

SKRIPSI

**MODEL PENERAPAN DAN SIMULASI RELAI JARAK-TANAH DI
PENYULANG RINDAM PLN SULSELRABAR MENGGUNAKAN
PERANGKAT LUNAK *PSCAD***



Oleh :

NUR HIKMAH AFSA : 105821101721

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR

2025

**MODEL PENERAPAN DAN SIMULASI RELAI JARAK-TANAH DI
PENYULANG RINDAM PLN SULSELBAR MENGGUNAKAN
PERANGKAT LUNAK *PSCAD*
SKRIPSI**

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat
Untuk Menyelesaikan Strata Satu (S1)
Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Makassar

Disusun dan Diajukan oleh:

Nur Hikmah Afsa

105821101721

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK**

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR

2025



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

PENGESAHAN

Skripsi atas nama **Nur Hikmah Afsa** dengan nomor induk Mahasiswa 105 82 11017 21, dinyatakan diterima dan disahkan oleh Panitia Ujian Tugas Akhir/Skripsi sesuai dengan Surat Keputusan Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar Nomor : 0006/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, 30 Agustus 2025.

Panitia Ujian :

Makassar, 12 Rabiul Awal 1447 H
04 September 2025 M

1. Pengawas Umum

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. Ir. Zahir Zainuddin, M.Sc

b. Sekretaris : Dr. Hj. Rossy Timur Wahyuningsih, S.T., M.T

3. Anggota : 1. Dr. Ir. Ridwang, S.Kom, M.T, IPM

2. Andi Abd Halik Lateko TJ, S.T., M.T., Ph.D

3. Rizal Ahdiyat Duyo, S.T., M.T

Mengetahui :

Pembimbing I

Pembimbing II

Andi Fajaruddin, S.T., M.T

U. Abdul Hafid, M.T

Dekan



Dr. Muh. Syafar S Kuba, S.T., M.T., IPM

NIP : 975 288

Gedung Menara Iqra Lantai 3

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

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





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 PENERAPAN DAN SIMULASI KINERJA RELAI JARAK - TANAH DI PENYULANG RINDAM PLN SULSELBARAR MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK PSCAD**

Nama : 1. Nur Hikmah Afsa

Stambuk : 1. 105 82 11017 21

Makassar, 04 September 2025

Telah Diperiksa dan Disetujui
Oleh Dosen Pembimbing;

Pembimbing I

Andi Faharuddin, S.T., M.T

Pembimbing II

Ir. Abdul Hafid, M.T

Mengetahui,

Ketua Prodi Teknik Elektro



Ir. Rahmania, S.T., M.T

NBM : 1005 971



KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirrahim

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabaraatuh

Puji Syukur Alhamdulillah penulis panjatkan kehadiran Allah SWT, karena Rahmat dan HidayahNyalah sehingga penulis dapat menyusun judul skripsi ”**Model Penerapan Dan Simulasi Kinerja Relai Jarak-Tanah di Penyulang Rindam PLN SULSELBAR Menggunakan Perangkat Lunak *PSCAD***” sebagai tugas akhir dan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik,Universitas Muhammadiyah Makassar.

Dalam penyusunan skripsi ini, kami berusaha memberikan uraian yang jelas, sistematis, dan komprehensif agar dapat menjadi acuan dalam pelaksanaan program atau kegiatan yang direncanakan. Kami menyadari bahwa penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari dukungan, saran, dan masukan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, kami menyampaikan penghargaan dan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyelesaian skripsi ini.

1. Bapak Ir.Muhammad Syafaat,ST.,M.T Selaku Dekan Fakultas Teknik.
2. Ibu Rahmania, S.T., M.T., IPM Selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik.

3. Bapak Andi Faharuddin ST.,M.T, selaku Pembimbing I yang telah mengarahkan dan membimbing kami mulai dari persiapan penulisan skripsi sampai selesai dengan baik dan berkualitas.
4. Bapak Ir. Abdul Hafid, M.T, selaku Pembimbing II yang telah mengarahkan dan membimbing kami mulai dari persiapan penulisan skripsi sampai selesai dengan baik dan berkualitas.
5. Seluruh dosen dan staf Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Makassar yang telah membimbing dan memberikan materi perkuliahan pada kami sebagai penulis.
6. Seluruh pegawai PT PLN (Persero) ULTG Panakkukang terkhusus Bapak Zainnudin selaku Team Leader Jaringan Transmisi dan Gardu Induk Panakkukang yang telah memberikan dukungan dan kebaikan hati dalam memberikan data dan informasi yang sangat membantu dalam penyusunan skripsi.
7. Seluruh pegawai PT PLN (Persero) UP3 Makassar Selatan terkhusus Bapak Galih Dion Pratama, selaku Team Leader Operasi Jaringan Distribusi yang telah memberikan dukungan dan kebaikan hati dalam memberikan data dan informasi yang sangat membantu dalam penyusunan skripsi.
8. Ayahanda dan ibu tercinta kami, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya atas segala limpahan kasih sayang doa dan

pengorbanan terutama dalam bentuk materi dalam menyelesaikan perkuliahan kami.

9. Saudara-saudaraku serta rekan-rekan mahasiswa fakultas teknik terkhusus angkatan 2021 yang dengan keakraban dan persaudaraan banyak membantu dalam menyelesaikan tugas akhir kami ini.

Semoga semua pihak tersebut di atas mendapatkan pahala yang berlipat ganda di sisi Allah Swt. dan skripsi yang sederhana ini dapat bermanfaat bagi kami sebagai penulis, rekan-rekan dan masyarakat serta bangsa dan negara.

Fastabiqul Khairat

Wassalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

MOTO

“Allah tidak akan membebani melainkan sesuai dengan kesanggupannya.”

(Q.S Al-Baqarah:286)

“Selalu ada harga dalam sebuah proses. Nikmati saja lelah-lelahnya itu. Lebarakan lagi rasa sabar itu. Semua yang kau investasikan untuk menjadikan dirimu serupa yang kau impikan, mungkingtidak akan selalu berjalan lancar. Tapi, gelombang-gelombang itu bisa kau ceritakan.” (Boy Candra)

Masa depan adalah milik mereka yang percaya dengan impiannya dan jangan biarkan impianmu dijajah oleh pendapat orang lain

ABSTRAK

Relai jarak-tanah merupakan solusi proteksi untuk mendeteksi gangguan hubung singkat satu fase ke tanah di sistem distribusi, pada sistem tenaga listrik. Penelitian ini memodelkan aplikasi relai jarak-tanah pada Penyulang Rindam, PLN SULSELBAR, menggunakan perangkat lunak *Power System ComputerAided Design (PSCAD)* versi pelajar. Simulasi dilakukan untuk kondisi operasi berbeda yakni berupa kondisi normal atau abnormal. Kondisi abnormal disimulasikan pada beberapa titik gangguan berbeda sepanjang penyulang (25, 50, 75 dan 85% dari posisi relai). Perubahan impedans sistem akibat kondisi operasi yang berbeda tersebut pada akhirnya akan direpresentasikan oleh respons relai, berupa pengiriman sinyal blok atau *trip* ke CB.

Komponen utama dari model antara lain berupa *CT* dan *VT* masing-masing sebagai sensor arus dan tegangan pada sistem distribusi, yang kemudian dikonversi menjadi besaran fasor arus dan tegangan oleh komponen *frequency scanner*. Selanjutnya, fasor arus dan tegangan akan menjadi masukan bagi prosesor-impedans, yang pada akhirnya dianalisis oleh algoritma relai jarak-tanah untuk menentukan keadaan operasi sistem, apakah merupakan kondisi normal atau gangguan, yang dapat terlihat dalam *display*.

Hasil simulasi menunjukkan model relai jarak-tanah ini, tanggap terhadap kondisi operasi sistem baik saat kondisi normal maupun abnormal. Relai mengeluarkan respons sinyal blok untuk kondisi normal sedangkan terhadap kondisi abnormal dengan lokasi gangguan 25, 50, hingga 85% dari relai, ia mengirimkan sinyal *trip* ke CB. Model ini memperlihatkan kinerja yang sangat memuaskan dalam memproteksi sistem distribusi Penyulang Rindam, PLN SULSELBAR.

Kata Kunci: Relai Jarak Tanah, Gangguan Satu Fase Ke Tanah, *PSCAD*, Penyulang Rindam, Sistem Proteksi.

ABSTRACT:

The ground distance relay is a protection solution designed to detect single-phase-to-ground short-circuit faults in distribution systems within power networks. This study models the application of the ground distance relay on the Rindam Feeder, PLN SULSELBAR, using the Power System Computer-Aided Design (PSCAD) software student version. Simulations were conducted under different operating conditions, specifically normal and abnormal conditions. The abnormal conditions were simulated at several fault points along the feeder (25%, 50%, 75%, and 85% of the relay location). Changes in system impedance due to these varying operating conditions are ultimately represented by the relay's response, which sends either a block or trip signal to the circuit breaker (CB).

The main components of the model include CTs and VTs, serving as current and voltage sensors, respectively, in the distribution system. These are converted into current and voltage phasors by a frequency scanner component. Then, these phasors are input to an impedance processor, which is analyzed by the ground distance relay algorithm to determine the system's operating state, identifying whether it is a normal condition or a fault, as shown on the display.

Simulation results show that this ground distance relay model responds effectively to both normal and abnormal system operating conditions. The relay issues a block signal under normal conditions, whereas for abnormal conditions with faults located at 25%, 50%, and up to 85% from the relay, it sends a trip signal to the CB. This model demonstrates very satisfactory performance in protecting the Rindam Feeder distribution system at PLN SULSELBAR.

Keywords: Ground distance relay, power system protection, PSCAD, Rindam Feeder, Protection System

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
MOTO.....	vii
ABSTRAK.....	vii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR ISTILAH	xvi
BAB I	1
PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	4
C. Tujuan Penelitian.....	4
D. Manfaat Penelitian.....	4
E. Batasan Masalah.....	4

F. Sistematika Penulisan.....	5
BAB II.....	7
TINJAUAN PUSTAKA.....	7
A. Umum.....	7
B. Gangguan Hubung Singkat.....	7
C. Rangkaian Ekvivalen.....	24
D. Sistem Proteksi.....	25
E. Jenis Relai proteksi	32
F. Perangkat Lunak PSCAD.....	48
BAB III.....	42
METODE PENELITIAN.....	42
A. Waktu dan Tempat Penelitian.....	42
B. Alat dan Bahan.....	42
C. Skema.....	43
D. Data Penelitian	48
E. Langkah Penelitian	53
BAB IV	55
HASIL DAN PEMBAHASAN.....	55
A. Konfigurasi dan Model <i>PSCAD</i>	55

B. Pemodelan Sumber Thevenin.....	57
C. Model Saluran Penyulang Borongloe.....	58
D. Diagram Segaris	61
E. Pemodelan Sistem pada <i>PSCAD</i>	62
BAB V.....	85
PENUTUP.....	85
A. Kesimpulan.....	85
B. Saran.....	86
DAFTAR PUSTAKA.....	87
LAMPIRAN.....	89

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Representasi Tipe Gangguan pada Saluran Transmisi	11
Gambar 2.2 Representasi Komponen Simetris	16
Gambar 2.3 Penguraian Fasor tak Seimbang ke dalam Komponen Simetris...	17
Gambar 2.4 Ekuivalensi antara dua nilai MVAsc yang paralel gangguan di F..	23
Gambar 2. 5 Ekuivalensi antara dua nilai MVAsc yang seri gangguan di F	23
Gambar 2. 6 Daerah Asuhan Proteksi	30
Gambar 3.1 Konfigurasi Gangguan	32
Gambar 3.2 Konfigurasi Normal.....	33
Gambar 3.3 Flowcart.....	42
Gambar 4.1 Konfigurasi Gnagguan	43
Gambar 4.2 Konfigurasi Normal.....	44
Gambar 4.3 Relai Jarak Kondisi Normal	45
Gambar 4.4 Model Sistem Relai Jarak.....	51
Gambar 4.5 <i>Output</i> Program Kondis Normal	52
Gambar 4.6 <i>Display</i> Kondisi Normal	53
Gambar 4.7 Model <i>PSCAD</i> Relai Jarak Kondisi Gangguan 25%.....	54
Gambar 4.8 Model Relai Jarak.....	55
Gambar 4.9 <i>Output</i> Kondisi Gangguan 25%	56
Gambar 4.10 <i>Display</i> Kondisi Gangguan 25%.....	57


Gambar 4.11 Model <i>PSACD</i> Relai Jarak Kondisi Gangguan 50%.....	58
Gamabr 4.12 <i>Output</i> Kondisi Gangguan 50%	60
Gambar 4.13 <i>Display</i> RelaiKondisi Ganguan 50%.....	61
Gambar 4.14 Model <i>PSCAD</i> Relai Jarak Kondisi Gangguan 75%.....	62
Gambar 4.15 Model Relai Jarak.....	64
Gambar 4.16 Model <i>PSCAD</i> Relai Jarak Kondisi Gangguan 85%.....	64
Gambar 4.17 Model Relai Jarak.....	67
Gamabr 4.18 <i>Output</i> Relai Kondisi Gnagguan 85%.....	68
Gambar 4.19 <i>Display</i> Relai Kondisi gangguan 85%	69

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Data Hubung Singkat	37
Tabel 3.2 Data Impedans Penyulang	37
Tabel 3.3 Data Beban Maksimum Penyulang Rindam	37
Tabel 4.1 Data Tegangan dan Arus Hubung Singkat GI Borongloe	45
Tabel 4.2 Impedans Jenis	46



Daftar Istilah



CT	: <i>Current Transformers</i>
F	: frekuensi
$GOCR$: <i>Ground Overcurrent Relai</i>
I_f	: Arus gangguan (ampere)
I_{sc}	: Arus hubung-singkat tiga fase (ampere,A).
KV_{LL}	: Tegangan antar-fase
K_v	: Kilovolt
L	: Induktans (H)
MVA_{SC-T}	: MVA_{sc} total (sistem)
OCR	: <i>Overcurrent Relai</i>
$PSCAD$: <i>Power System Computer Aided Design</i>
R	: Resistans (ohm)
R_i	: Tegangan pada hambatan i
R_{TH}	: Hambatan Thevenin
S_{Th}	: Daya hubung-singkat tiga fase (volt-ampere atau VA)
V_f	: Tegangan gangguan (volt)
VT	: <i>Voltage Transformers</i>
V_{TH}	: Tegangan Thevenin
V_{LL}	: Tegangan garis-ke-garis (<i>line-to-line-voltage</i>) (V).

X_c : Reaktansi Kapasitif (ohm)

X_L : Reaktansi induktif (ohm)

Z_f : Impedansi gangguan (ohm)

Z : Impedansi (ohm)

π : konstnsnta phi

$\sqrt{3}$: konstanta perhitungan daya pada sistem tiga fase.



BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Teknologi berkembang pesat dari waktu ke waktu. Listrik adalah sumber energi kehidupan modern seperti yang kita kenal saat ini. Menurut Sugiono (2014), listrik memiliki kemampuan untuk berubah menjadi beberapa jenis energi, termasuk panas, cahaya, energi kimia, dan gerak.

