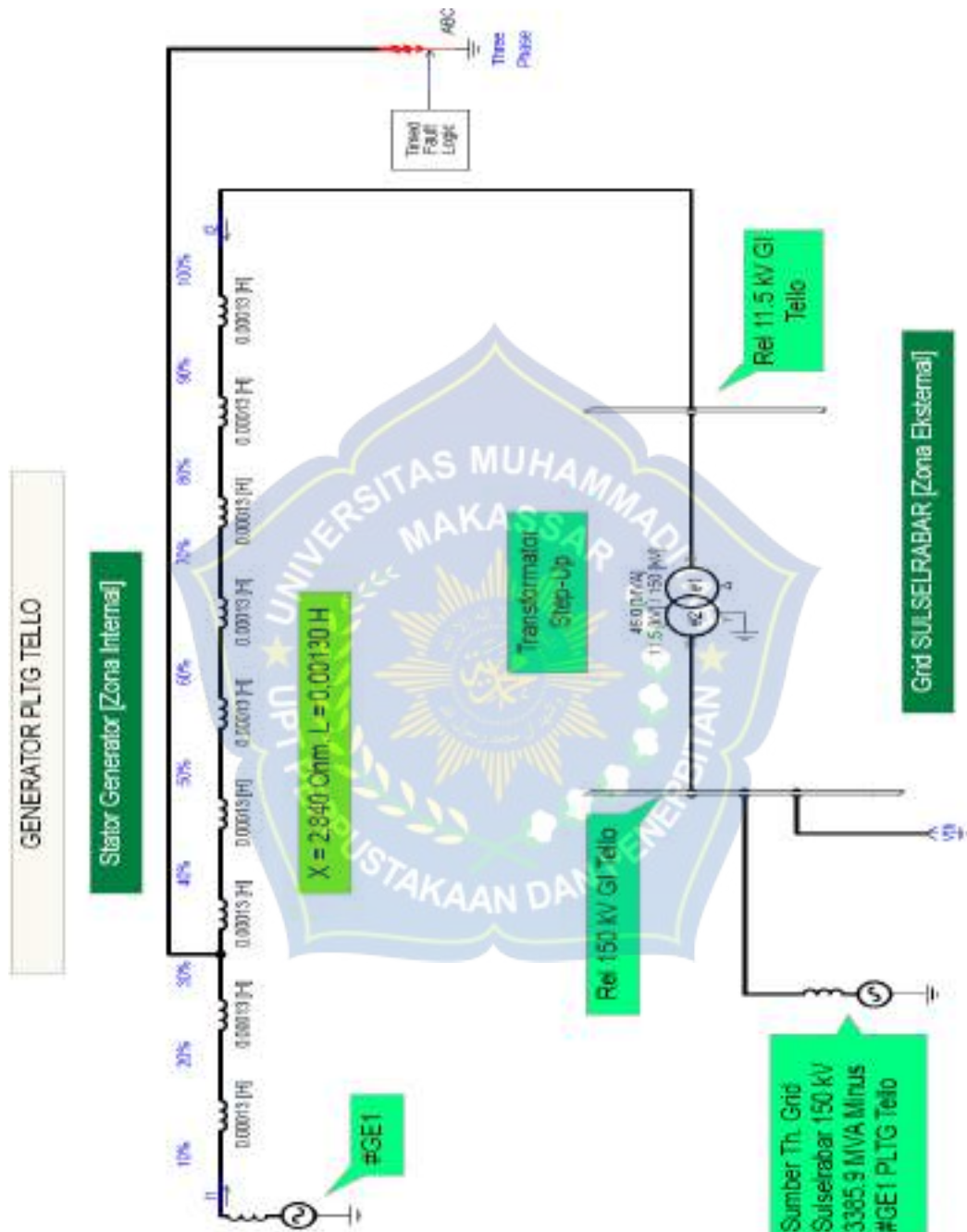


Lampiran A.2c. *Display* Grafik, Numeris Arus Diferensial dan Arus Bias Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 20%



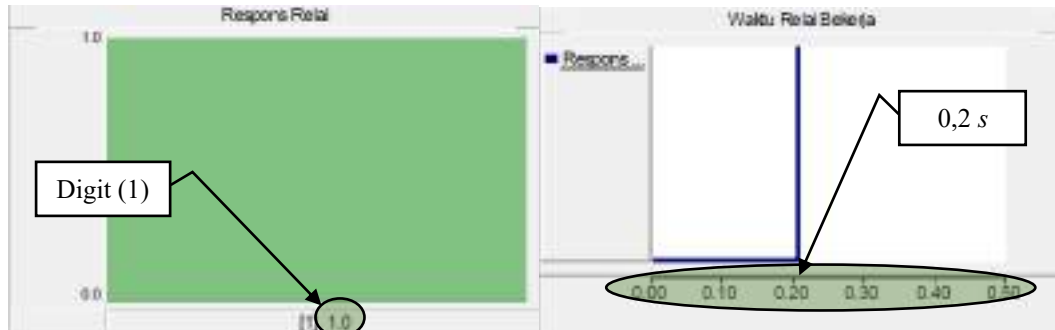
Lampiran A.2d. *Display* Grafik Tegangan Domain Waktu di Rel 150 kV pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 20%

2. Model Gangguan di titik 30%

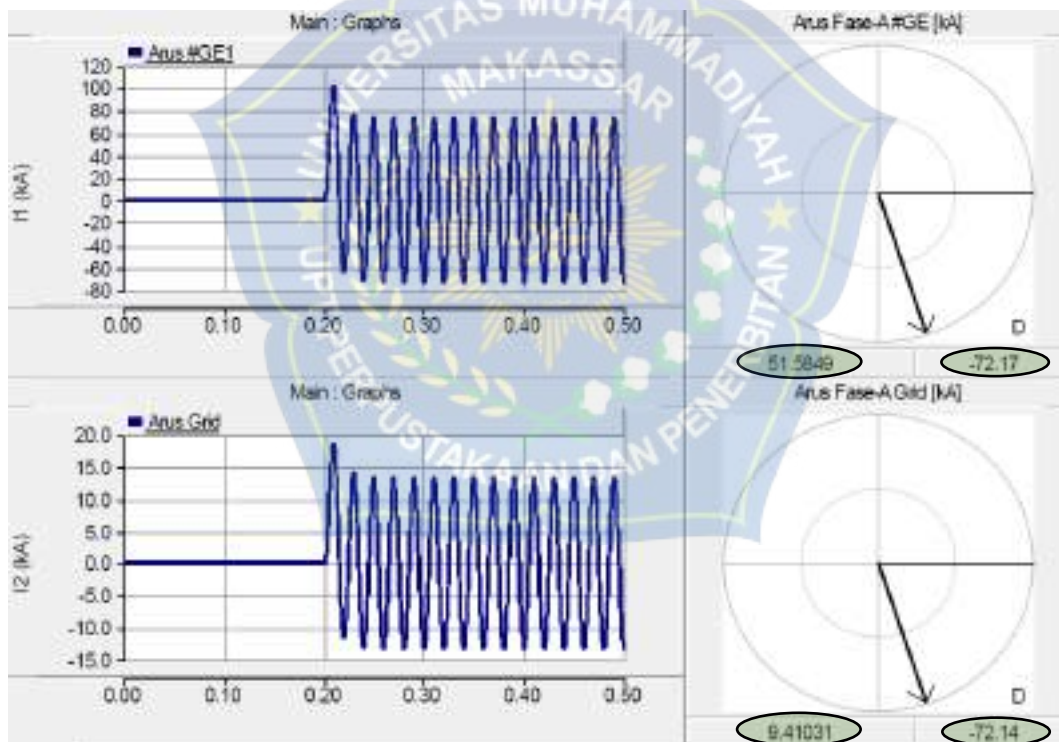


Lampiran A.3. Model *PSCAD* untuk Generator #GE1 PLTG Tello yang Terhubung ke *Grid* Sulselrabar pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 30%

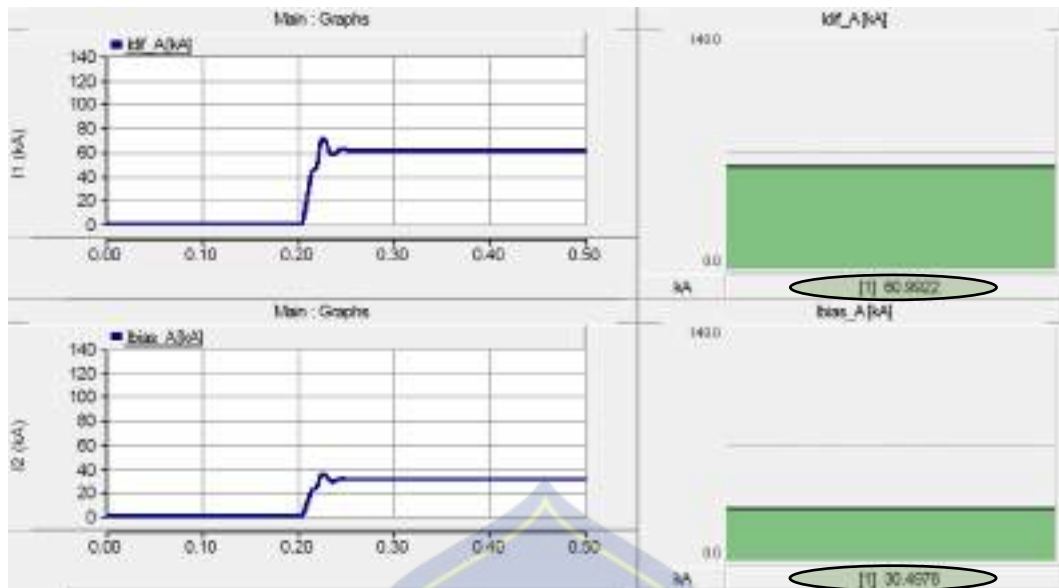
- Hasil simulasi di titik 30%



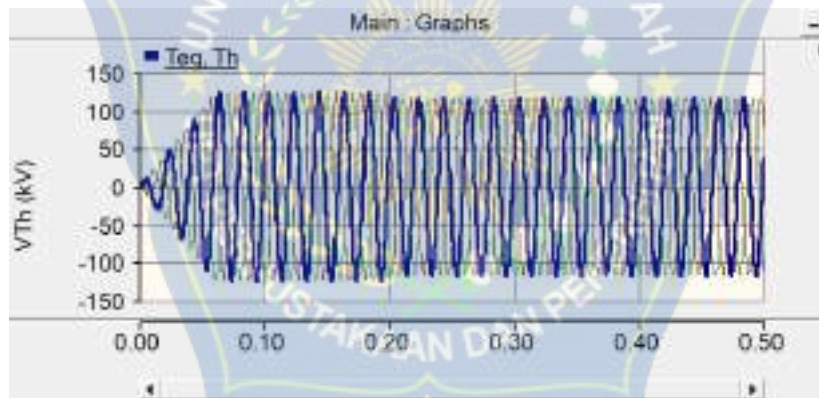
Lampiran A.4a. Display Numeris dan Grafis pada Kondisi Gangguan Internal di titik 30%



Lampiran A.4b. Display Grafik Arus Domain Waktu dan Grafik Arus Domain Fasor Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 30%

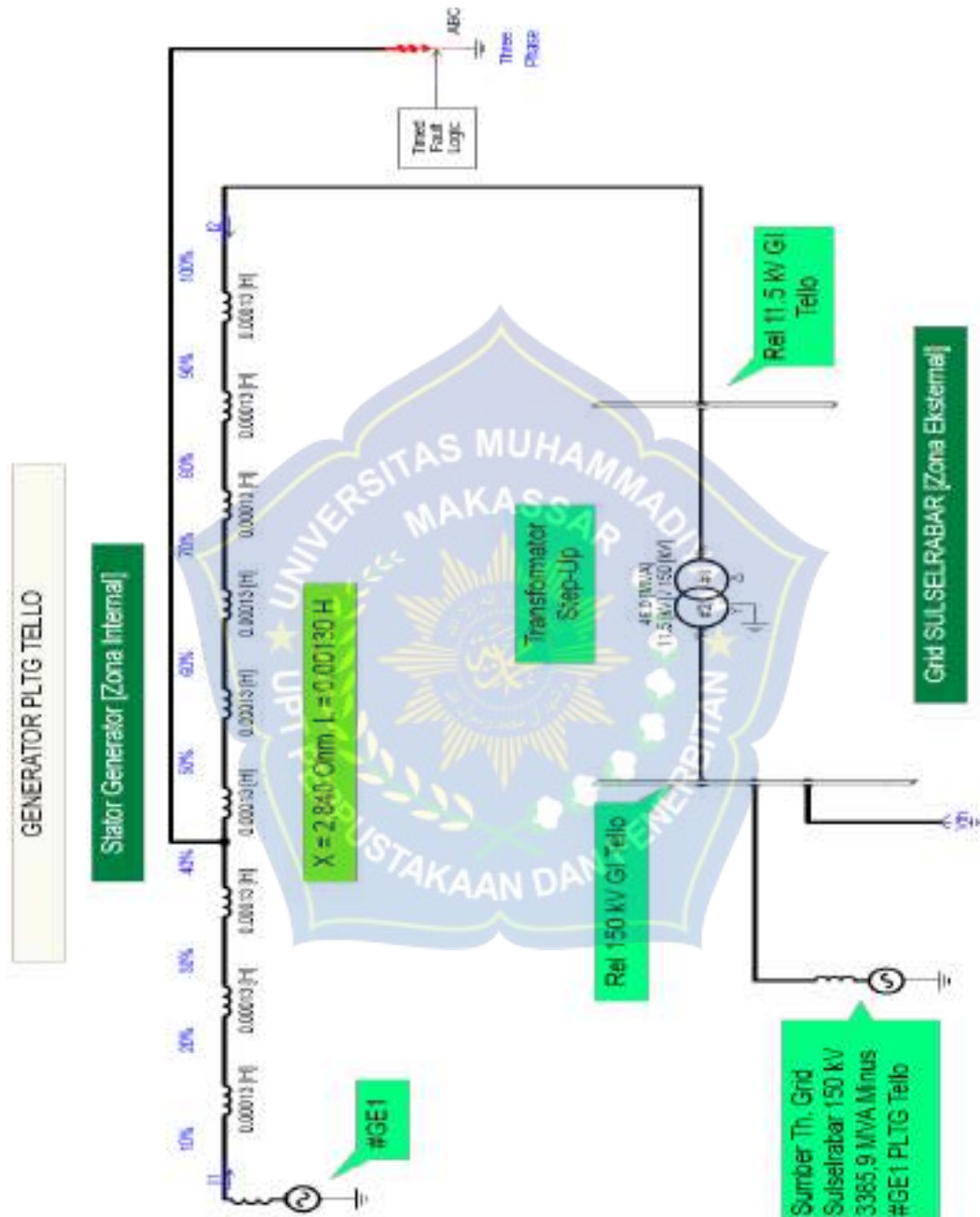


Lampiran A.4c. *Display* Grafik, Numeris Arus Diferensial dan Arus Bias Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 30%



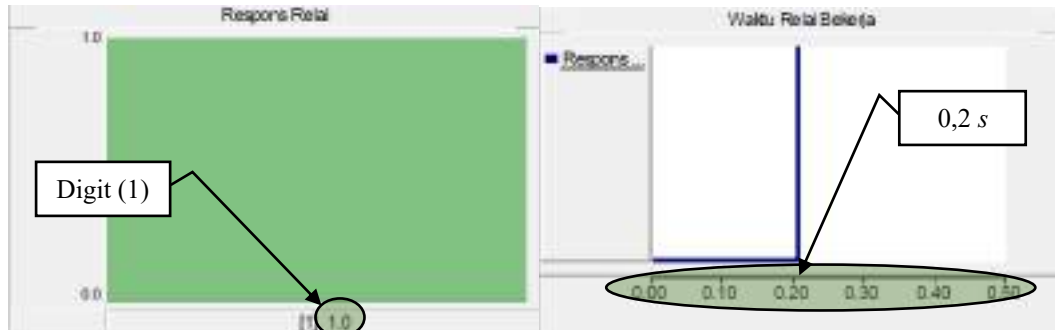
Lampiran A.4d. *Display* Grafik Tegangan Domain Waktu di Rel 150 kV pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 30%

3. Model Gangguan di Titik 40%

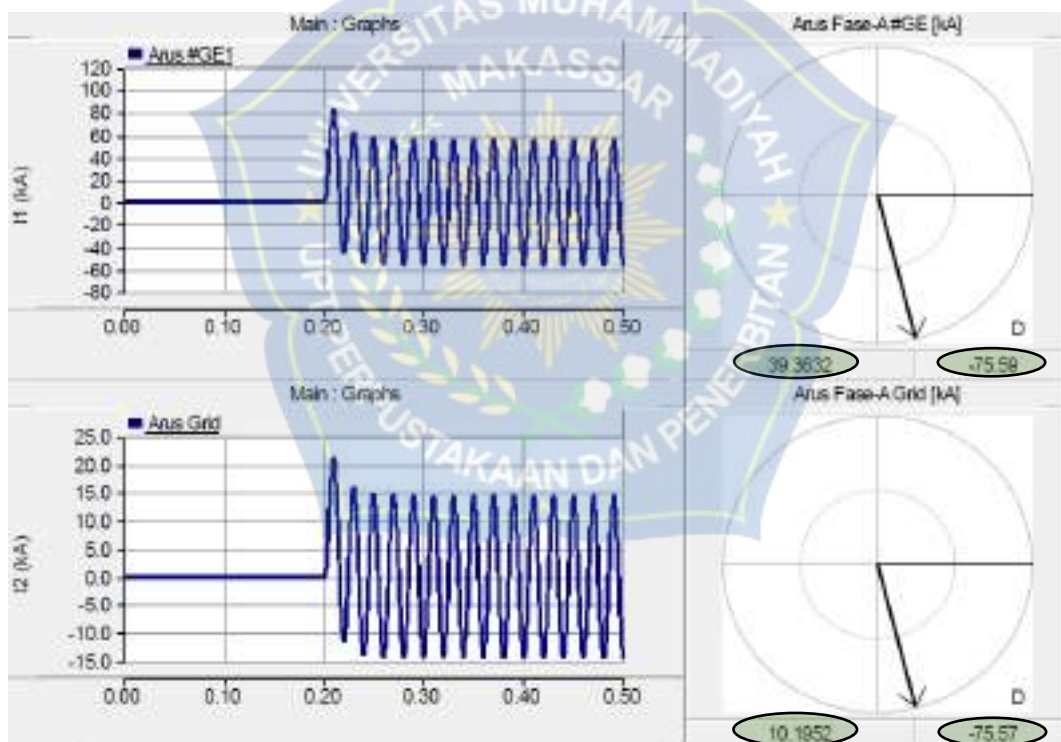


Lampiran A.5. Model *PSCAD* untuk Generator #GE1 PLTG Tello yang Terhubung ke *Grid* Sulselrabar pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 40%

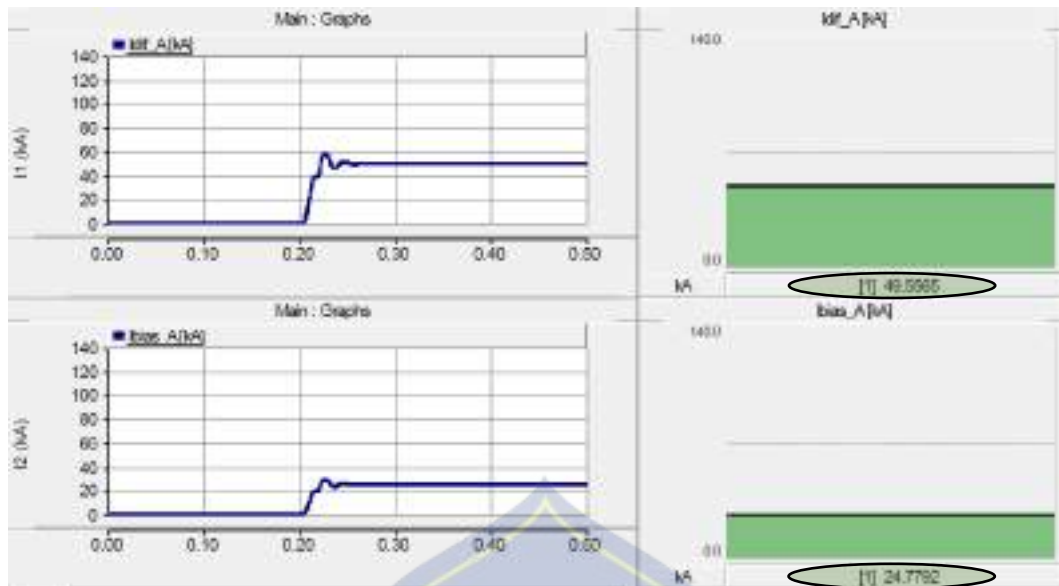
- Hasil simulasi di titik 40%



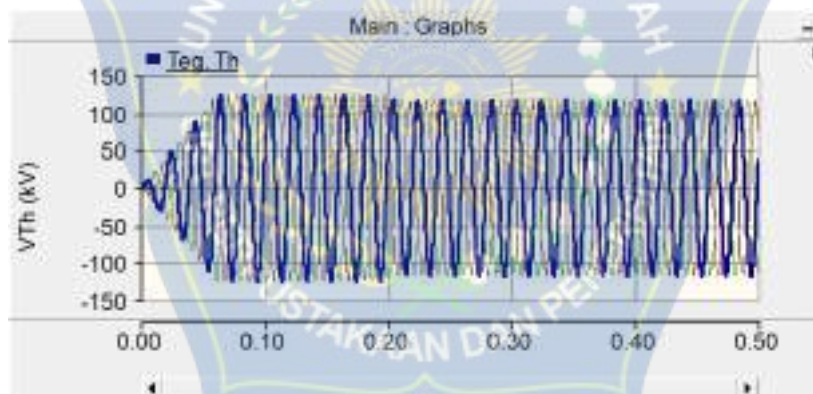
Lampiran A.6a. *Display* Numeris dan Grafis pada Kondisi Gangguan Internal di titik 40%



Lampiran A.6b. *Display* Grafik Arus Domain Waktu dan Grafik Arus Domain Fasor Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 40%