Setiap beban yang menggunakan listrik harus selalu memiliki akses ke daya yang disediakan oleh sistem tenaga listrik. Sayangnya, hubung singkat merupakan tantangan umum dan tak terhindarkan bagi kelangsungan sistem ini. Akibatnya, menghindari atau mencegah dampak gangguan ini adalah satu-satunya cara untuk mengatasinya.

Ketika diberi daya oleh tegangan sistem yang tepat, relai dapat mengidentifikasi jika ada yang salah. Hubung singkat mengganggu sistem kelistrikan dan melepaskan energi dalam jumlah besar, yang dapat merusak komponen-komponen sistem. Relai arus lebih fase (*Overcurrent Relai, OCR*) dan relai arus lebih tanah (*Ground Overcurrent Relai, GOCR*) adalah dua jenis utama relai arus lebih yang digunakan dalam sistem distribusi untuk tujuan proteksi.

Model perangkat lunak dari relai proteksi dapat membantu untuk mengetahui kinerja dari relai proteksi sebelum penerapan atau pengaplikasiannya. Menurut Liu dkk. (2004) pemodelan dan pengujian

perangkat lunak relai proteksi telah menjadi isu penting dalam bidang penelitian relai. Beberapa model dan simulasi relai individual telah dikembangkan dalam beberapa tahun terakhir. Sebuah laporan berjudul Model Perangkat Lunak untuk relai telah dipresentasikan oleh Komite Relai Sistem Daya *IEEE* dan memberikan ringkasan simulasi relai antara lain model relai SEL321.

Relai arus lebih yang digunakan pada sistem penyaluran daya dapat mempunyai kekurangan-kekurangan berupa respons yang terlalu lambat atau juga kurang selektif (Mason, 1956). Demikian pula, menurut Adrianti dkk. (2020), relai arus lebih juga akan mengalami kesulitan apabila terdapat pembangkit-terdistribusi (*distributed-generation, DG*), pada sistem distribusi.

Pembesaran beban pada penyulang ini akan mengakibatkan potensi arus lebih yang semakin besar apabila terjadi gangguan hubung singkat. Saat terjadi gangguan hubung singkat maka boleh jadi respons dari *OCR* dan *GOCR* itu terkategori lambat sehingga akan memengaruhi kinerja sistem proteksi. Demikian pula, pembesaran beban dan kompleksitas koordinasi proteksi *OCR* dan *GOCR* ini menjadi lebih kompleks sehingga lebih mudah terjadi kesalahan koordinasi. Oleh karena itu pada kondisi demikian relai jarak akan memberikan sistem proteksi yang lebih baik (Mason, 1956).

Sebagaimana yang terlihat sakhir-akhir ini, bahwa dinamika perkembangan bangunan fasilitas pada sekitar daerah suplai dari penyulang di atas itu berkembang cepat dari hari ke hari. Hal ini akan berdampak pada pembesaran beban atau arus di penyulang di atas. Oleh karena itu dianggap perlu untuk melakukan pemodelan penggunaan relai jarak tanah pada Penyulang Rindam untuk memprediksi atau melihat kinerja sistem proteksinya apabila diadakan *upgrading* dari relai arus lebih ke relai jarak. Perangkat lunak yang akan digunakan dalam pemodelan tersebut adalah *Power System Computer Aided Design (PSCAD)*. Model yang sudah dihasilkan dapat disimulasikan sehingga performa relai jarak dalam memproteksi Penyulang Rindam terhadap gangguan hubung singkat dapat diketahui.

Pemodelan dan pengujian perangkat lunak relai proteksi telah menjadi isu penting dalam bidang penelitian relai. Beberapa model dan simulasi relai individual telah dikembangkan dalam beberapa tahun terakhir. Sebuah laporan berjudul Model Perangkat Lunak untuk relai telah dipresentasikan oleh Komite Relai Sistem Daya IEEE dan memberikan ringkasan simulasi Relai.

B. Rumusan Masalah

Dengan latar belakang ini, tantangan-tantangan berikut dapat diidentifikasi untuk penelitian ini:

1. Bagaimana model relai jarak-tanah yang diaplikasikan di Penyulang Rindam, PLN SULSELRABAR ?
2. Bagaimana kinerja dari model tersebut di atas?

C. Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai untuk pembuatan tugas akhir berikut yakni:

1. Untuk menghasilkan model aplikasi relai jarak-tanah yang diaplikasikan di Penyulang Rindam, PLN SULSERABAR.
2. Untuk mengetahui kinerja dari model-model tersebut.

D. Manfaat Penelitian

Manfaat dari riset berikut ialah:

1. Dapat dijadikan bahan pertimbangan bagi PLN SULSERABAR apabila ada rencana meng-*upgrade* *GOCR* ke relai jarak.
2. Menambah pengetahuan atau wawasan penulis dalam pengaplikasian elai jarak pada sistem distribusi.

E. Batasan Masalah

Terdapat juga pembatasan permasalahan yang akan dianalisis pada riset ini yakni:

1. Gangguan yang ditinjau hanyalah gangguan satu fase ke tanah dan relai jarak yang dimodelkan dan relai jarak yang mendeteksi gangguan ke tanah
2. Hanya relai fase-A yang dimodelkan.
3. Rasio *CT* (*Current Transformers*) dan *VT* (*Voltage Transformers*) diasumsikan 1:1

F. Sistematika Penulisan

Secara mendasar penyusunan proposal ini adalah sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

Bagian ini memberikan konteks untuk keseluruhan laporan dengan menguraikan sejarah, rumusan masalah, kendala, tujuan, dan manfaat penelitian.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Landasan teoretis dari judul penelitian dirinci dalam bagian ini.

BAB III : METODELOGI PENELITIAN

Bagian ini merinci teknik penelitian, yang menjabarkan tahapan-tahapan dalam melakukan penelitian, serta waktu dan tempat penelitian, bahan dan instrumen yang digunakan, dan diagram blok atau diagram sirkuit yang relevan.

BAB IV : HASIL DAN PENELITIAN

Mengenai judul penelitian, bagian ini merinci temuan, metode, perhitungan, dan komentar.

BAB V : SARAN DAN KESIMPULAN

Pemikiran dan rekomendasi akhir yang berkaitan dengan judul penelitian melengkapi bagian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Bab ini Berisi tentang daftar sumber referensi penulis dalam memilih teori yang relevan dengan judul penelitian.

LAMPIRAN

Berisi tentang dokumentasi hasil penelitian serta alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Umum

Setiap beban yang terhubung ke sistem tenaga listrik harus memiliki akses ke energi listrik yang dibutuhkan oleh sistem. Dalam sistem tenaga listrik, hubung singkat merupakan sumber gangguan yang umum dan tak terhindarkan yang dapat membahayakan kontinuitas ini. Tidak ada pilihan selain mencoba mencegah atau mengurangi dampak gangguan serupa di masa mendatang.

Arismunandar dan Kuwara (1975) menyatakan bahwa pembangkit listrik, saluran transmisi, dan saluran distribusi merupakan tiga komponen utama sistem tenaga listrik. Dalam kasus yang jarang terjadi, saluran subtransmisi komponen keempat juga ditemukan. Semua beban individual dihubungkan bersama melalui sistem distribusi. Dari saluran subtransmisi hingga ke pusat beban, sistem distribusi dimulai.

B. Gangguan Hubung Singkat

1. Pengertian Gangguan

Anomali dalam sistem tenaga listrik dikenal sebagai gangguan. Masalah pada generator, pemutus arus, transformator, saluran transmisi, dan sistem distribusi tidak dapat dihindari dalam setiap sistem tenaga

listrik. Ketika arus berhenti mengalir secara normal dalam suatu rangkaian, kita mengatakan bahwa terdapat masalah. Stevenson (1990)

Menurut Wadhwa (1986), secara garis besar, klasifikasi gangguan pada sistem tenaga listrik adalah

- (1) gangguan paralel '*shunt faults*' (hubung-singkat);
- (2) gangguan seri '*series faults*' (rangkaiian-terbuka).

Tipe gangguan paralel melibatkan konduktor daya yang dapat berupa hubung-singkat konduktor daya dengan tanah atau antar konduktor. Ketika rangkaian dilayani oleh sekering atau suatu alat yang tidak membuka ketiga fase secara sekaligus, satu atau dua fase rangkaian mungkin terbuka, sementara fase lainnya dalam keadaan tertutup. Kasus tersebut disebut tipe gangguan seri. Tipe gangguan seperti ini bisa juga terjadi akibat satu atau dua konduktor yang putus. Gangguan paralel dicirikan oleh kenaikan arus dan jatuhnya tegangan serta frekuensi, sementara gangguan seri dicirikan oleh kenaikan tegangan dan frekuensi serta jatuhnya arus pada fase yang terganggu.

Tipe gangguan paralel diklasifikasikan sebagai gangguan satu-fase ke tanah, gangguan dua-fase, gangguan dua-fase ke tanah, serta gangguan tiga-fase. Tiga gangguan pertama yang tersebut di atas, adalah gangguan taksimetris atau takseimbang. Gangguan yang tersebut terakhir yakni tiga-fase, adalah gangguan simetris atau seimbang.

Tipe gangguan seri diklasifikasikan sebagai satu-konduktor terbuka serta dua-konduktor terbuka. Gangguan tersebut juga mengganggu kesimetrian pada satu atau dua fase. sehingga, juga merupakan gangguan takseimbang.

Kecuali didahului atau disebabkan oleh suatu gangguan, rangkaian-terbuka pada sistem tenaga jarang terjadi. Sebagai konsekuensinya, sangat sedikit sistem relai yang dirancang khusus untuk menyediakan proteksi rangkaian-terbuka. Suatu perkecualian adalah dalam sistem tegangan yang lebih rendah, yang mana sekering dapat terbuka.

Gangguan simultan dalam dua bagian sistem tenaga, pada umumnya menyebabkan kemustahilan bagi relai untuk bekerja sebagaimana mestinya. Jika gangguan simultan terjadi di dalam zona kerja relai, paling sedikit satu set relai mungkin akan bekerja, dengan operasi urutan berikut dari relai lain yang “melihat” gangguan tersebut. Akan tetapi, bila gangguan tersebut “terlihat” sebagai gangguan di dalam dan di luar zona proteksi secara sekaligus, relai akan mengalami kesulitan untuk menentukan apakah harus “bekerja” atau “memblok”. Untungnya, gangguan simultan sangat jarang terjadi dan adalah bukan penyebab utama dari kesalahan kerja relai (Divisi Relai-Instrumen *Westinghouse Electric Corporation*, 1982).

Dilihat dari berat atau tidaknya akibat yang disebabkan oleh suatu gangguan, hubung-singkat memerlukan perhatian yang jauh lebih besar daripada rangkaian-terbuka, meskipun beberapa gangguan rangkaian-terbuka mungkin menimbulkan bahaya bagi orang yang menanganinya (Stevenson Jr., 1990).

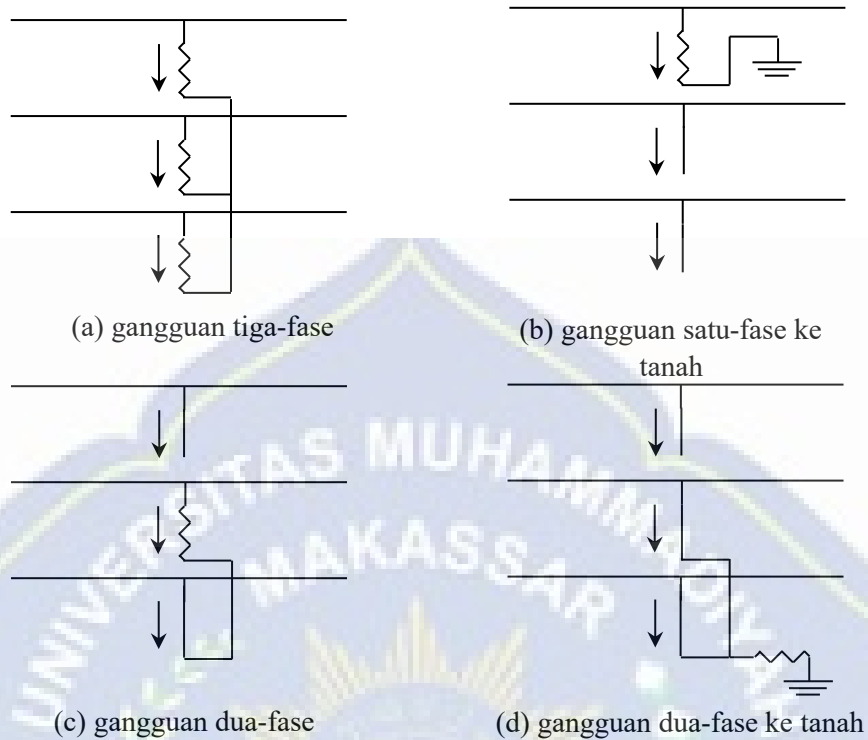
2. Tipe Gangguan Sistem Tenaga

Menurut Anderson (1999), tipe gangguan dalam sistem tenaga biasanya berupa gangguan tiga-fase, dua-fase, dua-fase ke tanah, atau satu-fase ke tanah. Probabilitas kejadiannya dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Bocoran (*breakdown*) isolasi antara ketiga fase dikenal sebagai gangguan tiga-fase, bocoran isolasi antara dua-fase dikenal sebagai gangguan dua-fase, bocoran isolasi antara dua-fase dengan tanah dikenal sebagai gangguan dua-fase ke tanah, serta bocoran isolasi antara satu-fase dengan tanah dikenal sebagai gangguan satu-fase ke tanah (Ravindranath dan Chander, 1977). Representasi gangguan-gangguan tersebut terlihat pada Gambar 2.1.

Tabel 2.1 Frekuensi keterjadian dari tipe gangguan berbeda pada saluran transmisi udara (Ravindranath dan Chander, 1977)

No.	Tipe Gangguan	Keterjadian (%)
1	Satu-fase ke tanah	85
2	Dua-fase	8
3	Dua-fase ke tanah	5
4	Tiga-fase	2 atau kurang



Gambar 2.1 Representasi tipe gangguan pada saluran transmisi (Stevenson Jr., 1990)

Dalam pelaksanaan studi-gangguan, dapat dilakukan penyederhanaan-penyederhanaan-termasuk ketika menggunakan program komputer digital-dengan jalan mengabaikan semua beban statis, semua resistans, kapasitans saluran transmisi, dan arus magnetisasi trafo (Stevenson Jr., 1990). Akibat penyederhanaan tersebut, jaringan yang mengalami gangguan dimisalkan tidak berbeban sebelum mengalami gangguan (Stevenson Jr., 1990; Grainger dan Stevenson Jr., 1994; Saadat, 1999). Hal ini berarti, tidak ada arus yang mengalir sebelum gangguan dan semua tegangan jaringan adalah sama yaitu V_f . Biasanya, nilai V_f adalah $1\angle 0^\circ$ per unit.