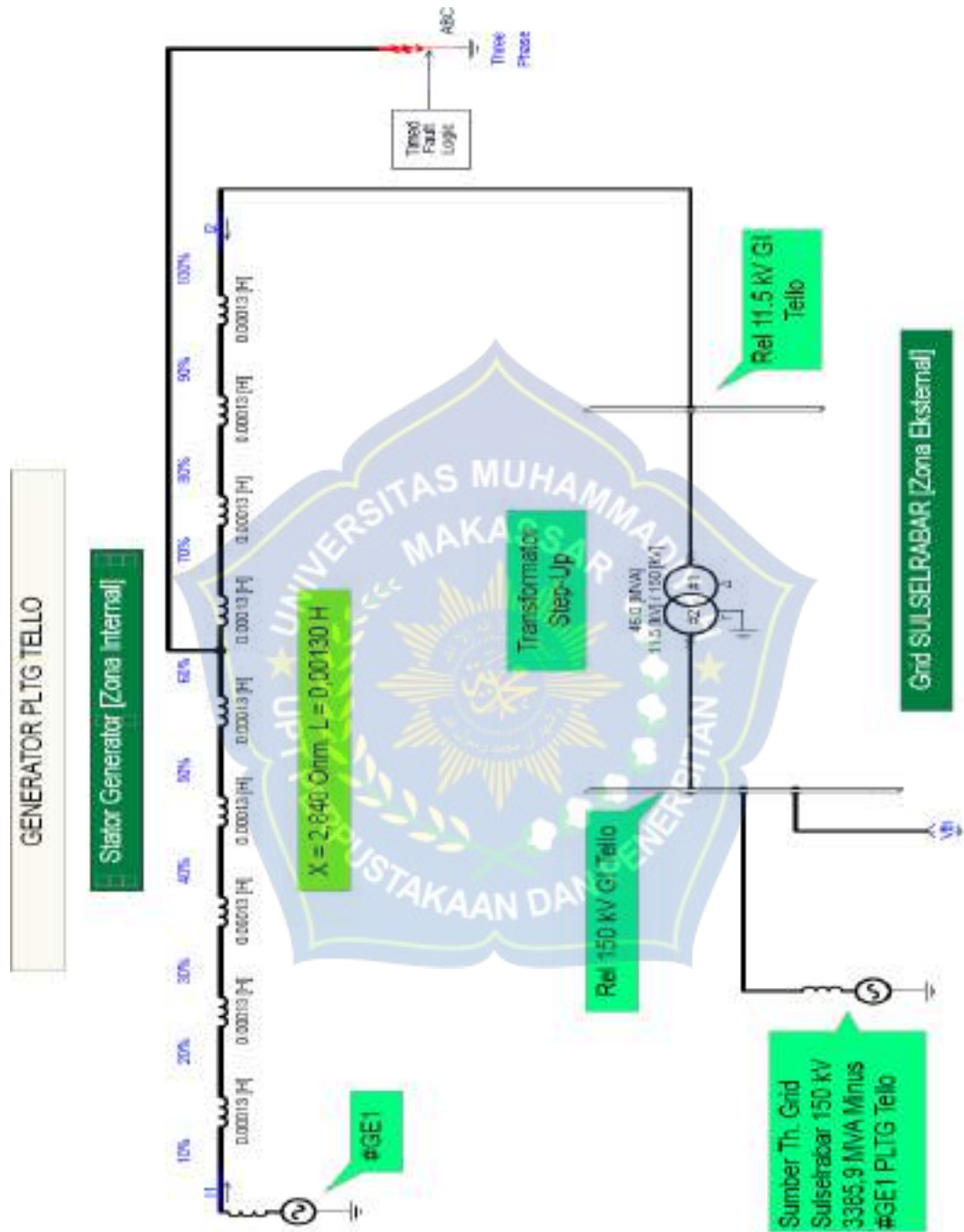


Lampiran A.6c. *Display* Grafik, Numeris Arus Diferensial dan Arus Bias Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 40%



Lampiran A.6d. *Display* Grafik Tegangan Domain Waktu di Rel 150 kV pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 40%

4. Model Gangguan di Titik 60%

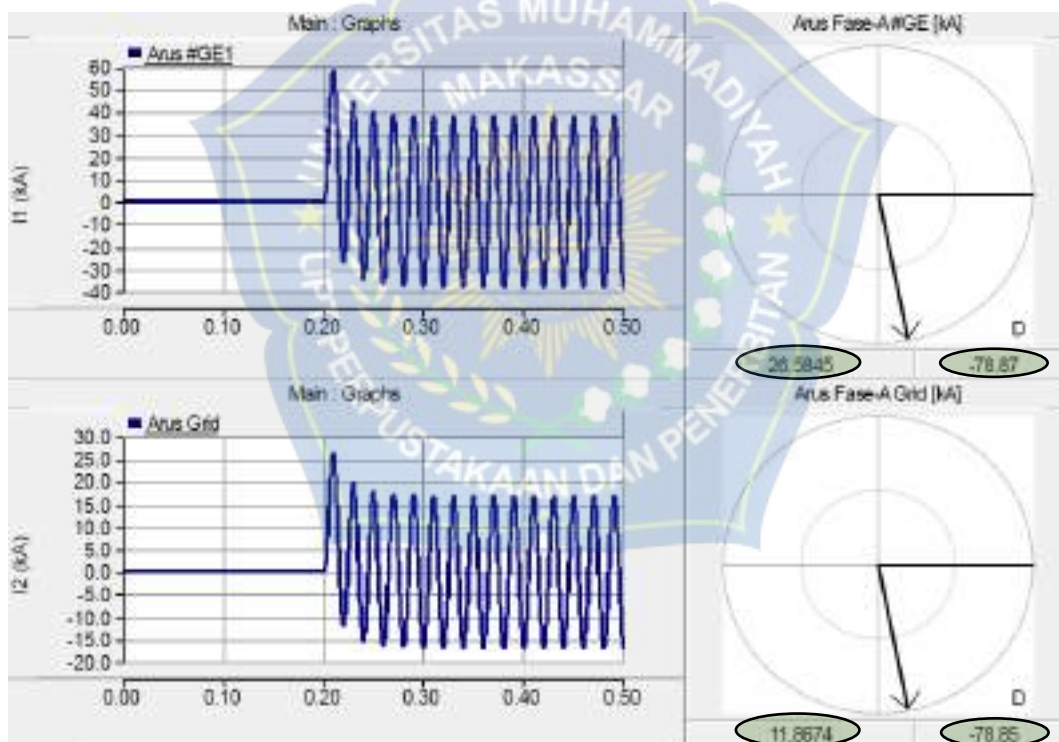


Lampiran A.7. Model *PSCAD* untuk Generator #GE1 PLTG Tello yang Terhubung ke *Grid* Sulselrabar pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 60%

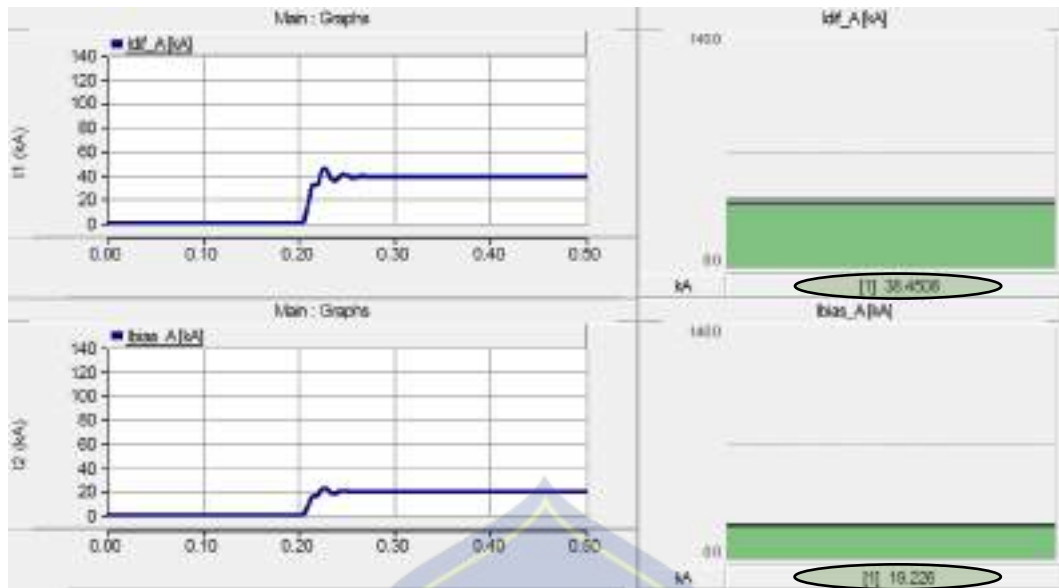
- Hasil simulasi di titik 60%



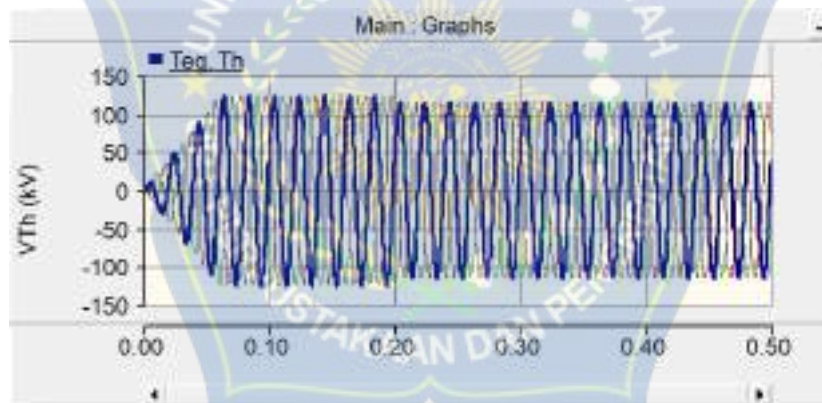
Lampiran A.8a. Display Numeris dan Grafis pada Kondisi Gangguan Internal di titik 60%



Lampiran A.8b. Display Grafik Arus Domain Waktu dan Grafik Arus Domain Fasor Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 60%