Menurut Paithankar (1998), pada umumnya jika gangguan tidak diputuskan dengan baik, maka akan terjadi hal-hal seperti berikut.

1. Generator, trafo, rel, dan peralatan lain, akan rusak akibat pemanasan lebih (*overheating*) dan gaya mekanis tiba-tiba yang terjadi.
2. Bahaya kebakaran dan kerusakan peralatan secara permanen. Kebakaran dapat juga meluas dalam gardu, kecuali kalau arus gangguan dieliminir oleh peralatan relai dan pemutus-daya yang tepat.
3. Gangguan dapat mengurangi profil tegangan pada seluruh sistem, dan karena itu, mempengaruhi beban. Jatuh frekuensi bisa menuju ke ketidakstabilan di antara generator yang terinterkoneksi.
4. Gangguan taksimetris menghasilkan tegangan takseimbang dan menyebabkan arus-urutan negatif, yang mana akan menghasilkan pemanasan lebih.

Studi-gangguan akan menghasilkan data arus dan tegangan sistem tenaga selama kondisi gangguan. Informasi ini dibutuhkan dalam rangka mendesain sistem proteksi yang memadai serta menentukan kapasitas pemutus-daya pada setiap lokasi penyaklaran (*switching*). Sistem relai harus “mengenal” keberadaan gangguan dan memulai pembukaan pemutus-daya untuk mengisolir bagian yang terganggu. Aksi ini dibutuhkan untuk meminimalkan gangguan pelayanan kelistrikan serta membatasi kerusakan pada peralatan yang terganggu. Arus dan tegangan yang dihasilkan oleh berbagai tipe gangguan yang terjadi pada berbagai lokasi di sistem tenaga, harus dihitung guna menyediakan data yang cukup, untuk

merancang suatu sistem relai dan penyaklaran yang efektif (Stagg dan El-Abiad, 1968).

3. Dasar Komponen Simetris

Komponen simetris merupakan salah satu metode yang paling ampuh untuk menangani rangkaian berfase majemuk takseimbang (Stevenson Jr., 1990). Komponen simetris memungkinkan besaran-besaran fase takseimbang seperti arus dan tegangan, digantikan oleh tiga komponen simetris terpisah. Menurut teorema Fortescue, tiga fasor takseimbang dari sistem tiga-fase dapat diuraikan menjadi tiga sistem fasor yang seimbang. Himpunan seimbang komponen itu adalah sebagai berikut.

1. Komponen urutan-positif (*positive-sequence components*) yang terdiri atas tiga fasor yang sama besarnya, terpisah antara satu dengan lainnya dalam fase sebesar 120 derajat dan mempunyai urutan-fase yang sama dengan fasor aslinya.
2. Komponen urutan-negatif (*negative-sequence components*) yang terdiri atas tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lainnya dalam fase sebesar 120 derajat dan mempunyai urutan-fase yang berlawanan dengan fasor aslinya.
3. Komponen urutan-nol (*zero-sequence components*) yang terdiri atas tiga fasor yang sama besarnya dan dengan pergeseran fase, nol derajat, antara fasor yang satu dengan yang lainnya (Stevenson Jr., 1990).

Jenis komponen urutan yang akan ada, tergantung pada tipe gangguan yang terjadi. Hal tersebut disajikan selengkapnya dalam Tabel 2.2.

Menurut Saadat (1999), dalam sistem tiga-fase, urutan-fase didefinisikan sebagai urutan di mana mereka melalui suatu maksimum positif. Representasi fasor dari suatu arus seimbang tiga-fase diperlihatkan dalam Gambar 2.2(a).

Menggunakan konvensi yang menyatakan bahwa arah perputaran fasor adalah berlawanan dengan arah jarum jam, ketiga fasor tersebut dapat dituliskan sebagai

$$\begin{aligned} I_a^1 &= I_a^1 \angle 0^\circ = I_a^1 \\ I_b^1 &= I_a^1 \angle 240^\circ = a^2 I_a^1 \\ I_c^1 &= I_a^1 \angle 120^\circ = a I_a^1 \end{aligned} \quad (2.1)$$

dengan I_a^1 , I_b^1 , dan I_c^1 , secara berurut adalah arus urutan-positif fase-A, fase-B, dan fase-C, sementara huruf a adalah bilangan kompleks yang mempunyai magnitudo satu dan sudut 120 derajat.

Tabel 2.2 Jenis komponen urutan yang ada pada setiap tipe gangguan
(GE Power Management, 2001)

Tipe Gangguan	Komponen Urutan		
	Positif	Negatif	Nol
Satu-Fase ke Tanah	ada	ada	ada
Dua-Fase	ada	ada	tidak ada
Dua-Fase ke Tanah	ada	ada	ada
Tiga-Fase	ada	tidak ada	tidak ada

Terlihat dalam persamaan (2.1), telah didefinisikan suatu operator a yang menyebabkan rotasi 120 derajat ke arah yang berlawanan dengan arah jarum jam, sedemikian hingga

$$\begin{aligned} a &= 1\angle 120^\circ = -0,5 + j0,866 \\ a^2 &= 1\angle 240^\circ = -0,5 - j0,866 \\ a^3 &= 1\angle 360^\circ = 1 + j0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

Persamaan di atas jelas memperlihatkan bahwa

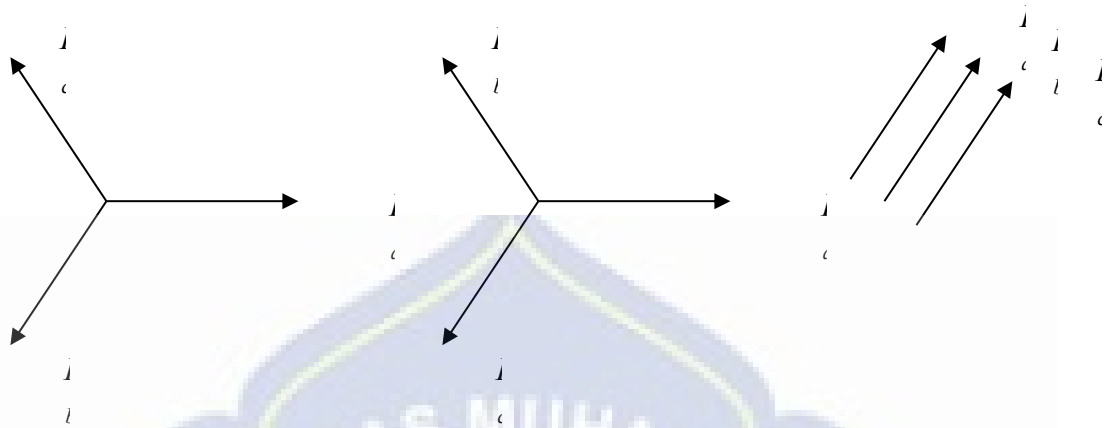
$$1 + a + a^2 = 0 \quad (2.3)$$

Urutan fasor tersebut adalah abc . Ini menandakan “urutan-fase-positif”.

Ketika urutannya adalah acb seperti Gambar 2.2(b), hal itu menandakan “urutan-fase-negatif”. Besaran-besaran urutan-fase-negatif direpresentasikan oleh

$$\begin{aligned} I_a^2 &= I_a^2 \angle 0^\circ = I_a^2 \\ I_b^2 &= I_a^2 \angle 120^\circ = a I_a^2 \\ I_c^2 &= I_a^2 \angle 240^\circ = a^2 I_a^2 \end{aligned} \quad (2.4)$$

dengan I_a^2 , I_b^2 , dan I_c^2 , secara berurut adalah arus urutan-negatif fase-A, fase-B, dan fase-C.



Gambar 2.2 Representasi komponen simetris: (a) urutan-fase-positif (b) urutan-fase-

Besaran-besaran urutan-fase-nol direpresentasikan oleh

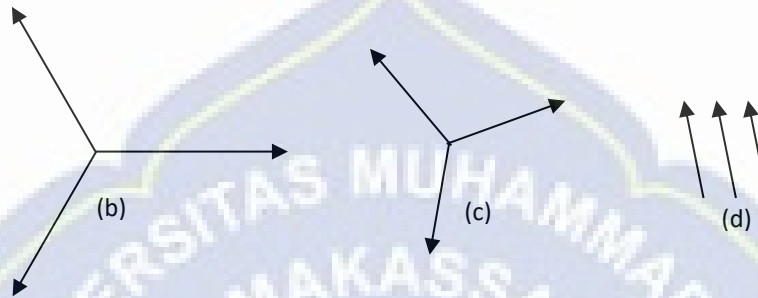
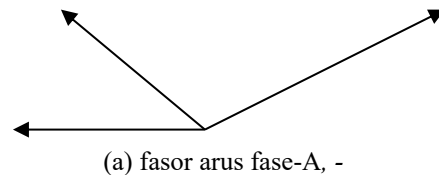
$$I_a^0 = I_b^0 = I_c^0 \quad (2.5)$$

dengan I_a^0 , I_b^0 , dan I_c^0 , secara berurut adalah arus urutan-nol fase-A, fase-B, dan fase-C. Tikatas (*superscripts*) 1, 2, dan 0, secara berurut masing-masing digunakan untuk merepresentasikan arus urutan-positif, -negatif, dan -nol.

Arus-arus takseimbang I_a , I_b , dan I_c , ditampilkan oleh Gambar 2.3(a). Arus-arus tersebut terurai ke dalam komponen simetrisnya sebagaimana terlihat pada Gambar 2.3(b), 2.3(c), dan 2.3(d). Ketiga komponen simetris arus tersebut adalah sedemikian hingga

$$\begin{aligned} I_a &= I_a^0 + I_a^1 + I_a^2 \\ I_b &= I_b^0 + I_b^1 + I_b^2 \\ I_c &= I_c^0 + I_c^1 + I_c^2 \end{aligned} \quad (2.6)$$

dengan I_a , I_b , dan I_c , secara berurut adalah arus fase-A, -B, dan -C.



Gambar 2.3 Penguraian fasor takseimbang ke dalam komponen simetrisnya
 (a) komponen urutan-positif (b) komponen urutan-negatif
 (c) komponen urutan-nol

Sesuai dengan definisi komponen simetris (persamaan (2.2), (2.4), dan (2.5)), persamaan (2.6) dapat ditulis ulang dalam bentuk komponen fase-A yakni

$$\begin{aligned} I_a &= I_a^0 + I_a^1 + I_a^2 \\ I_b &= I_a^0 + a^2 I_a^1 + a I_a^2 \\ I_c &= I_a^0 + a I_a^1 + a^2 I_a^2 \end{aligned} \quad (2.7)$$

atau

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Bila persamaan di atas ditulis ulang dalam notasi matriks, diperoleh

$$I^{abc} = A I_a^{012} \quad (2.9)$$

dengan A adalah “matriks transformasi komponen simetris” (*symmetrical components transformation matrix, SCTM*) yang akan mentransformasikan arus takseimbang I_{abc} ke dalam komponen simetrisnya I_a^{012} , yakni

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Menyelesaikan persamaan (2.9) untuk komponen simetris arus, akan menghasilkan

$$I_a^{012} = A^{-1} I^{abc} \quad (2.11)$$

Inversi matriks A dapat diperoleh, yakni

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Menyubtitusikan A^{-1} ke persamaan (2.11) akan menghasilkan

$$\begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Atau dalam bentuk komponen, komponen simetrisnya adalah

$$\begin{aligned} I_a^0 &= \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \\ I_a^1 &= \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c) \\ I_a^2 &= \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c) \end{aligned} \quad (2.15)$$

Persamaan (2.14) menunjukkan bahwa komponen arus urutan-nol adalah sama dengan sepertiga dari jumlah arus-fase. Ketika jumlah arus-fase adalah nol di sistem tiga-fase dengan netral yang tidak ditanahkan, arus urutan-nol tidak ada. Jika netral sistem tenaga ditanahkan, arus urutan-nol mengalir antara titik netral dengan tanah.

Dalam sistem tiga-fase, jumlah arus-saluran sama dengan arus I_n (arus-netral) dalam jalur kembali lewat netral, yakni

$$I_a + I_b + I_c = I_n \quad (2.17)$$

Perbandingan antara persamaan (2.14) dengan (2.17) akan menghasilkan

$$I_n = 3I_a^0 \quad (2.18)$$

4. Klasifikasi Gangguan Hubung Singkat

Masalah yang paling umum terjadi pada sistem tenaga listrik adalah hubung singkat, yang dapat menyebabkan arus yang sangat tinggi mengalir melalui peralatan yang tidak terlindungi.

1) Hubung Singkat Satu Fase ke Tanah

Ketika konduktor fase (tiang travel atau kabel arde pada saluran transmisi) sambaran petir ke tanah, terjadi hubung singkat dari satu fase ke bumi. Tidak akan ada efek jangka panjang dari kerusakan ini karena hanya terjadi sementara.

2) Hubung Singkat Dua Fase

Arka, Mudiana, dan Abasana (2016) dan Paramadita, Utama, dan Wijaya (2019) menyatakan bahwa ketika dua konduktor fase bersentuhan, hal ini menyebabkan arus lebih dan hubungan pendek dua fase. Pohon yang tertiup angin dapat menyebabkan *flashover*, yang dapat menyebabkan masalah ini. Biasanya, arus hubung singkat lebih rendah pada hubungan pendek dua fase dibandingkan dengan hubungan pendek tiga fase.

3) Hubung Singkat Tiga Fase

Ketika ketiga kabel fase terhubung, cacat hubungan pendek yang dikenal sebagai hubungan pendek tiga fase terjadi (Hendriyadi, 2017). Pohon tumbang yang tersangkut pada kabel jaringan merupakan salah satu sumber potensial masalah ini. Oleh karena itu, analisis arus hubung singkat wajib dilakukan.

4) Perhitungan Arus Hubung Singkat

Perhitungan arus hubung singkat adalah hal fundamental bagi setiap perencanaan pengembangan sistem distribusi. Ketika menggunakan pemutus daya (*Circuit Breaker*), nilai arus gangguan simetris dihitung lebih dahulu kemudian pengali asimetris yang sesuai digunakan untuk menghitung pengaruh komponen *DC*.

Analisis gangguan dilakukan di dalam lingkungan per unit. Kemudian besaran-besaran dikonversi ke nilai aktual dengan menggunakan besaran dasarnya masing-masing. Untuk suatu analisis gangguan dimana nilai resistansi tidak dianggap maka metode MVA_{sc} merupakan alan yang lebih simpel. Pada metode ini hanya dibutuhkan pengonversian impedansi peralatan ke MVA_{sc} -nya.