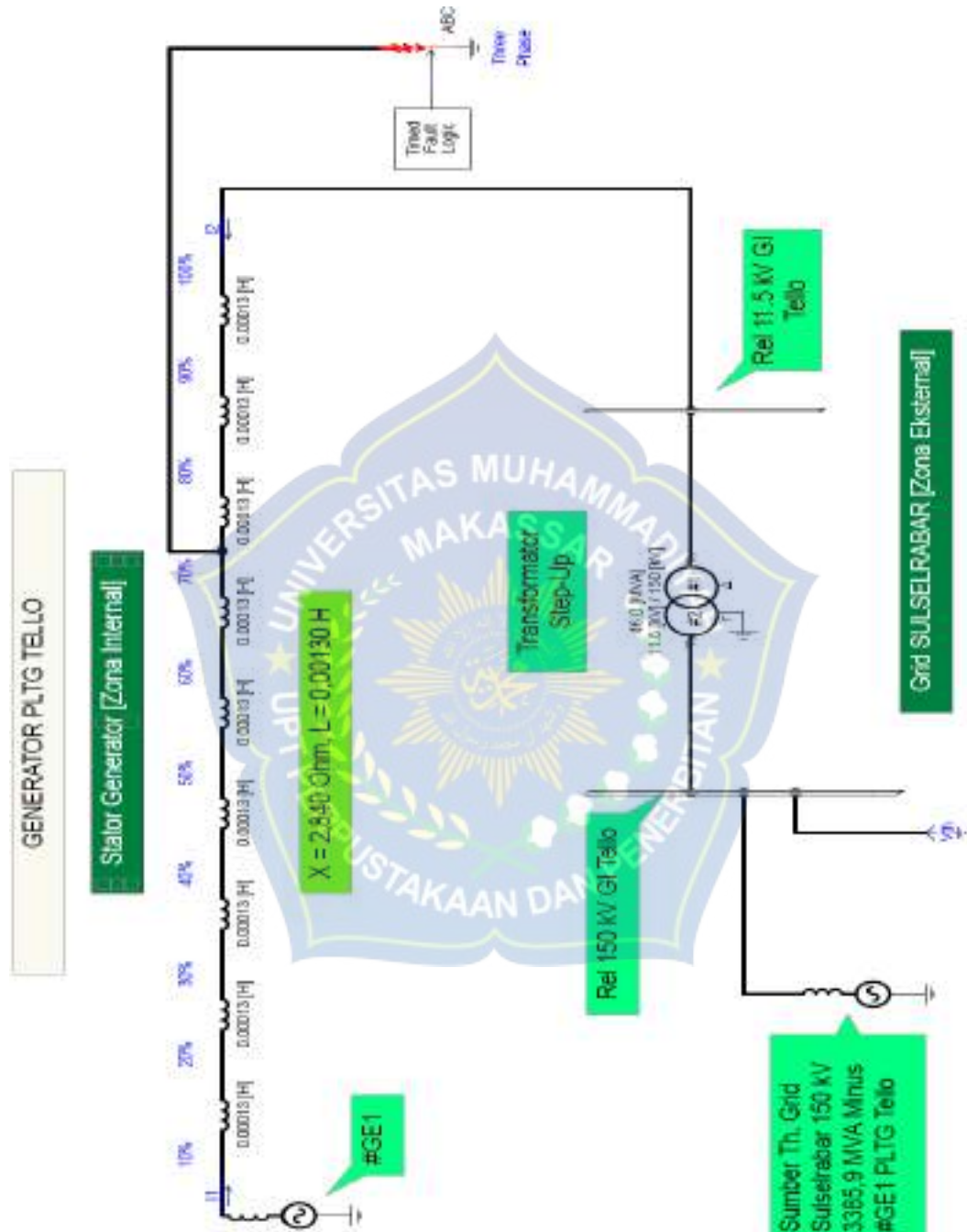


Lampiran A.8c. *Display* Grafik, Numeris Arus Diferensial dan Arus Bias Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 60%



Lampiran A.8d. *Display* Grafik Tegangan Domain Waktu di Rel 150 kV pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 60%

5. Model Gangguan di Titik 70%

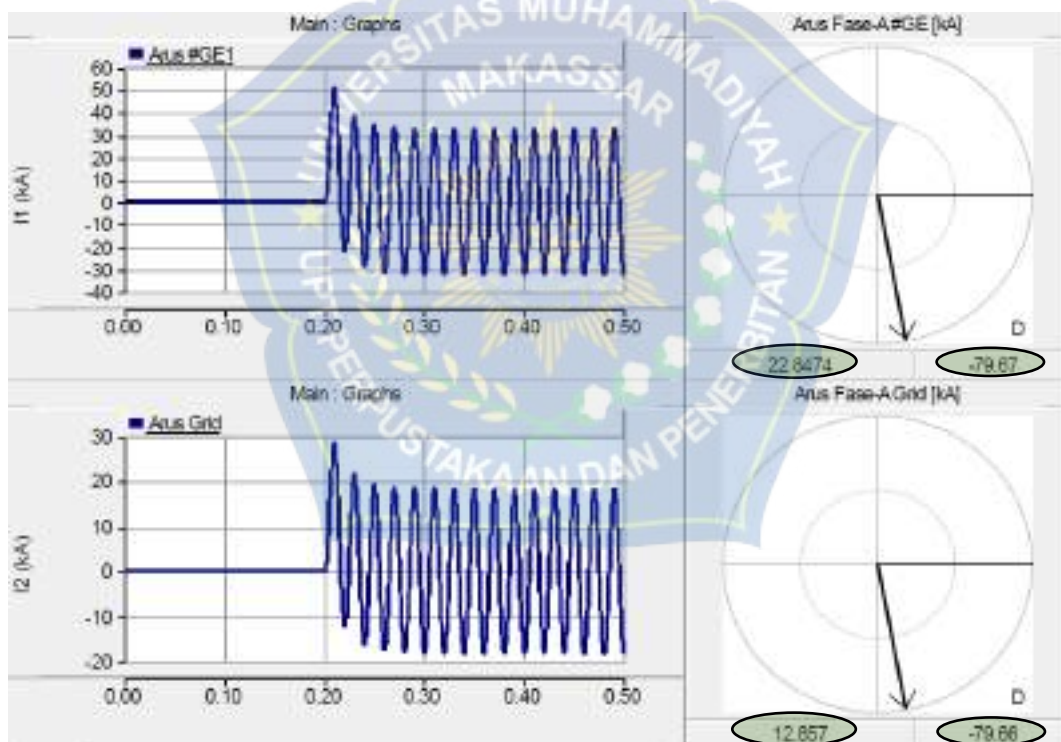


Lampiran A.9. Model *PSCAD* untuk Generator #GE1 PLTG Tello yang Terhubung ke *Grid* Sulselrabar pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 70%

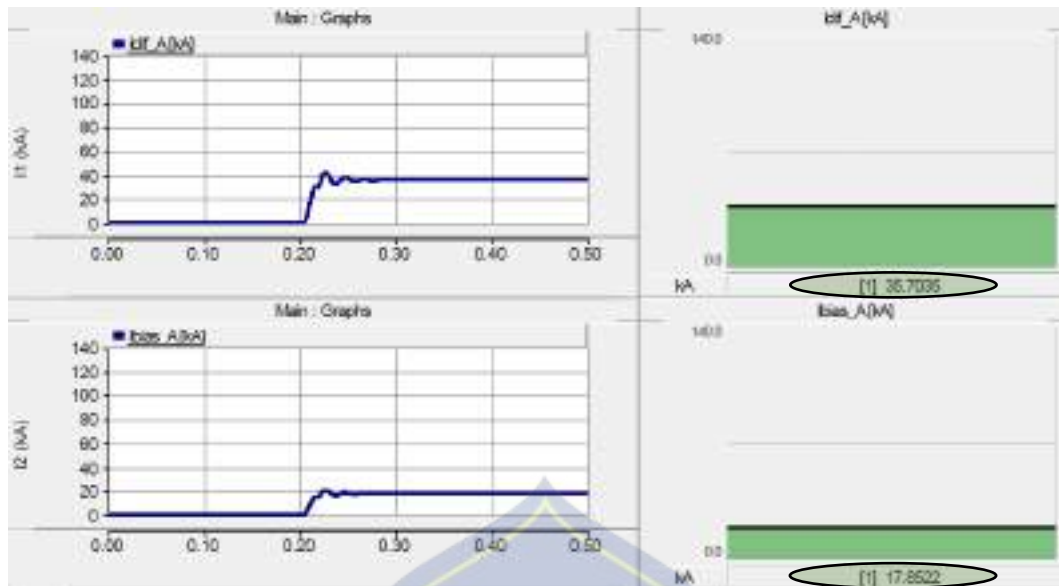
- Hasil simulasi di titik 70%



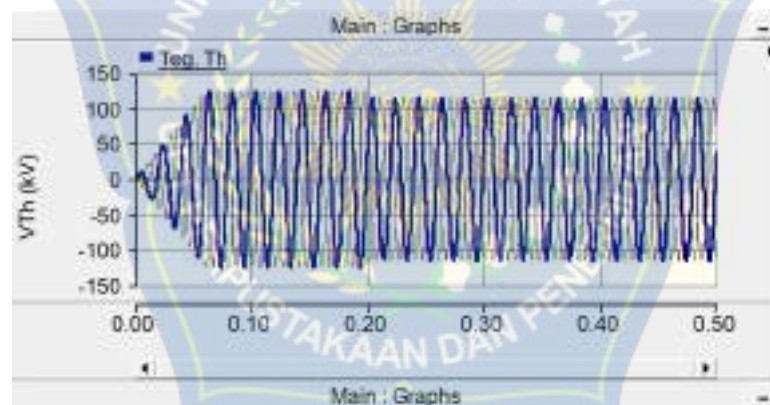
Lampiran A.10a. Display Numeris dan Grafis pada Kondisi Gangguan Internal di titik 70%



Lampiran A.10b. Display Grafik Arus Domain Waktu dan Grafik Arus Domain Fasor Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 70%

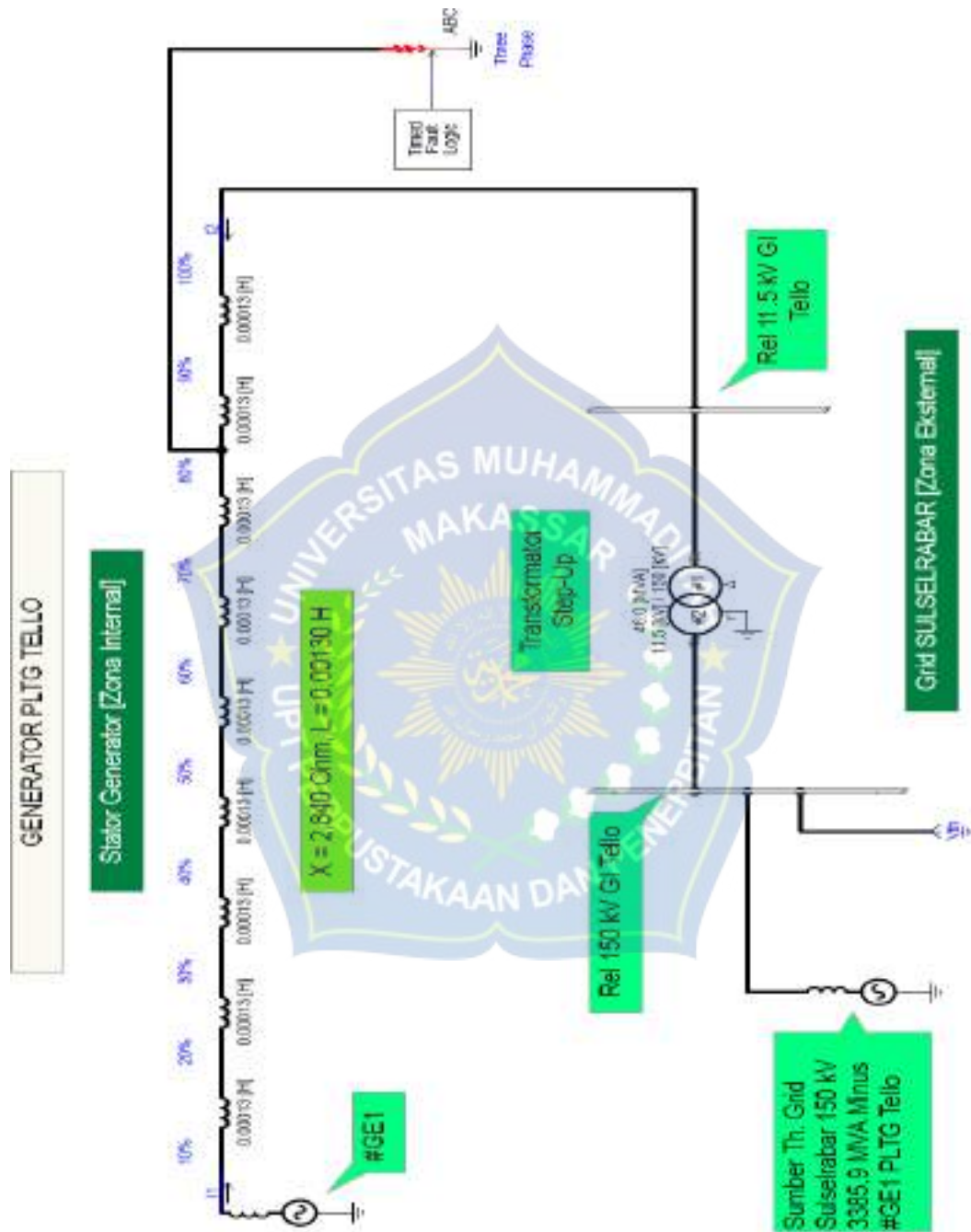


Lampiran A.10c. *Display* Grafik, Numeris Arus Diferensial dan Arus Bias Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 70%