- a. komponen sistem di mana yang diketahui adalah nilai reaktansi komponen dalam persen (%) :

$$MVA_{sc} = \frac{MVA_{rated}}{\%X_{equip}} \quad (2.19)$$

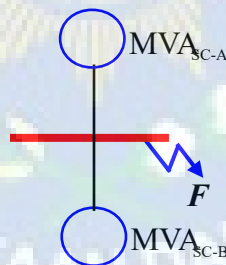
b. komponen sistem di mana yang diketahui adalah nilai reaktans

komponen dalam Ohm (Ω) :

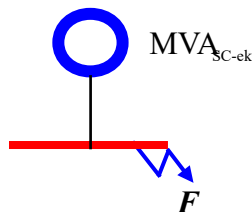
$$MVA_{sc} = \frac{(KV_{LL})^2}{X_{act.}} \quad (2.20)$$

Setelah memperoleh nilai MVA_{sc} setiap komponen, maka seluruhnya digabungkan hingga membentuk nilai MVA_{sc} tunggal yang mewakili sistem. Adapun cara yang dapat dilakukan untuk mengombinasikan MVA_{sc} satu dengan yang lainnya hingga diperoleh MVA_{sc} ekivalennya adalah:

1. Nilai MVA_{sc} yang terhubung paralel, langsung dijumlahkan untuk memperoleh nilai ekivalennya;



a. MVA_{sc-A} paralel dengan MVA_{sc-B}

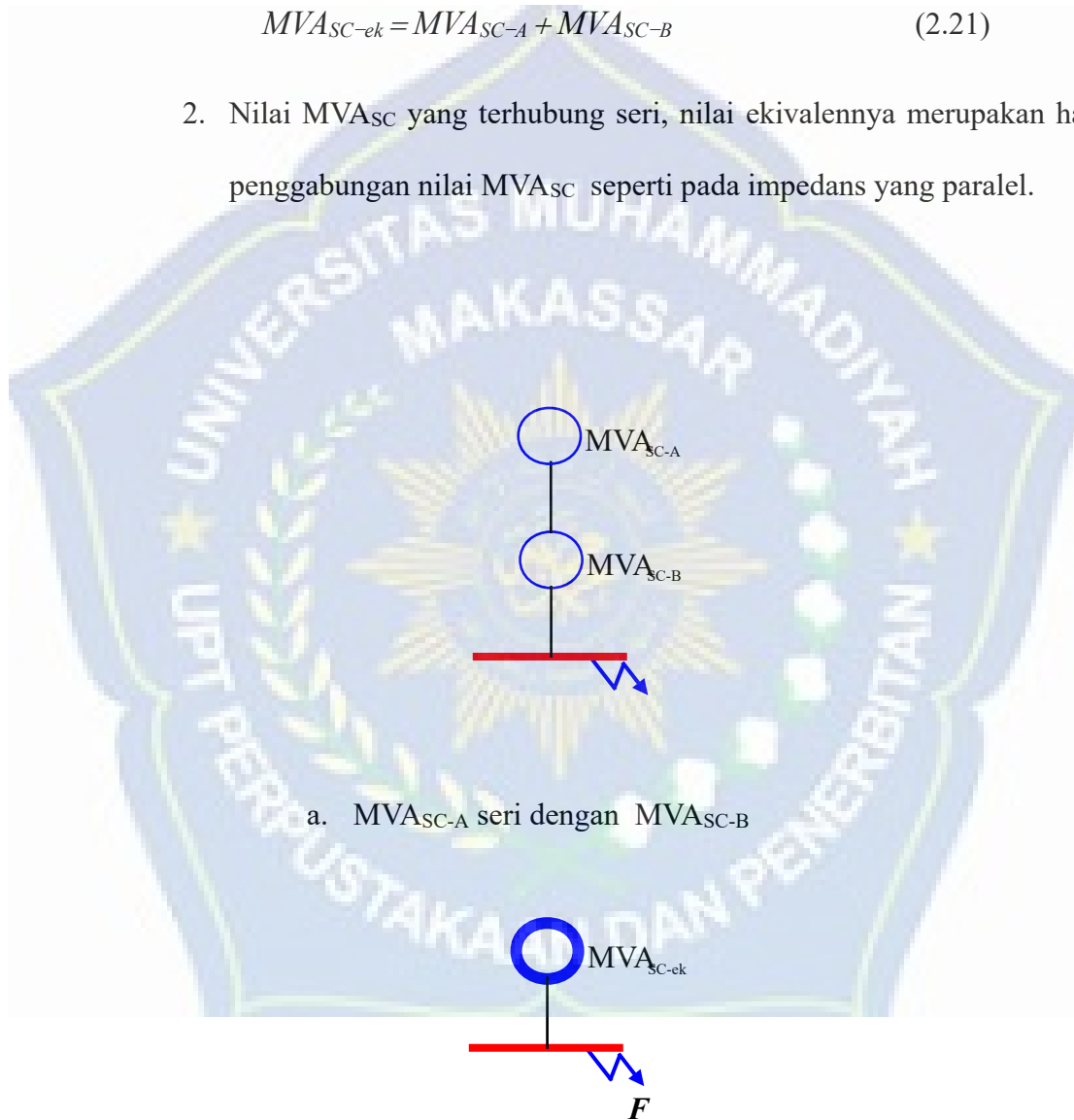


b. $MVA_{ekivalen}$ dari (a)

Gambar 2. 4 Ekvivalensi antara dua nilai MVA_{sc} yang paralel untuk gangguan di F

$$MVA_{SC-ek} = MVA_{SC-A} + MVA_{SC-B} \quad (2.21)$$

2. Nilai MVA_{sc} yang terhubung seri, nilai ekivalennya merupakan hasil penggabungan nilai MVA_{sc} seperti pada impedans yang paralel.



Gambar 2. 5 Ekvivalensi antara dua nilai MVA_{sc} yang seri untuk gangguan di F

Nilai gangguan simetris dititik gangguan (F), dapat diperoleh dengan menggunakan hubungan antara MVA_{SC} TOTAL (sistem) dengan tegangan pragangguan, sebagai berikut:

$$I_{SC} = \frac{MVA_{SC-T} \times 1000}{\sqrt{3}kVLL} \quad (2.22)$$

C. Rangkaian Ekvivalen Thevenin

Teorema Thevenin adalah teorema yang menyatakan bahwa rangkaian yang rumit dari suatu sirkuit dapat disederhanakan menjadi rangkaian setara Thevenin. Hal ini dapat memudahkan dalam melakukan pengukuran suatu rangkaian yang berbentuk rumit.

Rangkaian Thevenin seperti gambar berikut :



Gambar 2.6. Rangkaian Thevenin.

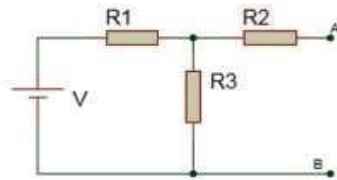
memiliki tegangan Thevenin dan hambatan Thevenin yang dapat diperoleh dari rumus:

$$V_{TH} = \frac{R_3}{R_1 + 3} \times V \quad (2.23)$$

dan

$$R_{TH} = R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} \quad (2.24)$$

Di mana R_1 , R_2 , R_3 dapat dilihat pada gambar (2.4)



Gambar 2.7. Rangkaian paralel ke R₃ dan seri ke R₂

Tegangan dan hambatan Thevenin dihitung secara matematis lalu tegangan Thevenin diukur dengan multimeter diatur sebagai voltmeter dan probe multimeter dihubungkan secara paralel ke R₃ dan seri ke R₂.

Teori Thevenin digunakan untuk menghitung arus hubung singkat pada titik gangguan. Arus hubung singkat ini merupakan parameter dalam menentukan setting relai proteksi, seperti relai arus lebih dan relai jarak.

Rumus hubung-singkat berdasarkan model Thevenin adalah

$$S_{Th} = \sqrt{3} \times V_{LL} \times I_{sc}$$

Dengan menggunakan model thevenin, perhitungan arus gangguan menjadi lebih sederhana dan akurat.

D. Sistem Proteksi

Ketidakpastian merupakan hal yang intrinsik dalam distribusi setiap pasokan daya listrik. Seluruh jaringan listrik berisiko jika gangguan ini tidak diatasi. Untuk menghindarinya, diperlukan mekanisme perlindungan yang dapat mengurangi dampak gangguan tersebut.

Dengan mengisolasi gangguan dari sistem lain secara tepat dan cepat, sistem proteksi melindungi sistem tenaga listrik dari gangguan yang mungkin terjadi di dalam sistem.

Sistem proteksi daya melindungi komponen sistem tenaga listrik dari kerusakan yang disebabkan oleh kondisi operasi yang tidak biasa. Ini mencakup komponen seperti transformator, busbar, generator, kabel bawah tanah, saluran tegangan tinggi, dan lainnya.

1. Fungsi Sistem Proteksi

Untuk mencegah kerusakan pada bagian sistem yang normal dan tidak terganggu, sistem proteksi harus mampu mendeteksi jika ada yang salah dan kemudian memisahkan area yang terdampak dari bagian sistem lainnya. Untuk mencegah gangguan pada sistem, sistem proteksi harus mendeteksi dan memisahkan komponen yang terdampak dengan cepat, sebagaimana dinyatakan oleh Iriando Rizky Geddy dkk. (dikutip dalam Sulasno, 2019:612). Selain melindungi manusia dari bahaya listrik, sistem proteksi tenaga listrik juga membatasi area yang tidak terganggu agar gangguan tidak menyebar ke bagian lain sistem, menyediakan layanan listrik yang konsisten dan berkualitas tinggi bagi konsumen, serta mencegah atau mengurangi kerusakan peralatan sistem tenaga listrik akibat gangguan atau kondisi operasi abnormal.

Bersamaan dengan relai proteksi, perangkat instrumen yang dikenal sebagai Transformator Arus (*CT*) dan Transformator Tegangan (*VT*) merupakan bagian integral dari sistem proteksi tenaga listrik yang menciptakan pola keamanan. Relai proteksi menerima perintah terakhir dari catu daya *DC*, dan kemudian mengoperasikan pemutus sirkuit PMT.

Catu daya *DC*, PMT, relai, dan sistem proteksi tenaga listrik merupakan satu kesatuan yang terintegrasi. Jika salah satu saja dari komponen ini berhenti bekerja, seluruh sistem akan rusak.

Bagian penting dari setiap sistem proteksi atau sistem keamanan jaringan adalah relai proteksi, yang sering disebut relai pengaman. Relai ini berkomunikasi dengan pemutus sirkuit melalui sinyal, yang memungkinkan pemutus sirkuit untuk memutuskan apakah akan membuka atau menutup sirkuit. Menurut Iriando Rizky Geddy dkk. (dalam Rangka Albertus, 2019:613), peran utama relai ini adalah mendeteksi kelainan pada sistem tenaga listrik dan, jika terjadi malfungsi, mengirimkan sinyal ke pemutus sirkuit, sehingga memutus sirkuit yang bermasalah.

Data yang diterima (arus, tegangan, daya, sudut fase, frekuensi, impedans, dll.) diukur atau dibandingkan dengan nilai yang ditentukan oleh relai proteksi untuk mendeteksi cacat pada peralatan yang dilindungi. Setelah itu, relai memutuskan apakah akan mengaktifkan pemutus sirkuit segera atau setelah beberapa waktu.

Relai proteksi juga dapat menunjukkan jenis gangguan dan lokasinya. Terkadang, relai hanya akan menunjukkan masalah atau kerusakan jika dianggap tidak berbahaya. Dalam sistem tenaga listrik, relai proteksi bertanggung jawab untuk:

1. Sesegera mungkin, mengisolasi komponen sistem yang terdampak setelah mendeteksi dan mengukurnya. Hal ini akan memungkinkan komponen sistem yang tidak terdampak untuk terus beroperasi dengan baik.
2. Mencegah kerusakan lebih lanjut pada mesin yang terdampak.
3. Mengurangi dampak gangguan pada sistem secara keseluruhan dan mencegahnya menyebar ke area lain yang tidak terdampak.
4. Menjaga keselamatan orang sebisa mungkin.

Untuk memberikan keamanan yang memadai, sistem tenaga listrik dibagi menjadi zona-zona keamanan yang sesuai sambil meminimalkan interkoneksi antar subsistem.

Fungsi relai sangat penting dalam sistem tenaga listrik. Relai yang memberikan proteksi juga diperlukan untuk pemasangan berkualitas tinggi. Oleh karena itu, Relai proteksi harus mematuhi sejumlah standar, seperti:

1. Keterandalan (Reliability)

Relai dapat bekerja berbulan-bulan atau bahkan bertahun-tahun tanpa menerima arus listrik meskipun semuanya berjalan

dengan baik. Relai harus terus beroperasi jika mengalami gangguan.

2. Selektivitas (*Selectivity*)

Agar relai bersifat selektif, relai harus mampu membedakan komponen yang rusak. Sangat penting bahwa sistem proteksi merespons dengan benar untuk mengisolasi komponen yang rusak dari bagian sistem lainnya tanpa mengisolasi komponen lain yang tidak seharusnya.

3. Sensivitas (*Sensitivity*)

Sesuai spesifikasinya, relai harus sangat sensitif terhadap besaran kritis. Selain itu, sistem proteksi wajib merespons gangguan apa pun, berapa pun besarnya, asalkan gangguan tersebut berada dalam cakupan operasionalnya.

4. Kecepatan kerja

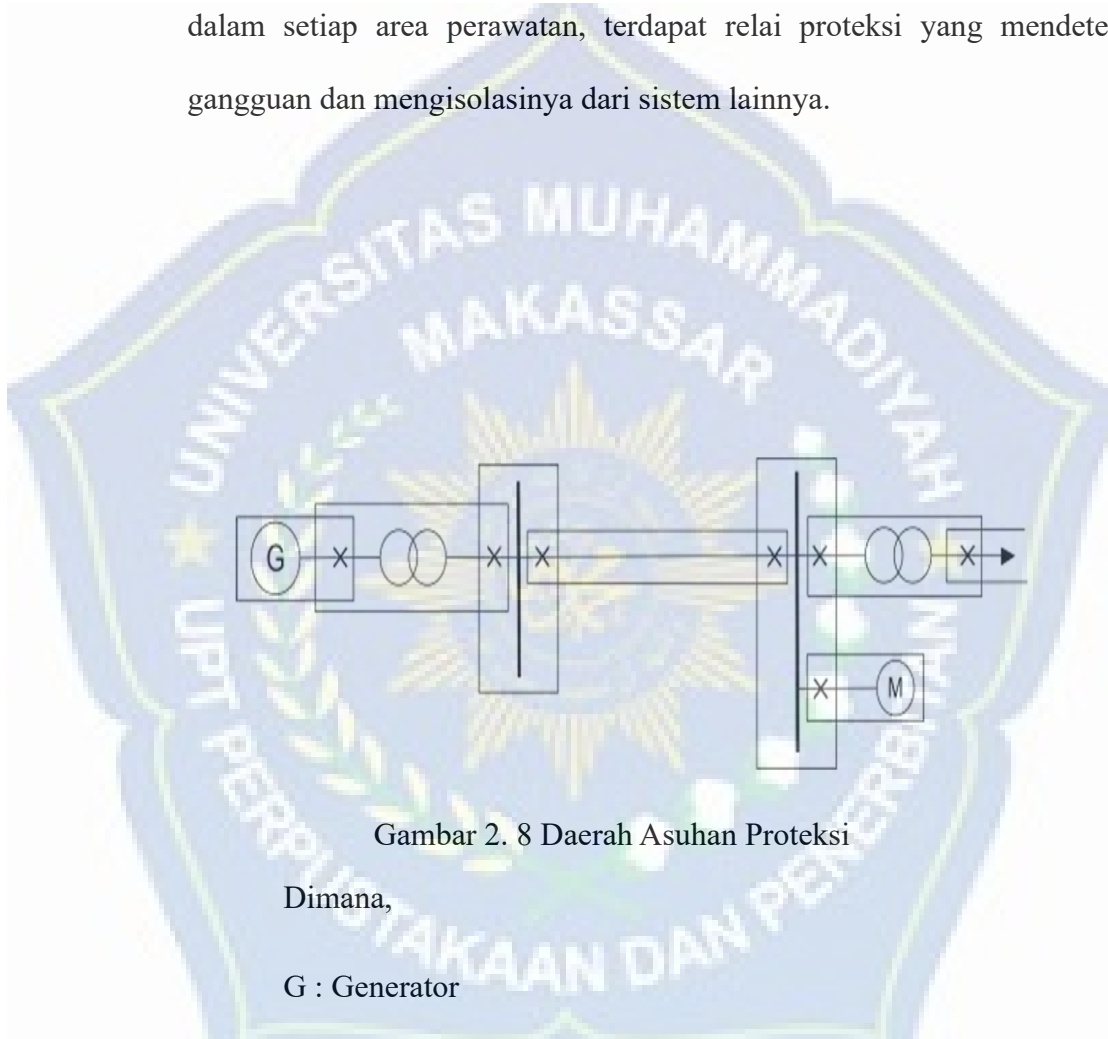
Jika terjadi gangguan, relai proteksi harus dapat aktif dengan cepat. Peralatan listrik yang terproteksi dapat rusak, misalnya, jika insulasi bocor akibat gangguan tegangan lebih yang berkepanjangan.