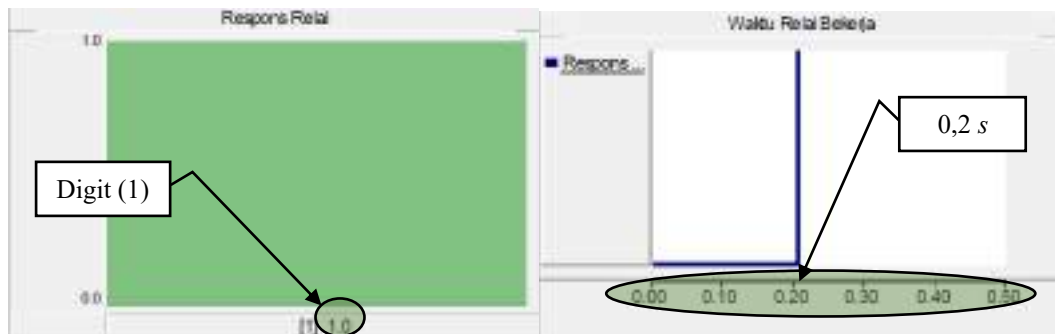
Lampiran A.10d. *Display* Grafik Tegangan Domain Waktu di Rel 150 kV pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 70%

6. Model Gangguan di Titik 80%

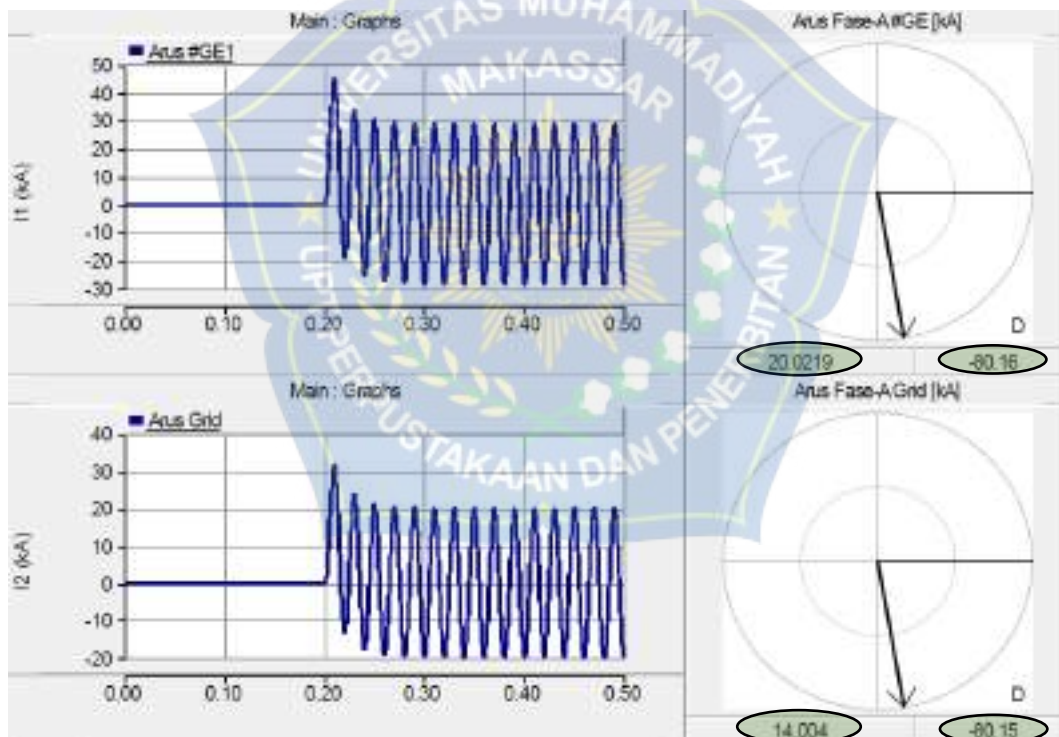


Lampiran A.11. Model *PSCAD* untuk Generator #GE1 PLTG Tello yang Terhubung ke *Grid* Sulselrabar pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 80%

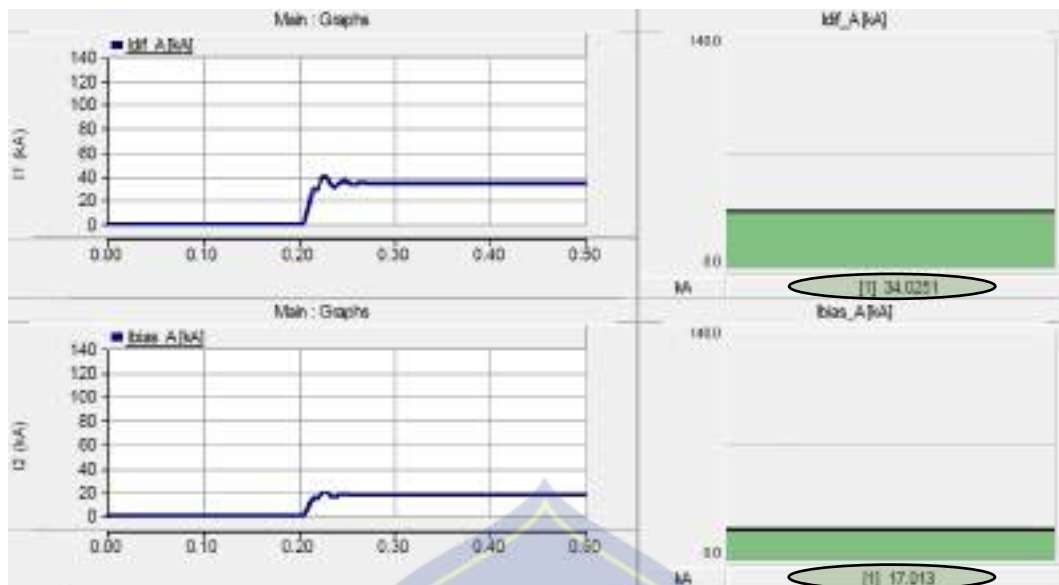
- Hasil simulasi di titik 80%



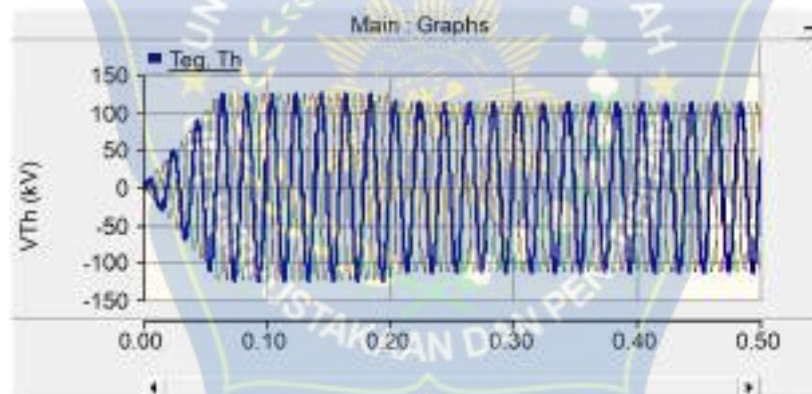
Lampiran A.12a. Display Numeris dan Grafis pada Kondisi Gangguan Internal di titik 80%



Lampiran A.12b. Display Grafik Arus Domain Waktu dan Grafik Arus Domain Fasor Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 80%

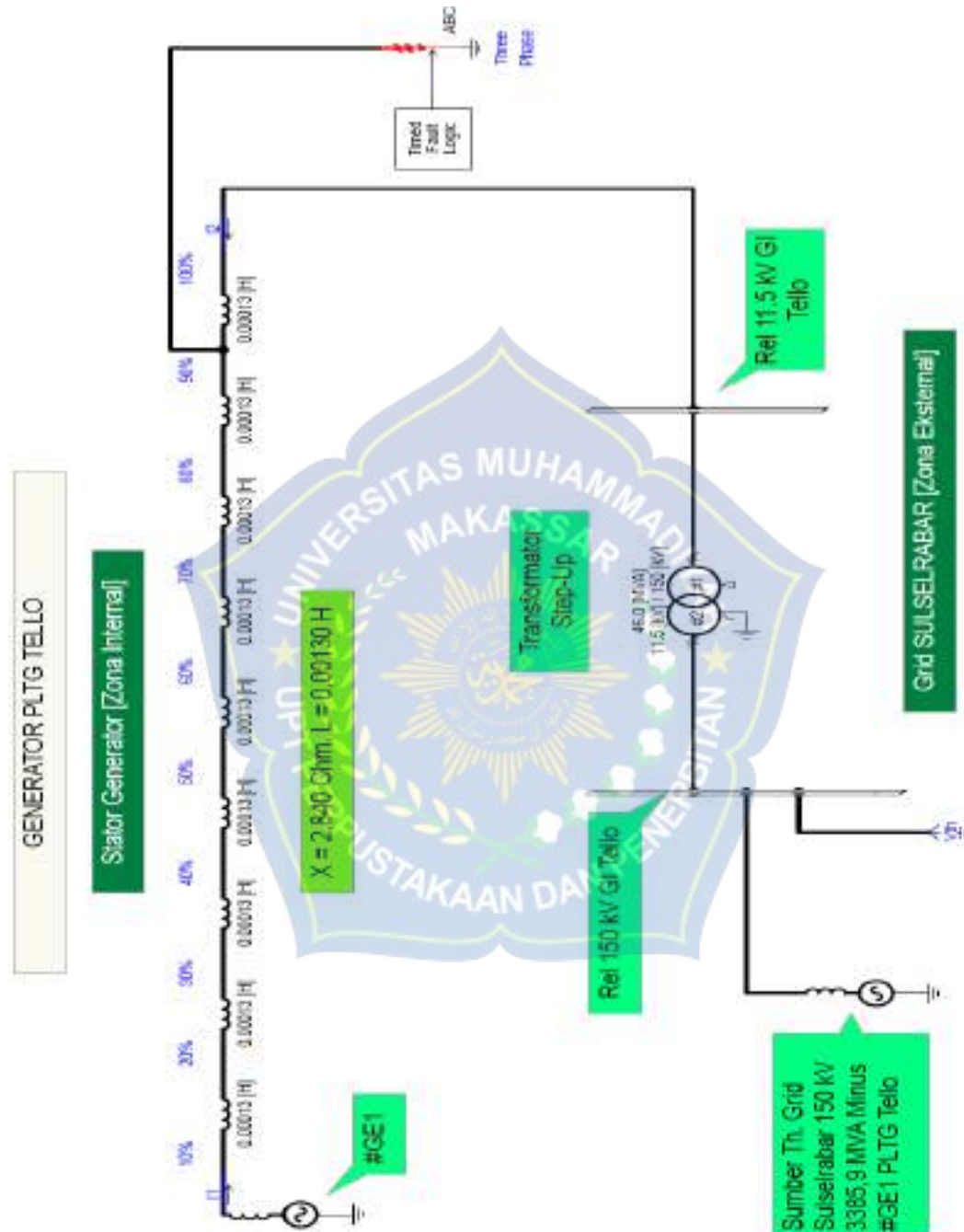


Lampiran A.12c. *Display* Grafik, Numeris Arus Diferensial dan Arus Bias Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 80%