5. Ekonomis

Saat membeli relai proteksi, biaya merupakan faktor penting. Jika sistem tenaga listrik tidak mampu membeli relai, maka relai tersebut tidak akan digunakan.

2. Daerah Asuhan Proteksi

Selektivitas merupakan atribut sistem keamanan. Hal ini dicapai dengan membagi sistem tenaga listrik menjadi area perawatan proteksi. Di dalam setiap area perawatan, terdapat relai proteksi yang mendeteksi gangguan dan mengisolasinya dari sistem lainnya.



Gambar 2. 8 Daerah Asuhan Proteksi

Dimana,

G : Generator

M : Motor

X : Circuit breaker

3. Proteksi Utama dan Proteksi penyanggah

Dalam kebanyakan kasus, area cakupan proteksi memiliki sistem proteksi utama dan cadangan. Ketika terjadi malfungsi di dalam area cakupannya, sistem proteksi utama adalah yang pertama merespons. Di dalam area cakupan tersebut, sistem mengirimkan perintah untuk memisahkan sistem yang rusak dari sistem lainnya. Pemutus sirkuit (*CB*) di area cakupannya dibuka untuk memungkinkan arus hubung singkat mengalir.

Jika proteksi utama tidak dapat mengisolasi sistem yang rusak, sistem proteksi cadangan harus merespons dan mengisolasinya. Untuk mengisolasi sirkuit, hanya perlu membuka pemutus arus yang dilalui arus hubung singkat. Cadangan lokal terjadi di dalam area cakupan yang sama, sedangkan cadangan jarak jauh terjadi di wilayah cakupan yang berbeda. Wilayah yang terlindungi identik dengan wilayah terlindungi utama jika cadangan lokal aktif. Wilayah yang terlindungi tidak akan menjadi area yang terisolasi jika cadangan jarak jauh berfungsi. Isolasi juga akan berlaku untuk bagian sistem yang menerima daya dari arus hubung singkat, yang terletak di hilir dari cadangan jarak jauh. Kesalahan dan malfungsi sistem tidak dapat dihindari. Jumlah komponen bertambah seiring bertambahnya ukuran sistem. Akibatnya, risiko kesalahan dan malfungsi pun lebih tinggi. Tanpa keamanan yang memadai, perencanaan atau manajemen yang baik

pun tidak dapat menyelamatkan sistem. Menurut Yudha (2008), hal ini menunjukkan betapa pentingnya jaring pengaman.

E. Jenis Relai Proteksi

1. Relai Arus Lebih

Untuk mencegah kerusakan peralatan listrik akibat arus lebih yang parah, relai arus lebih merupakan komponen penting dari sistem pengaman. Ketika arus melampaui batas aman atau mengancam kerusakan komponen listrik, hal ini dikenal sebagai arus lebih, bahkan dapat menyebabkan panas dan dapat menyebabkan kebakaran jika tidak ditangani dengan efektif. Relai arus lebih bertugas untuk mendeteksi kelebihan arus kemudian memutuskan aliran listrik ketika terjadi gangguan arus lebih. (Wijaya Arya Becky dkk,2024)

2. Relai Pilot

Dalam hal melindungi saluran transmisi, Mason (1979) mengatakan bahwa relai pilot adalah pilihan terbaik. Relai pilot menawarkan perlindungan berkecepatan tinggi terhadap semua masalah hubung singkat saluran transmisi, kapan pun dan di mana pun relai tersebut digunakan. Pemutus sirkuit otomatis dengan kecepatan tinggi dimungkinkan dengan dua terminal atau lebih, atau multiterminal, dengan semua pemutus sirkuit terminasi pada saat yang bersamaan. Untuk memastikan saluran transmisi dapat

memberikan tegangan optimal untuk transmisi, kombinasi pemutusan dan pemutusan otomatis ini harus mengisi daya sistem transmisi mendekati batas stabilitasnya.

3. Relai Gangguan Tanah

Relai gangguan tanah *Ground Fault Relai (GFR)* melindungi peralatan atau jaringan listrik tegangan menengah dari gangguan fase atau gangguan 3 fase dan hanya beroperasi satu arah karena tidak dapat membedakan arah arus gangguan. *GFR* berfungsi sebagai pengaman cadangan untuk *Directional Groud Relai (DGR)*. Perbedaan dengan *DGR* adalah *GFR* tidak memiliki arah.

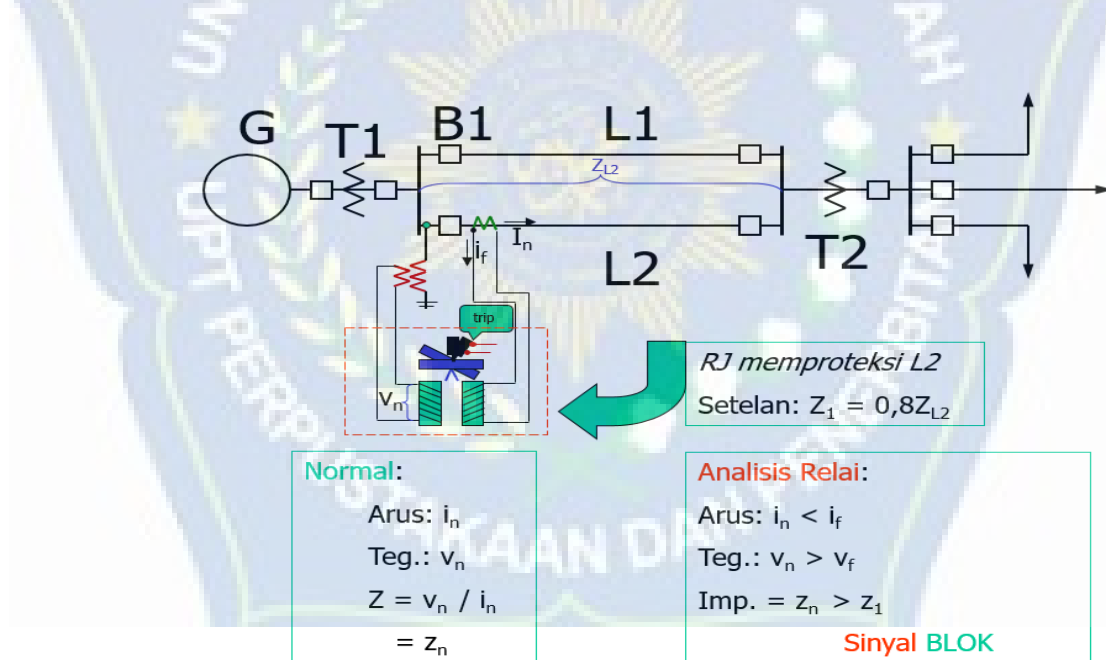
4. Relai Jarak

Karena kemudahan pengaturan dan kecepatannya dalam eliminasi gangguan, relai jarak banyak digunakan pada saluran transmisi. Proteksi relai jarak akan aktif sebagai respons terhadap pengukuran impedans jika terjadi kegagalan saluran transmisi.

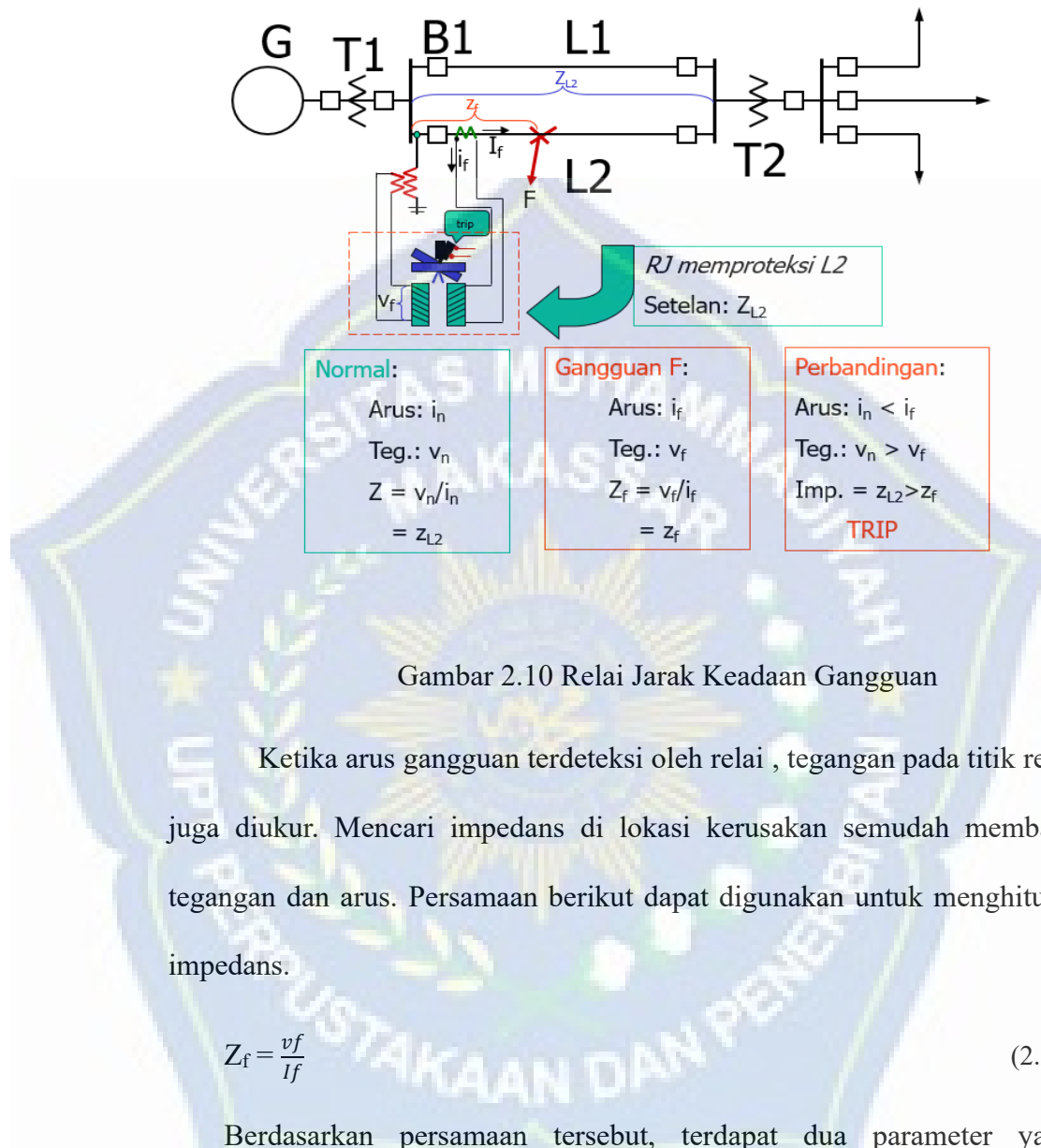
Menjaga stabilitas dan keandalan dalam penyaluran energi listrik dimungkinkan dengan menggunakan relai jarak sebagai mekanisme proteksi. Karena relai jarak kurang sensitif terhadap variasi arus hubung singkat arus lebih, relai jarak menjadi pilihan yang lebih disukai untuk proteksi saluran. "Shudarto" menyatakan di halaman 14.

Beroperasi berdasarkan prinsip pengukuran impedans konduktor, relai jarak merupakan salah satu jenis relai konduktor. Membagi tegangan rangkaian dengan arusnya menghasilkan impedans yang dirasakan oleh relai. Relai ini hanya sensitif terhadap kegagalan satu fase ke tanah dan karenanya bergantung pada besarnya SIR.

Ketika arus gangguan terdeteksi oleh relai, tegangan pada titik relai juga diukur. Mencari impedans di lokasi kerusakan semudah membagi tegangan dan arus. Persamaan berikut dapat digunakan untuk menghitung impedans.



Gambar 2.9 Relai jarak Keadaan Normal



Gambar 2.10 Relai Jarak Keadaan Gangguan

Ketika arus gangguan terdeteksi oleh relai , tegangan pada titik relai juga diukur. Mencari impedans di lokasi kerusakan semudah membagi tegangan dan arus. Persamaan berikut dapat digunakan untuk menghitung impedans.

$$Z_f = \frac{v_f}{I_f} \quad (2.25)$$

Berdasarkan persamaan tersebut, terdapat dua parameter yang mempengaruhi nilai impedans gangguan Z_f yang terbaca pada relai jarak yaitu tegangan gangguan V_f dan gangguan I_f . Parameter tersebut dapat dirasakan oleh relai jarak dengan bantuan transformator tegangan atau *voltage transformator (VT)* dan transformator arus atau *current transformer*

(CT) yang berada pada gardu induk yang sama dengan letak relai jarak. Transformator tegangan digunakan untuk membaca tegangan pada saat terjadi gangguan dan tegangan arus digunakan untuk membaca arus hubung singkat saat terjadi gangguan. Setelah relai jarak memperoleh nilai tegangan gangguan V_f dan arus tegangan I_f . Maka dapat diketahui nilai impedansi gangguan Z_f dengan perhitungan menggunakan persamaan di atas.

Parameter perhitungan yang penting adalah impedans untuk saluran distribusi udara yaitu reaktans induktif saluran (X_L) dan resistans saluran (R). Jadi, nilai impedans saluann dapat dituliskan dengan persamaan:

$$Z = R + jX \quad (2.26)$$

$$Z = R + jX_L$$

Salah satu karakteristik rangkaian listrik adalah induktans, yang menghasilkan potensial listrik yang berbanding lurus dengan arus yang mengalir melalui rangkaian. Henry (H) adalah satuan standar induktans dalam skala global. Sementara itu, relasi reaktans induktif dengan nilai induktans dapat diperoleh sebagai berikut:

$$X_L = 2.\pi.f.L \quad (2.27)$$

$$L = X_L / 2.\pi.f$$

Dimana,

Ada tiga tipe utama karakteristik relai jarak seperti berikut:

1. Relai Jarak Tipe Impedans adalah relai jarak yang bereaksi terhadap magnitudo impedans, nondireksional (tidak berarah), digunakan untuk saluran radial.
2. Relai jarak Tipe Admitans/mho adalah relai jarak terhadap magnitudo dan sudut impedans, direksional (berarah), digunakan untuk saluran terinterkoneksi.
3. Relai jarak Reaktans adalah relai jarak yang hanya bereaksi terhadap komponen khayal dari impedans yaitu reaktans, terutama digunakan pada kecepatan angin yang tinggi (potensi resistans-busur tinggi)

Adapun persamaan relai jarak impedans adalah sebagai berikut:

$$T_0 = k_1 I^2 \quad (2.28)$$

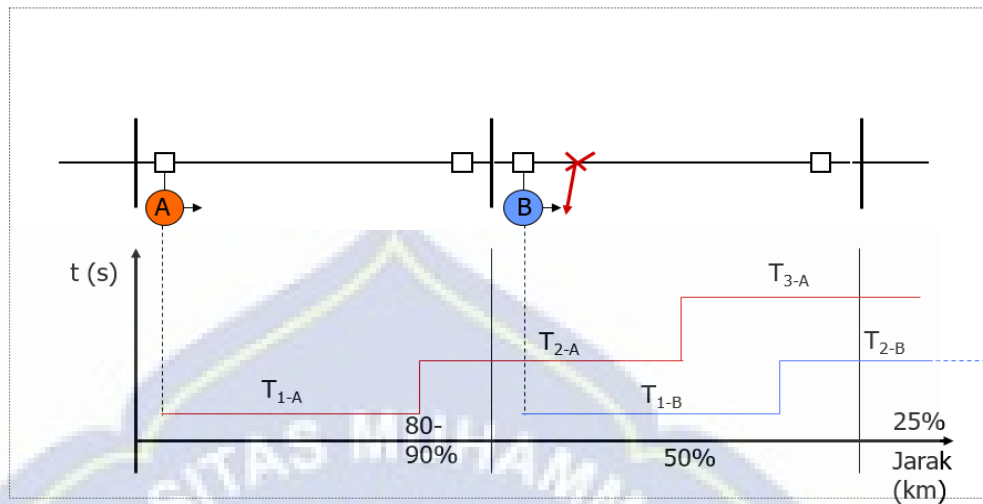
$$T_r = k_2 V^2 + K_3 \quad (2.29)$$

Kemudian kondisi ambang operasi, adapun persamaannya sebagai berikut :

$$T_0 = T_r \quad (2.30)$$

$$K_2 I^2 = K_2 V^2 + K_3 \quad (2.31)$$

Diagram Zona dan Waktu Operasi Proteksi Relai Jarak-A dan Relai Jarak-B Tiga Zona



Sistem Proteksi

Electrical Energy, Unand

12

Gambar 2.11 Diagram Zona Waktu

Keterangan :

1. Waktu operasi Z_1 , instan
2. Waktu operasi Z_2 , 12-18 siklus (T_2)
3. Waktu operasi Z_3 , hingga 60 siklus (T_3)

F. Perangkat Lunak PSCAD

PSCAD (Power Systems Computer Aided Design) merupakan salah satu perangkat lunak simulasi yang paling penting dan populer di bidang simulasi sistem tenaga listrik. Terdapat pustaka yang luas yang mencakup berbagai macam model untuk studi sistem tenaga dan elektronika daya. Terdapat pula pustaka relai yang mencakup beberapa model dan komponen relai dasar di dalamnya. Dan semakin banyak model dan komponen relai proteksi yang dirancang dan dikembangkan di *HVDC*.

Mempelajari perilaku transien dalam jaringan listrik menjadi lebih mudah menggunakan *PSCAD*, sebuah simulasi domain waktu dan alat profesional. Simulasi respons sesaat domain waktu, seperti transien elektromagnetik dalam sistem kelistrikan, adalah keunggulan *PSCAD*. Menurut Wilson (P.L.), *PSCAD* mampu menangani semua bagian simulasi sistem tenaga, seperti pembangunan rangkaian, kontrol selama runtime, analisis, dan pelaporan.

Berdasarkan perpustakaan relai di *PSCAD*, berbagai model dan logika relai pelindung dapat dibangun dan studi simulasi relai dapat diselesaikan. Lebih jauh lagi, dengan mensimulasikan berbagai jenis kesalahan dalam sistem tenaga, model relai dapat diuji dan kinerjanya dievaluasi

BAB III

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode pemodelan menggunakan aplikasi *PSCAD*. Rangkaian sistem tenaga listrik termasuk Penyulang Rindam, gangguan satu-fase ke tanah dan relai jarak-tanah yang memproteksinya, kemudian dimodelkan dalam perangkat lunak *PSCAD*. Selanjutnya model disimulasikan untuk mendapatkan kinerja dari relai jarak-tanah tersebut terhadap gangguan satu fase ke tanah dengan berbagai varian nilai resistans gangguan.

A. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di PT. PLN (persero) ULTG Panakkukang. Yang berlokasi di Jl. Letjen Hertasning Blok B Makassar Kec. Panakkukang, Kota Makassar, Sulawesi Selatan 90222, serta pengelolaan data di Kampus Unismuh Makassar. Adapun waktu penelitian dilakukan selama 6 bulan mulai dari bulan April 2025 - September 2025

B. Alat dan Bahan

1. Alat

Adapun alat yang digunakan pada penelitian ini adalah:

- a. Laptop Vivo Book 14_Asus Laptop X442UF

Prosesor : Intel (R) Core (TM) i7-8550U

Memori RAM : 8.00 GB

Hardisk : 500 GB

Sistem Operasi : Windwos 11 Home single

- b. Perangkat lunak *PSCAD/EMTDC (power system computer aided design) student version*

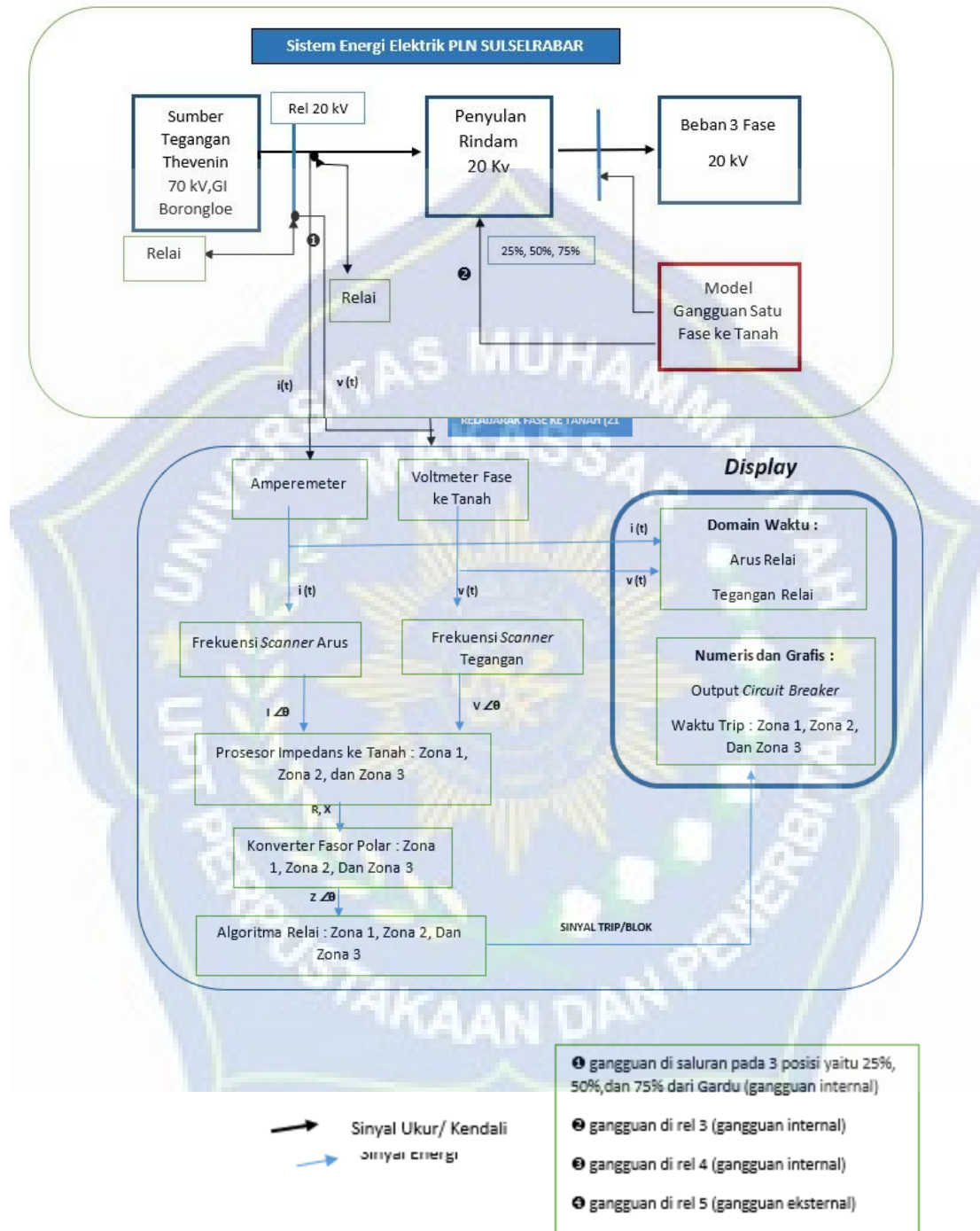
2. Bahan

Adapun bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah buku serta paper yang terlampir dalam daftar pustaka.

C. Skema Penelitian

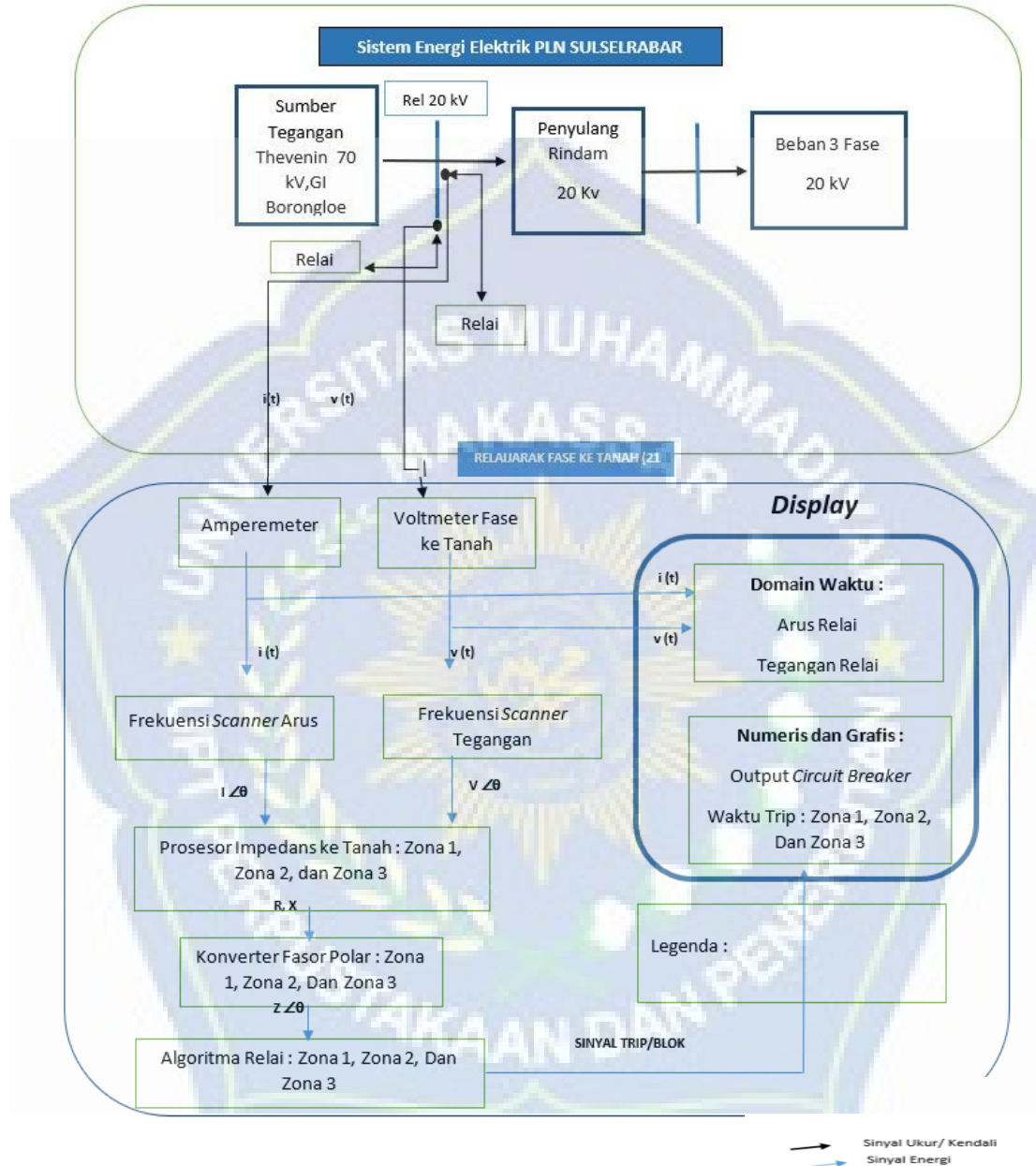
Sepuluh gambar mewakili sistem operasi yang umum, sedangkan separuh lainnya mewakili sistem yang tidak berfungsi. Dua model, Model 01 dan Model 02, akan dibuat ketika setiap skema diterapkan ke model atau simulator yang sesuai.

KONFIGURASI SISTEM UNTUK KONDISI OPERASI GANGGUAN



Gambar 3.1 Konfigurasi Gangguan

KONFIGURASI SISTEM UNTUK KONDISI OPERASI NORMAL



Gambar 3.2 Konfigurasi Normal

1. Sumber Tegangan Thevenin 70 KV, GI Borongloe

Generator Thevenin yang mewakili seluruh jaringan listrik (*Grid*) di SEE PLN Sulselrabar di rel 70 KV, GI Borongloe

2. Transformator 70/20 KV

Transformator daya penurun tegangan dari 70 kV ke 20 KV yang menyuplai *feeder* (penyulang) Rindam di GI Borongloe

3. Penyulang Rindam

Penyulang Rindam terdiri atas 2 zona yaitu zona 1 dan zona 2 yang bertegangan 20 kV. Penyulang Rindam ini adalah objek penerapan relai jarak fase ke tanah yang dimodelkan di dalam perangkat lunak *PSCAD*.