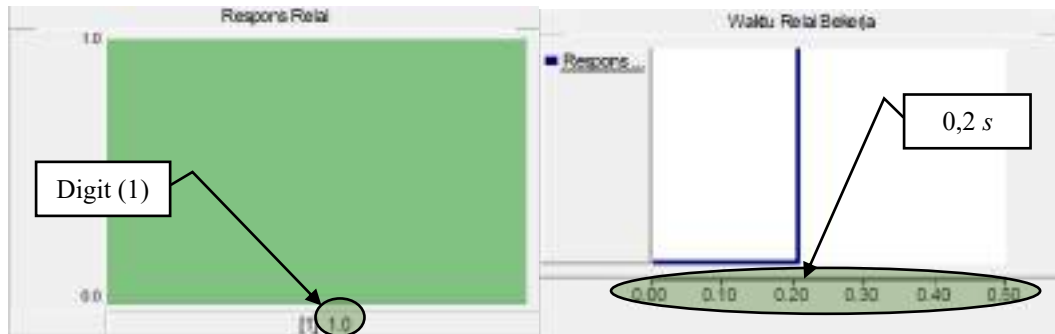
Lampiran A.12d. *Display* Grafik Tegangan Domain Waktu di Rel 150 kV pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 80%

7. Model Gangguan di Titik 90%

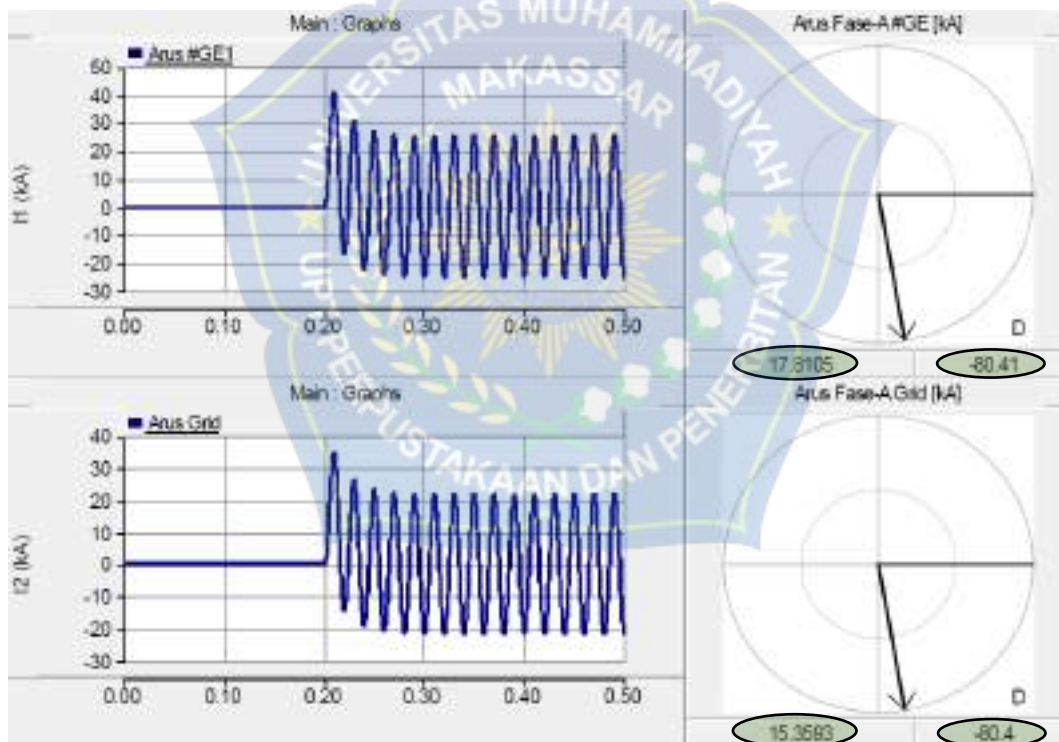


Lampiran A.13. Model *PSCAD* untuk Generator #GE1 PLTG Tello yang Terhubung ke *Grid* Sulselrabar pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 90%

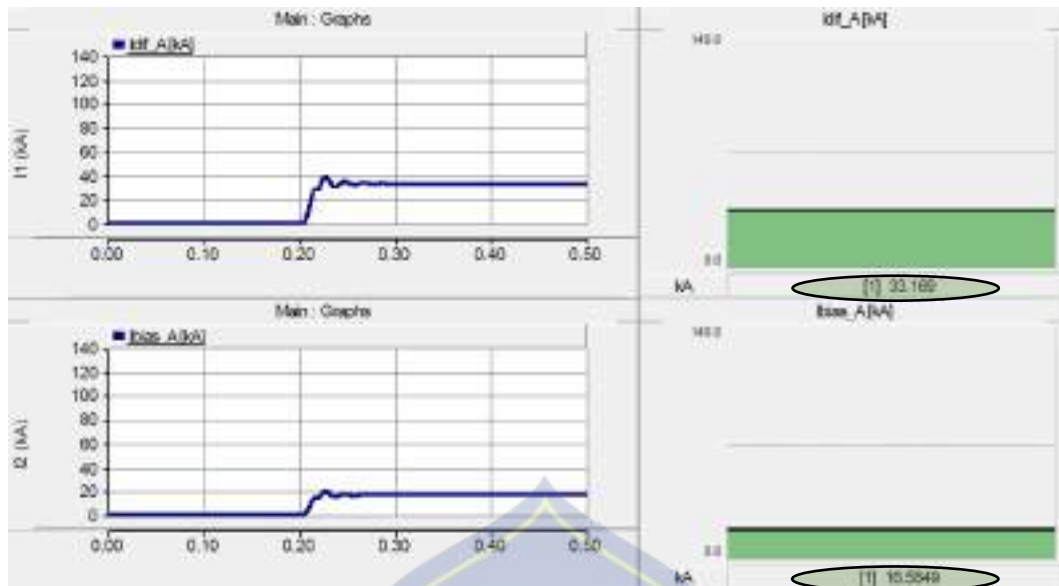
- Hasil simulasi di titik 90%



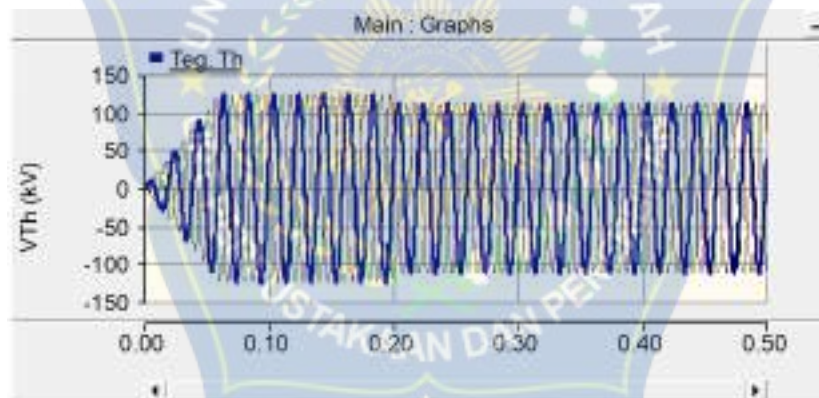
Lampiran A.14a. Display Numeris dan Grafis pada Kondisi Gangguan Internal di titik 90%



Lampiran A.14b. Display Grafik Arus Domain Waktu dan Grafik Arus Domain Fasor Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 90%



Lampiran A.14c. *Display* Grafik, Numeris Arus Diferensial dan Arus Bias Fase-A pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 90%



Lampiran A.14d. *Display* Grafik Tegangan Domain Waktu di Rel 150 kV pada Kondisi Gangguan Internal di Titik 90%

The logo of Universitas Muhammadiyah Makassar is a blue pentagon with a yellow border. Inside the pentagon, there is a circular emblem with a sunburst in the center. The text "UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH" is written in a semi-circle at the top, and "MAKASSARA" is written below it. At the bottom, the text "UPT PERPUSTAKAAN DAN PENERBITAN" is written in a semi-circle, flanked by two yellow stars.

LAMPIRAN B
DATA PENELITIAN



Lampiran B.1. Data Generator #GE1 PLTG Tello (PLN, 2025)



Lampiran B.2. Data Transformator *Step-Up* PLTG Tello (PLN, 2025)

Lampiran B.3. Data Diagram Segaris Sistem Sulselrabar (PLN, 2015)

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG GE

PT. PLN (Persero)

UP2B Sulawesi

Unit Pembangkit

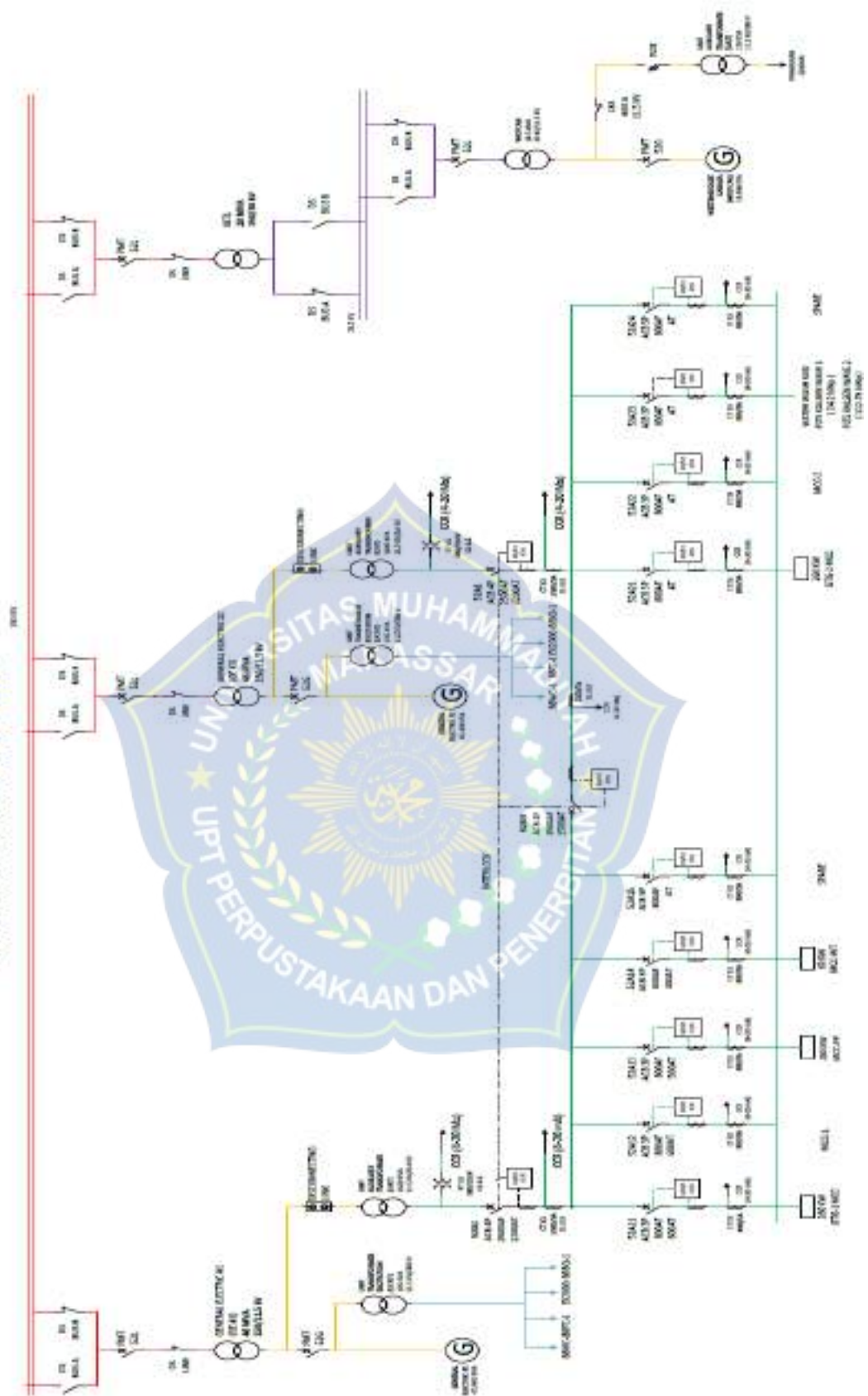
PLTG GE

Unit Pembangkit

PLTG

Lampiran B.4. Data Teknis Generator PLTG Tello (PLN, 2025)