4. Beban penyulang Rindam

Beban tiga fase yang dimodelkan di ujung Penyulang

5. Model Gangguan Satu Fase ke Tanah

Komponen yang mewakili gangguan hubung singkat satu fase ke tanah di dalam *PSCAD*. Model gangguan tersebut akan di relokasi berdasarkan lokasi gangguan di satu saluran yaitu 25%, 50%, 75% dan 85% dari lokasi relai .

6. Amperemeter

Amperemeter ini adalah alat ukur arus atau sensor arus dan transformator arus (*CT*) dengan rasio 1:1. Komponen ini memberikan masukan arus ke relai

7. Voltmeter

Voltmeter ini berfungsi sebagai alat ukur tegangan atau sensor tegangan dan transformtor tegangan (VT) dengan rasio tegangan 1:1. Komponen ini memberikan masukan tegangan ke relai

8. Frekuensi *Scanner* Arus

Komponen ini berfungsi sebagai konverter sinyal arus dalam domain waktu ke domain fasor. Komponen ini menerima masukan dari amperemeter dan memeberikan masukan ke prosesor impedans.

9. Frekuensi *Scanner* Tegangan

Komponen ini berfungsi sebagai konverter sinyal tegangan dalam domain waktu ke domain fasor. Komponen ini menerima masukan dari voltmeter dan memeberikan masukan ke prosesor impedans.

10. Prosesor Impedans Fase ke Tanah

Komponen ini berfungsi menghitung nilai impedans ke tanah yang dibutuhkan oleh relai dan mendapatkan masukan berupa fasor arus saluran dan fasor tegangan fase ke tanah. Kedua fasor tersebut masing-masing dihasilkan oleh frekuensi *scanner* arus dan frekuensi *scanner* tegangan.

11. Konverter Fasor Polar

Komponen ini berfungsi sebagai konverter fasor regtanguler ke fasor polar. Ia mendapatkan masukan dari prosesor impedans dan kemudian memberikan masukan ke algoritma relai. Komponen ini berjumlah 2 buah masing-masing untuk zona 1, dan zona 2

12. Algoritma Relai

Algoritma relai berfungsi sebagai pengambil keputusan relai dengan cara membandingkan antara impedans terukur dengan impedans setelan (setting). Jika impedans terukur lebih kecil dari nilai setelan maka relai akan menghasilkan sinyal trip dan sebaliknya jika impedans terukur lebih besar dari impedans setelan maka relai akan menghasilkan sinyal blok. Algoritma ini terdiri atas 2 buah masing-masing untuk zona 1, dan zona 2

13. Display

Komponen ini berfungsi sebagai sarana untuk menampilkan respons relai/sistem proteksi dan besaran sinyal. Jenis informasi yang ditampilkan yaitu berupa tampilan domain waktu untuk arus dan tegangan relai serta tampilan grafis untuk luaran dari relai (waktu trip) atau *circuit breaker*.

D. Data Penelitian

Adapun data yang digunakan adalah data penyulang di Rindam di Gardu Induk Borongloe sebagaimana diperlihatkan pada tabel berikut:

1. Data Hubung Singkat di rel 70 kV Gardu Induk Borongloe

Tabel 3.1 Data Hubung Singkat di rel 70 kV Gardu Induk Borongloe (ULTG Panakkukang,2025)

Tegangan Rel (Teg. Hubung- Buka)	Arus Hubung Singkat Tiga-Fase	
	Maks. (KA)	Min. (KA)
70 KV	2,51	2,26

2. Data impedans jenis di Penyulang Rindam

Tabel 3.2 Data impedans penyulang Rindam (up3 Makassar Selatan,2025)

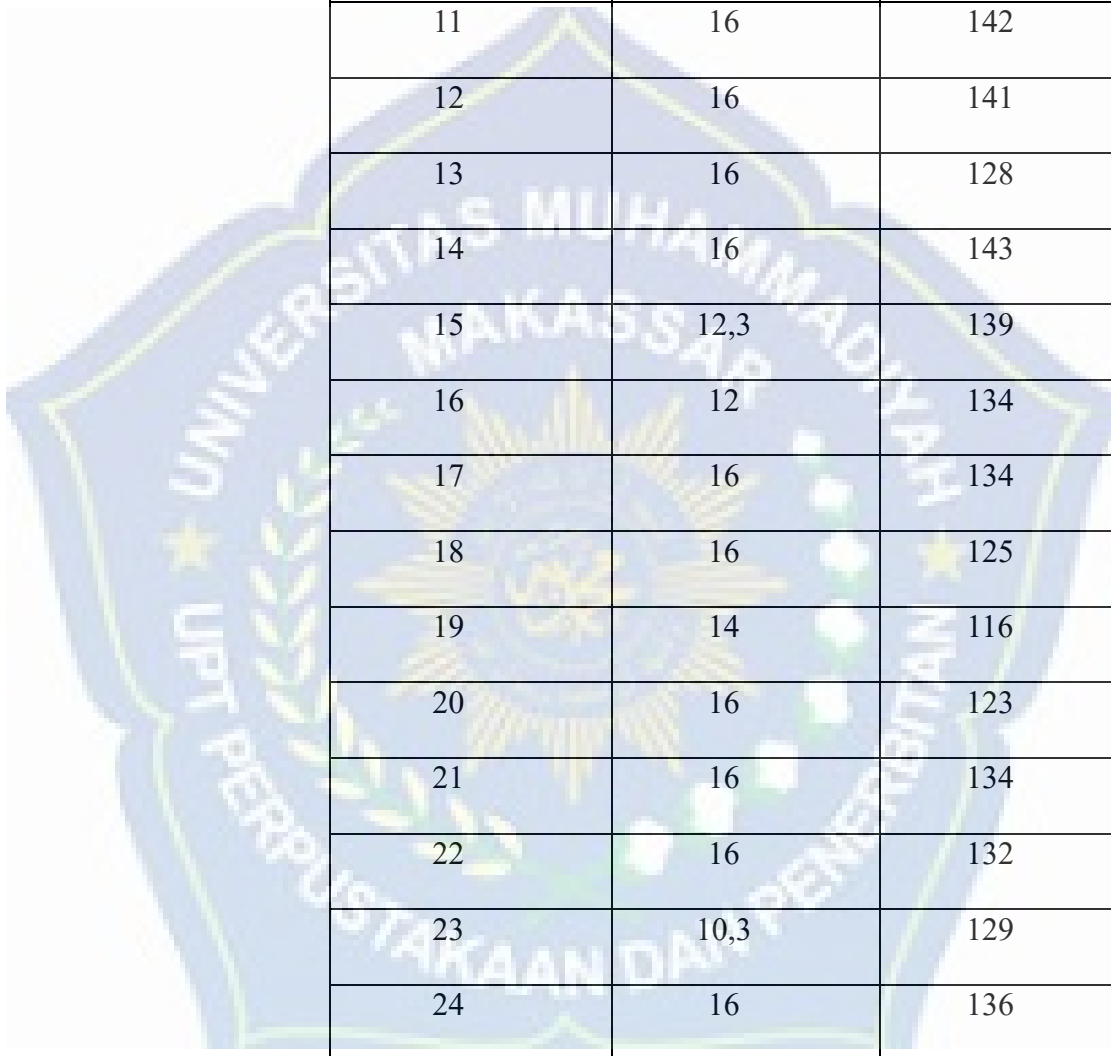
Panjang Penyulang	5,375 kms
Ukuran kawat	240 mm
Jenis kawat	XLPE 240 MM2

3. Data beban maksimum Penyulang Rindam

Tabel 3.3 Data beban maksimum Penyulang Rindam di bulan Juni 2025 untuk beban puncak siang dan beban puncak malam (ULTG Panakkukang,2025)

a. Beban puncak siang

Tanggal	Jam	Arus (A)
1	16	146
2	15	125
3	12	139
4	16	143
5	12,3	128
6	15	125
7	12	129

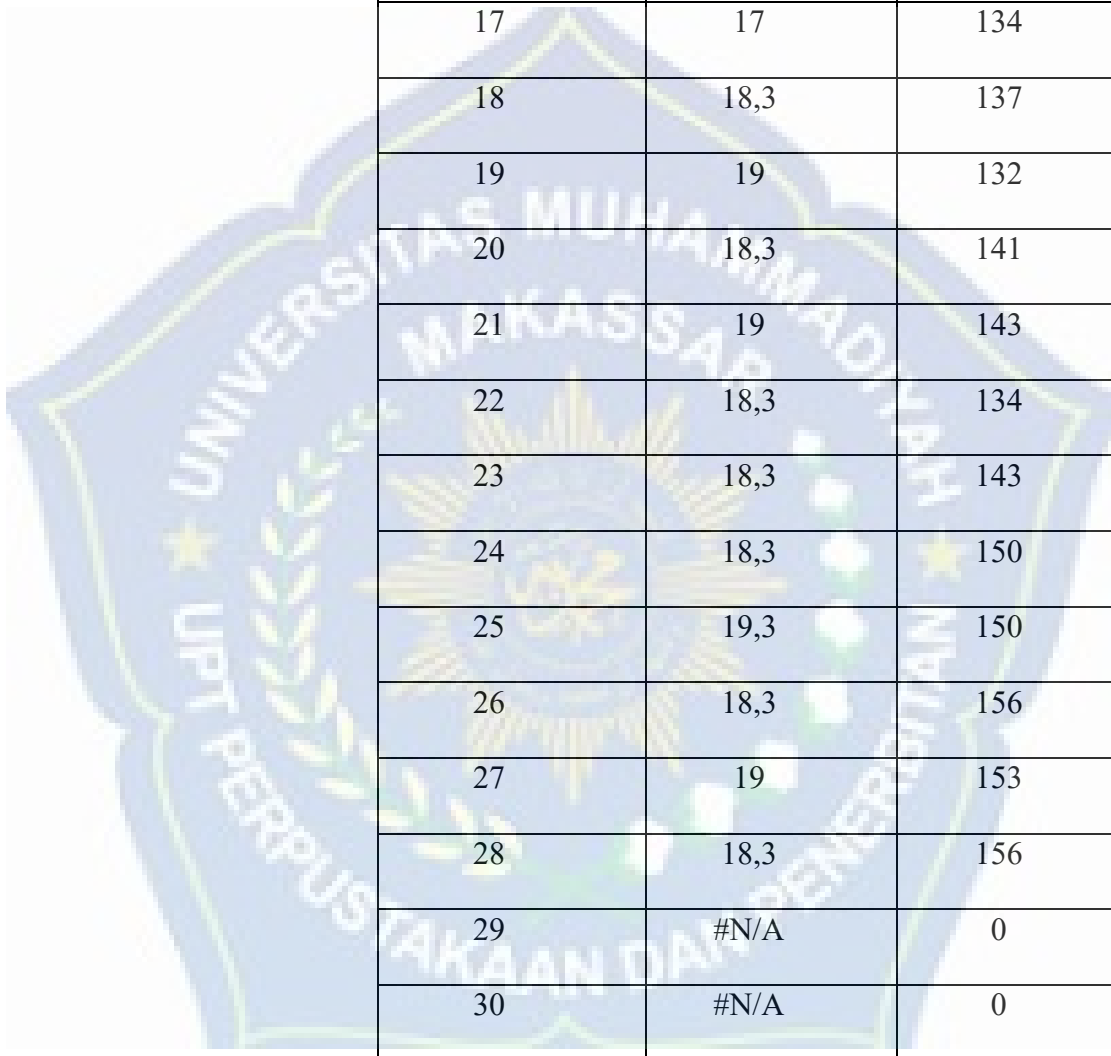


8	16	130
9	12	129
10	16	142
11	16	142
12	16	141
13	16	128
14	16	143
15	12,3	139
16	12	134
17	16	134
18	16	125
19	14	116
20	16	123
21	16	134
22	16	132
23	10,3	129
24	16	136
25	16	140
26	16	148
27	14,3	142

28	16	134
29	15	140
30	#N/A	0
31	#N/A	0

b. Beban puncak malam

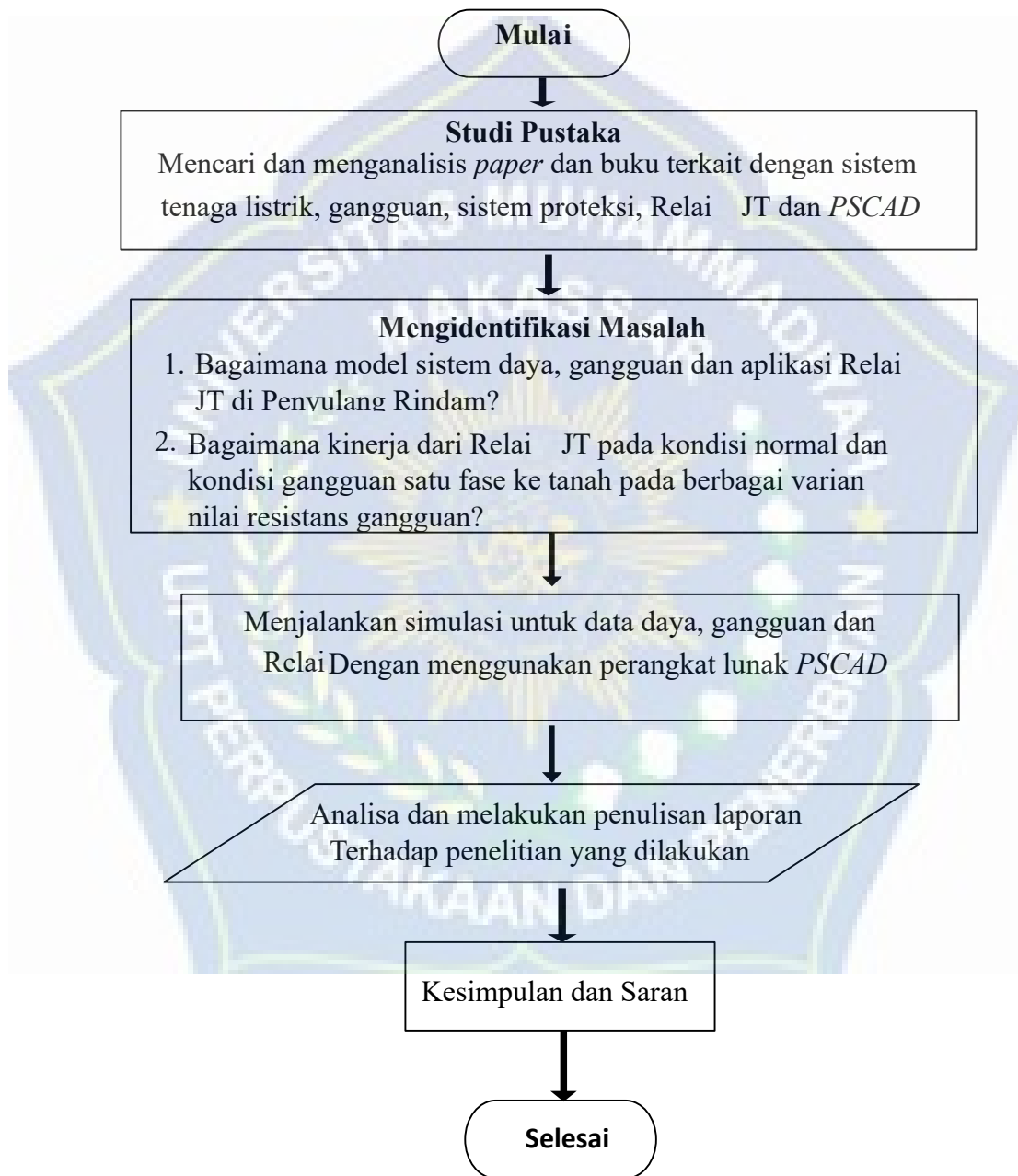
Tanggal	Jam	Arus (A)
1	16,3	151
2	19	133
3	18	143
4	16,3	143
5	19	138
6	19,3	145
7	18	142
8	18.3	137
9	18	142
10	17	143
11	17	146
12	18,3	146
13	18,3	149