SINGLE LINE DIAGRAM ULPLTG TELLO



Lampiran B.5. Data Diagram Segaris PLTG Tello (PLN, 2025)

**Lampiran B.6. Data Hubung Singkat Gardu Induk Tersebar Sistem
Sulbagsel (PLN, 2025)**

GARDU INDUK	TEGANGAN (KV)	MVASC					
		3 FASA		2 FASA		1 FASA - GROUND	
		MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN
GI BMPP NUSANTARA	150	1120.07	927.01	312.94	259.86	432.82	358.48
GI ANDOLO	150	815.76	677.11	232.13	192.69	315.75	266.54
GI BAKARU	150	1462.04	1207.57	428.63	353.43	561.88	457.02
GI BANTAENG NEW	150	1779.10	1521.63	520.88	445.84	665.92	564.59
GI BANTAENG SMELTER	150	1865.67	1594.94	546.40	467.44	875.04	751.63
GI BANTAENG SWITCHING	150	1918.38	1637.79	562.07	480.19	883.80	758.45
GI BARRU	150	1716.10	1491.63	497.49	432.62	509.59	446.77
GI BELOPA	150	2131.23	1841.67	619.65	535.72	803.61	684.29
GI BOLANGI	150	3243.17	2724.48	954.63	802.19	1372.07	1166.18
GI BONE	150	1766.79	1523.14	514.31	443.60	651.87	568.09
GI BORONGLOE66	66	286.90	258.04	82.91	74.58	75.82	68.07
GI BOSOWA	150	1846.63	1598.63	538.16	466.21	579.33	504.37
GI BULUKUMBA	150	1806.43	1548.01	528.56	453.27	790.00	681.43
GI DAYA BARU	150	3227.86	2717.76	948.79	799.19	1366.96	1162.53
GI DAYA66	66	432.70	388.62	125.21	112.48	150.40	135.04
GI DONGGALA	150	980.39	831.42	285.26	241.95	436.53	372.30
GI ENREKANG	150	1500.58	1312.90	435.10	380.92	499.20	425.64
GI HUADI HENGSENG	150	1865.35	1594.93	546.30	467.43	843.59	725.41
GI HUADI UNITY	150	1913.72	1634.04	560.68	479.07	879.33	754.79
GI JENEPONTO	150	2633.23	2194.92	778.45	648.89	972.71	824.12
GI KASIPUTE	150	630.42	533.38	179.98	152.25	240.30	206.12
GI KENDARI NEW	150	1146.94	920.99	324.44	260.71	507.75	411.98

GI KIMA	150	3157.62	2661.74	928.01	782.62	1346.48	1146.12
GI KOLAKA	150	1071.11	886.85	301.34	249.99	399.85	330.03
GI KOLONEDALE	150	698.82	621.00	202.31	179.85	177.51	159.23
GI KTT ANTAM	150	956.90	799.53	269.94	225.90	327.68	274.66
GI LANNA	150	2377.82	2030.41	697.16	595.62	932.33	805.46
GI LATUPPA 150	150	2399.79	2079.49	698.13	605.23	1055.90	919.93
GI LATUPPA 275	275	2388.05	2080.66	692.93	604.01	1032.47	905.03
GI MAJENE	150	954.63	829.51	276.93	240.64	357.98	313.53
GI MAKALE	150	2066.47	1787.78	605.07	523.25	751.46	652.62
GI MALEA	150	1775.68	1538.71	522.00	451.94	634.40	547.01
GI MAMUJU	150	754.41	657.56	218.64	190.60	332.93	291.67
GI MAMUJU NEW	150	746.53	650.51	216.38	188.58	327.58	286.92
GI MANDAI	66	412.67	370.30	119.41	107.18	138.66	124.16
GI MAROS	150	2674.18	2283.57	781.42	667.76	959.56	830.55
GI MASAMBA	150	908.92	799.10	261.10	229.75	339.52	300.08
GI MORAMO	150	1135.33	904.78	320.97	256.01	489.79	393.17
GI NII TANASSA	66	749.86	593.25	215.92	170.70	337.49	266.27
GI PALOPO	150	2404.61	2083.32	699.56	606.37	1051.51	916.02
GI PAMONA 150	150	1704.01	1470.28	495.36	427.73	737.72	640.71
GI PAMONA 275	275	3857.46	3229.12	1130.28	946.36	1660.02	1394.30
GI PANAKKUKANG	150	3123.95	2631.83	919.13	774.59	1364.49	1159.86
GI PANGKEP 150	150	2138.84	1845.26	623.27	538.11	861.06	748.88
GI PANGKEP 66	66	724.80	648.33	209.83	187.74	311.55	279.43
GI PAREPARE	150	3500.92	2967.29	1015.00	860.50	1310.65	1124.88
GI PARIGI	66	212.27	187.16	61.46	54.20	61.28	54.41
GI PASANGKAYU	150	853.61	732.88	247.93	212.91	348.61	301.25

GI PINRANG	150	1715.03	1476.31	497.29	428.16	620.21	529.40
GI PLTB SIDRAP	150	3479.60	2928.47	1014.25	853.97	1108.91	950.91
GI PLTB TOLO	150	2498.36	2091.00	737.65	617.45	864.50	737.45
GI PLTU BARRU	150	2381.06	2047.63	690.48	594.05	825.17	714.15
GI PLTU MAMUJU	150	734.04	640.04	212.74	185.53	319.24	279.84
GI PLTU PALU 3	150	1219.16	956.62	362.37	283.35	576.23	447.05
GI PLTU SULSEL BARRU	150	2845.71	2398.11	827.73	698.02	945.40	791.78
GI POLMAS	150	1221.59	1052.71	354.97	305.86	435.38	378.34
GI POMALA SWITCHING	150	984.59	820.91	277.57	231.81	343.49	286.97
GI POSO	150	1531.37	1312.21	445.20	381.76	645.79	550.98
GI PUNAGAYA	150	4005.34	3188.81	1203.72	955.88	1811.61	1447.66
GI PUUWATU 150	150	1084.63	876.69	307.39	248.58	453.18	371.79
GI PUUWATU 66	66	705.45	576.10	203.11	165.79	312.22	257.40
GI SENGKANG	150	3798.12	3054.83	1121.71	900.55	1599.07	1282.76
GI SIDERA	150	1404.85	1155.47	411.59	338.36	622.92	516.39
GI SIDRAP	150	4021.56	3349.95	1174.39	978.46	1457.43	1235.60
GI SILAE	150	1217.97	1010.73	355.49	294.98	535.33	444.02
GI SINJAI	150	1022.21	893.89	296.81	259.69	403.54	355.25
GI SIWA	150	2264.37	1937.01	659.99	564.68	856.59	739.03
GI SOPPENG	150	2860.53	2401.27	836.78	702.44	1124.54	954.68
GI SULEWANA	275	3786.80	3173.98	1109.03	929.77	1581.97	1332.29
GI SUNGGUMINASA	150	3526.10	2936.81	1041.06	867.09	1583.04	1331.02
GI TALISE 150	150	1309.58	1066.34	384.95	313.12	582.63	478.94
GI TALISE 66	66	386.41	339.97	112.11	98.64	165.17	146.04
GI TALLASA	150	3306.87	2733.47	980.17	809.87	1296.67	1091.61
GI TALLO LAMA	150	3286.39	2753.94	968.50	811.76	1492.27	1259.62

GI TANETE	150	1187.64	1033.71	345.56	300.96	472.74	414.26
GI TANJUNG BUNGA	150	3315.63	2768.81	978.48	817.16	1502.64	1264.05
GI TAWAELI	150	1260.43	1016.12	371.71	299.15	520.50	425.71
GI TELLO 150	150	3473.77	2905.86	1024.00	856.72	1603.01	1350.20
GI TELLO 66	66	528.05	474.74	152.83	137.43	215.17	193.88
GI TINAGGEA SWITCHING	150	781.88	651.25	222.62	185.43	297.90	252.37
GI TONASA	66	587.82	526.24	170.09	152.32	215.25	193.11
GI TOPOYO	150	750.24	652.55	217.51	189.23	310.88	272.04
GI UNAHA	150	1074.52	879.76	303.78	248.95	411.51	342.72
GI WOLO 150	150	1137.10	941.21	317.91	263.98	443.00	367.26
GI WOTU 275	275	2482.97	2147.81	718.55	621.95	1030.74	898.88
GIS BONTOALA	150	3244.31	2717.27	956.35	801.13	1477.34	1246.17
GI LASUSUA	150	1073.96	908.53	303.08	256.91	400.36	334.94
GI MALILI	150	1170.28	1012.76	334.01	289.47	446.11	381.83
PLTU JENEPONTO EKSP	150	3956.72	3151.39	1189.44	944.89	1739.23	1391.61
PLTU JENEPONTO EKST	150	3920.91	3127.94	1177.19	936.89	1720.41	1381.67
GI SUPPA	150	3032.06	2596.92	875.66	750.10	1083.70	939.20
GI WOTU 150	150	1305.99	1135.72	374.36	325.96	577.79	503.35



GARDU INDUK	TEGANGAN (KV)	HUBUNG SINGKAT					
		3 FASA		2 FASA		1 FASA - GROUND	
		MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN
GI BMPP NUSANTARA	150	4.31	3.57	3.61	3.00	5.00	4.14
GI ANDOLO	150	3.14	2.61	2.68	2.22	3.65	3.08
GI BAKARU	150	5.63	4.65	4.95	4.08	6.49	5.28
GI BANTAENG NEW	150	6.85	5.86	6.01	5.15	7.69	6.52
GI BANTAENG SMELTER	150	7.18	6.14	6.31	5.40	10.10	8.68
GI BANTAENG SWITCHING	150	7.38	6.30	6.49	5.54	10.21	8.76
GI BARRU	150	6.61	5.74	5.74	5.00	5.88	5.16
GI BELOPA	150	8.20	7.09	7.16	6.19	9.28	7.90
GI BOLANGI	150	12.48	10.49	11.02	9.26	15.84	13.47
GI BONE	150	6.80	5.86	5.94	5.12	7.53	6.56
GI BORONGLOE66	66	2.51	2.26	2.18	1.96	1.99	1.79
GI BOSOWA	150	7.11	6.15	6.21	5.38	6.69	5.82
GI BULUKUMBA	150	6.95	5.96	6.10	5.23	9.12	7.87
GI DAYA BARU	150	12.42	10.46	10.96	9.23	15.78	13.42
GI DAYA66	66	3.79	3.40	3.29	2.95	3.95	3.54
GI DONGGALA	150	3.77	3.20	3.29	2.79	5.04	4.30
GI ENREKANG	150	5.78	5.05	5.02	4.40	5.76	4.91
GI HUADI HENGSENG	150	7.18	6.14	6.31	5.40	9.74	8.38
GI HUADI UNITY	150	7.37	6.29	6.47	5.53	10.15	8.72
GI JENEPONTO	150	10.14	8.45	8.99	7.49	11.23	9.52
GI KASIPUTE	150	2.43	2.05	2.08	1.76	2.77	2.38

GI KENDARI NEW	150	4.41	3.54	3.75	3.01	5.86	4.76
GI KIMA	150	12.15	10.25	10.72	9.04	15.55	13.23
GI KOLAKA	150	4.12	3.41	3.48	2.89	4.62	3.81
GI KOLONEDALE	150	2.69	2.39	2.34	2.08	2.05	1.84
GI KTT ANTAM	150	3.68	3.08	3.12	2.61	3.78	3.17
GI LANNA	150	9.15	7.82	8.05	6.88	10.77	9.30
GI LATUPPA 150	150	9.24	8.00	8.06	6.99	12.19	10.62
GI LATUPPA 275	275	5.01	4.37	4.36	3.80	6.50	5.70
GI MAJENE	150	3.67	3.19	3.20	2.78	4.13	3.62
GI MAKALE	150	7.95	6.88	6.99	6.04	8.68	7.54
GI MALEA	150	6.83	5.92	6.03	5.22	7.33	6.32
GI MAMUJU	150	2.90	2.53	2.52	2.20	3.84	3.37
GI MAMUJU NEW	150	2.87	2.50	2.50	2.18	3.78	3.31
GI MANDAI	66	3.61	3.24	3.13	2.81	3.64	3.26
GI MAROS	150	10.29	8.79	9.02	7.71	11.08	9.59
GI MASAMBA	150	3.50	3.08	3.01	2.65	3.92	3.47
GI MORAMO	150	4.37	3.48	3.71	2.96	5.66	4.54
GI NII TANASSA	66	6.56	5.19	5.67	4.48	8.86	6.99
GI PALOPO	150	9.26	8.02	8.08	7.00	12.14	10.58
GI PAMONA 150	150	6.56	5.66	5.72	4.94	8.52	7.40
GI PAMONA 275	275	8.10	6.78	7.12	5.96	10.46	8.78
GI PANAKKUKANG	150	12.02	10.13	10.61	8.94	15.76	13.39
GI PANGKEP 150	150	8.23	7.10	7.20	6.21	9.94	8.65
GI PANGKEP 66	66	6.34	5.67	5.51	4.93	8.18	7.33
GI PAREPARE	150	13.48	11.42	11.72	9.94	15.13	12.99
GI PARIGI	66	1.86	1.64	1.61	1.42	1.61	1.43

GI PASANGKAYU	150	3.29	2.82	2.86	2.46	4.03	3.48
GI PINRANG	150	6.60	5.68	5.74	4.94	7.16	6.11
GI PLTB SIDRAP	150	13.39	11.27	11.71	9.86	12.80	10.98
GI PLTB TOLO	150	9.62	8.05	8.52	7.13	9.98	8.52
GI PLTU BARRU	150	9.16	7.88	7.97	6.86	9.53	8.25
GI PLTU MAMUJU	150	2.83	2.46	2.46	2.14	3.69	3.23
GI PLTU PALU 3	150	4.69	3.68	4.18	3.27	6.65	5.16
GI PLTU SULSEL BARRU	150	10.95	9.23	9.56	8.06	10.92	9.14
GI POLMAS	150	4.70	4.05	4.10	3.53	5.03	4.37
GI POMALA SWITCHING	150	3.79	3.16	3.21	2.68	3.97	3.31
GI POSO	150	5.89	5.05	5.14	4.41	7.46	6.36
GI PUNAGAYA	150	15.42	12.27	13.90	11.04	20.92	16.72
GI PUUWATU 150	150	4.17	3.37	3.55	2.87	5.23	4.29
GI PUUWATU 66	66	6.17	5.04	5.33	4.35	8.19	6.76
GI SENGKANG	150	14.62	11.76	12.95	10.40	18.46	14.81
GI SIDERA	150	5.41	4.45	4.75	3.91	7.19	5.96
GI SIDRAP	150	15.48	12.89	13.56	11.30	16.83	14.27
GI SILAE	150	4.69	3.89	4.10	3.41	6.18	5.13
GI SINJAI	150	3.93	3.44	3.43	3.00	4.66	4.10
GI SIWA	150	8.72	7.46	7.62	6.52	9.89	8.53
GI SOPPENG	150	11.01	9.24	9.66	8.11	12.99	11.02
GI SULEWANA	275	7.95	6.66	6.99	5.86	9.96	8.39
GI SUNGGUMINASA	150	13.57	11.30	12.02	10.01	18.28	15.37
GI TALISE 150	150	5.04	4.10	4.45	3.62	6.73	5.53
GI TALISE 66	66	3.38	2.97	2.94	2.59	4.33	3.83
GI TALLASA	150	12.73	10.52	11.32	9.35	14.97	12.60

GI TALLO LAMA	150	12.65	10.60	11.18	9.37	17.23	14.54
GI TANETE	150	4.57	3.98	3.99	3.48	5.46	4.78
GI TANJUNG BUNGA	150	12.76	10.66	11.30	9.44	17.35	14.60
GI TAWAELI	150	4.85	3.91	4.29	3.45	6.01	4.92
GI TELLO 150	150	13.37	11.18	11.82	9.89	18.51	15.59
GI TELLO 66	66	4.62	4.15	4.01	3.61	5.65	5.09
GI TINAGGEA SWITCHING	150	3.01	2.51	2.57	2.14	3.44	2.91
GI TONASA	66	5.14	4.60	4.46	4.00	5.65	5.07
GI TOPOYO	150	2.89	2.51	2.51	2.18	3.59	3.14
GI UNAAHA	150	4.14	3.39	3.51	2.87	4.75	3.96
GI WOLO 150	150	4.38	3.62	3.67	3.05	5.12	4.24
GI WOTU 275	275	5.21	4.51	4.53	3.92	6.49	5.66
GIS BONTOTALA	150	12.49	10.46	11.04	9.25	17.06	14.39
GI LASUSUA	150	4.13	3.50	3.50	2.97	4.62	3.87
GI MALILI	150	4.50	3.90	3.86	3.34	5.15	4.41
PLTU JENEPONTO EKSP	150	15.23	12.13	13.73	10.91	20.08	16.07
PLTU JENEPONTO EKST	150	15.09	12.04	13.59	10.82	19.87	15.95
GI SUPPA	150	11.67	10.00	10.11	8.66	12.51	10.84
GI WOTU 150	150	5.03	4.37	4.32	3.76	6.67	5.81



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Nomor 522/05/C.4-VI/VII/47/2025

Makassar, 19 Muharrem 1447 H

Lamp

14 Juli

2025 M

Hal Permintaan Data Dalam Penyelesaian Tugas Akhir

Kepada yang Terhormat Bapak/Ibu,
Pimpinan PT. PLN IP UBP Tello

Di -

Tempat

Assalamu 'Alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Dengan Rahmat Allah SWT, Sehubungan dengan rencana penelitian tugas akhir, mahasiswa Universitas Muhammadiyah Makassar tersebut di bawah ini :

No	NIM	NAMA	JUDUL
1	10582 11023 21	Andika Haspril	MODEL DAN SIMULASI KINERJA RELAI DIFERENSIAL – FASE GENERATOR PLTG TELLO TERHADAP HUBUNG SINGKAT SIMETRIS DI SEPANJANG BELITAN STATOR BERBASIS PL PSCAD/EMTDC
2	10582 11025 21	Kamelia	

Untuk Keperluan diatas, kiranya dapat diberikan izin untuk Pengambilan Data mulai 1 Bulan guna keperluan penelitian. Dengan Data Sebagai Berikut:

1. Data Relai Diferensial dan Setting Relai Diferensial untuk Generator PLTG Tello
2. Data Diagram Segaris GI 150 KV Tello
3. Data Nameplate Generator PLTG Tello
4. Data Nameplate Transformator PLTG Tello

Data di atas diperlukan dalam rangka penyelesaian Tugas Akhir pada Fakultas Teknik Prodi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Makassar.

Demikian permohonan kami atas perhatian dan kerjasama Bapak/Ibu di haturkan banyak terima kasih.

Jazakumullah Khaeran Katsiran

Wasalamu 'Alaikum warahmatullah Wabarakatuh

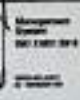
Dekan,



Reza M. Syafaat S Nuba, S.T, M.T.,JPM
NIM 10582 11023 21

Terhormat Kepada Yang Terhormat,

1. Dekan Fakultas Teknik
2. Ketua Prodi Teknik Elektro
3. Tata Usaha
4. Arsip



Nomor : 0811/STH.01.04/PLNIP280000/2025
 Lampiran : 1 Lembar
 Sifat : Segera - Biasa
 Hal : PERETUJUAN PENGAMBILAN DATA

16 Juli 2025

Kepada

Yth. Dekan Bidang Akademik
 Universitas Muhammadiyah
 Makassar

Jln. Sultan Alauddin No 259
 Makassar – Sulawesi Selatan

Menindaklanjuti Surat dari Dekan Bidang Akademik Universitas Muhammadiyah Makassar Nomor 522/05/C.4-VI/VII/47/2025 tanggal 14 Juli 2025 Perihal Permohonan Pengambilan Data dengan ini disampaikan bahwa kami menerima Mahasiswa/i dari Universitas Muhammadiyah Makassar untuk melaksanakan Pengambilan Data di PT PLN Indonesia Power Unit Bisnis Pembangkitan Tello.
 Dengan Judul :

**MODEL DAN SIMULASI KINERJA RELAI DIFERENSIAL – FASE GENERATOR PLTG
 TELLO TERHADAP HUBUNG SINGKAT SIMETRIS DI SEPANJANG BELITAN
 STATOR BERBASIS PL PSCAD/EMTDC**

Mulai Penelitian 29 Juli s.d 29 Agustus 2025

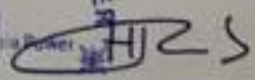
Mahasiswa/i tersebut adalah :

No	Nama	NIM	Prodi	Lokasi
1.	Andika Haspri	105821102321	Teknik Elektro	UP PLTG Tello
2.	Kamelia	105821102521		

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 sertivikat 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.

PLN INDONESIA POWER
MANAGER,

HARIADY BAYU AJI
UBP TELLO





**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 : Andika Haspri / Kamelia

Nim : 105821102321 / 105821102521

Program Studi : Teknik Elektro

Dengan nilai:

No	Bab	Nilai	Ambang Batas
1	Bab 1	9%	10 %
2	Bab 2	25%	25 %
3	Bab 3	7%	10 %
4	Bab 4	2%	10 %
5	Bab 5	5%	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, 22 Agustus 2025

Mengetahui,

Kepala UPT- Perpustakaan dan Penerbitan,


Nurhidayah, S.Hum, M.I.P
NBM.964.591