14	18,3	149
15	20	141
16	19	142
17	17	134
18	18,3	137
19	19	132
20	18,3	141
21	19	143
22	18,3	134
23	18,3	143
24	18,3	150
25	19,3	150
26	18,3	156
27	19	153
28	18,3	156
29	#N/A	0
30	#N/A	0
31	#N/A	0

E. Langkah Penelitian

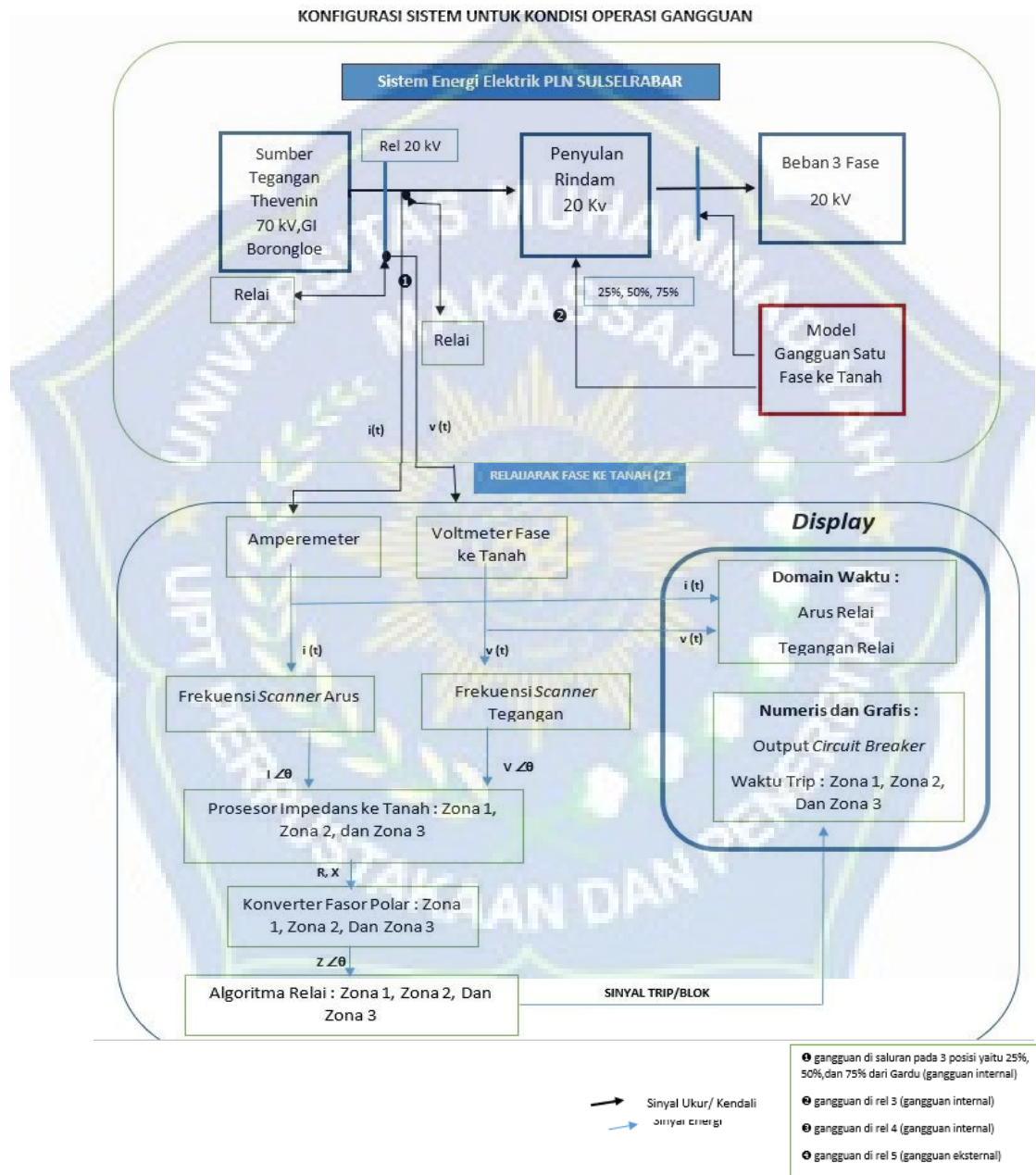
Secara garis besar tahapan yang dilakukan dalam penelitian ditunjukkan pada bagan berikut



Gambar 3.3 Flowcart

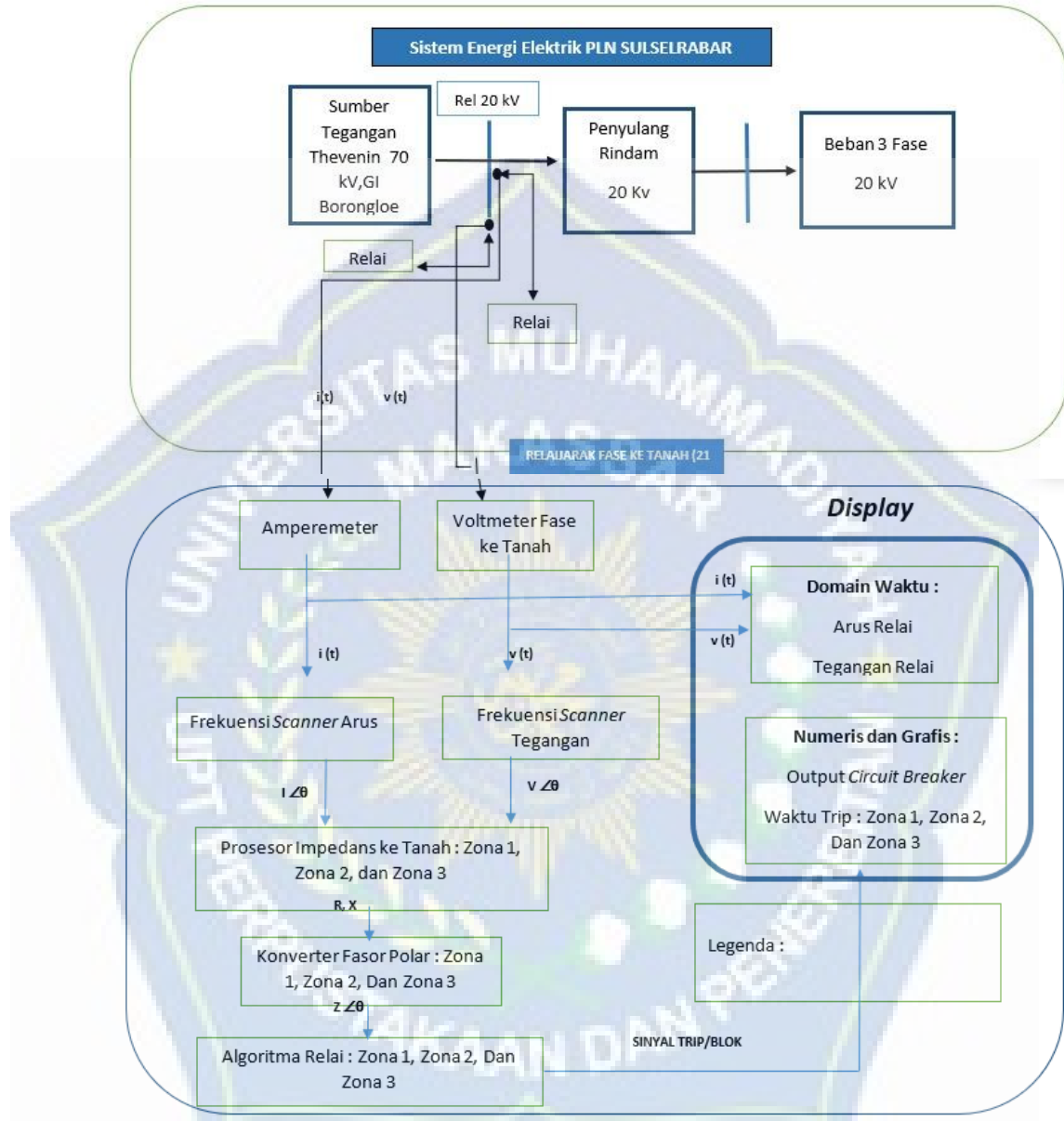
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Konfigurasi dan Model *PSCAD*



Gambar 4.1 Konfigurasi Kondisi Gangguan

KONFIGURASI SISTEM UNTUK KONDISI OPERASI NORMAL



Gambar 4.2 Konfigurasi Kondisi Normal

B. Pemodelan Sumber Thevenin di GI Borongloe

Model sumber Thevenin dibangun dengan menggunakan data arus hubung singkat tiga-fase maksimum sebesar 2,51 kA serta tegangan hubung-buka di GI Borongloe sebesar 70 kV seperti disajikan pada tabel 4.1 analisis matematis adalah sebagai berikut

Tabel 4.1 Data tegangan dan arus hubung-singkat di GI Borongloe

Tegangan Rel (Teg. Hubung-Buka)	Arus Hubung Singkat Tiga-Fase	
	Maks. (kA)	Min. (kA)
70 KV	2,51	2,26

Daya hubung singkat maksimum yang diperoleh, menggunakan persamaan 2.2

$$S = \sqrt{3} \times V \times I$$

$$S_{Th} 1,732 \times 70 \text{ kV} \times 2,51 \text{ KA}$$

$$= \mathbf{304,3124 \text{ MVA}}$$

Jadi daya untuk generator Thevenin adalah 304,3124 MVA

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

$$Z = (70 \text{ KV})^2 / S_{Th}$$

$$Z = (4.900) \text{ MVA}^2 / 304,3124 \text{ MVA}$$

$$Z = \mathbf{16,1018 \text{ } \Omega}$$

Oleh karena resistans diabaikan maka nilai reaktans sama dengan impedans,
yakni **16,1018 Ω**

Dengan demikian, nilai induktans (L) menggunakan Pers. 2.2. adalah

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot l$$

$$L = X_L / 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$L = 16,1018 / 2 \times 50 \times 3,14$$

$$L = 16,1018 / 314$$

$$L = \mathbf{0.05127 \text{ H}}$$

Jadi nilai indukatan Generator Thvenin adalah 0,05127 H

C. Model Saluran Penyulang Borongloe

1. Panjang Penyulang

Panjang Penyulang Borongloe = 5,375 KMS

2. Impedans Jenis

Ukuran kawat = 240 mm²

Jenis Kabel = XLPE 240 MM²

Tabel 4.2 Impedans Urutan Positif

Resistans (R)	0,1344 Ohm / Km
Reaktansi Induktif (X_L)	0,3152 mH/ km

Sumber : SPLN 43-5/IEC 60502-2

3. Menghitung Impedans Penyulang

Pada penyulang Rindam tipe konduktor yang di gunakan adalah tipe XLPE dengan luas penampang 240 mm^2 sesuai dengan tabel 4.2 sehingga didapatkan :

1) Z urutan Positif

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{R^2 + XL^2} \\ &= \sqrt{0,1344^2 + j0,3152^2} \\ &= \sqrt{0,117793} \\ &= \mathbf{0,3432 \Omega / km} \end{aligned}$$

Selanjutnya nilai Z urutan positif saluran (panjang = 5,375 km) adalah sebagai berikut :

$$Z = 0,3432 \Omega / km \times 5,375 km$$

$$Z = \mathbf{1,8477 \Omega}$$

Selanjutnya, nilai reaktansi induktif per satuan panjang adalah $0,3158 \Omega / km$ dikalikan dengan panjang saluran untuk mendapat nilai reaktansi total:

$$X = 0,3158 \times 5,375$$

$$X = \mathbf{1,6974 \Omega}$$

Selanjutnya menghitung nilai induktans (L), maka perhitungannya adalah:

$$L = x / 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$L = 1,6974 / 2 \cdot 3,14 \cdot 50$$

$$L = \mathbf{0.05540 \text{ H}}$$

2) Z urutan nol

$$Z = \sqrt{R^2 + XL^2}$$

$$= \sqrt{0,2824^2 + j1,6034^2}$$

$$= \sqrt{2,6506}$$

$$= \mathbf{1,6281 \Omega / km}$$

Selanjutnya menghitung nilai Z urutan nol permeter adalah sebagai berikut :

$$Z = 1,6281 / 1000$$

$$Z = \mathbf{0,0016218 \Omega / m}$$

4. Perhitungan Beban Penyulang Rindam

Perhitungan Daya :

$$\text{Daya Semu, } S = \sqrt{3} \times V \times I$$

$$= 1,732 \times 20.000 \times 145$$

$$= \mathbf{5 \text{ MVA}}$$

Jadi nilai daya semu adalah 5 MVA

$$\cos \phi = 0,85$$

$$\phi = \cos^{-1} [0,85]$$

$$= 31,78$$

Daya Nyata, $p = S \times \cos\phi$

$$= 5 \times 0,85$$

$$= 4,2 \text{ MW}$$

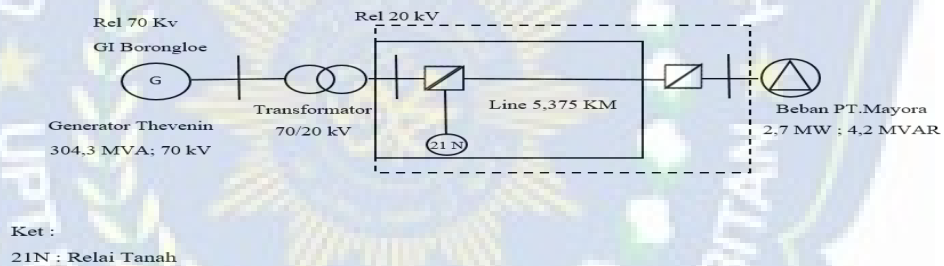
Daya Reaktif, $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$

$$= \sqrt{5^2 - 4,2^2}$$

$$= \sqrt{7,39}$$

$$= 2,7 \text{ MVAR}$$

D. Diagram Segaris Simulasi PSCAD



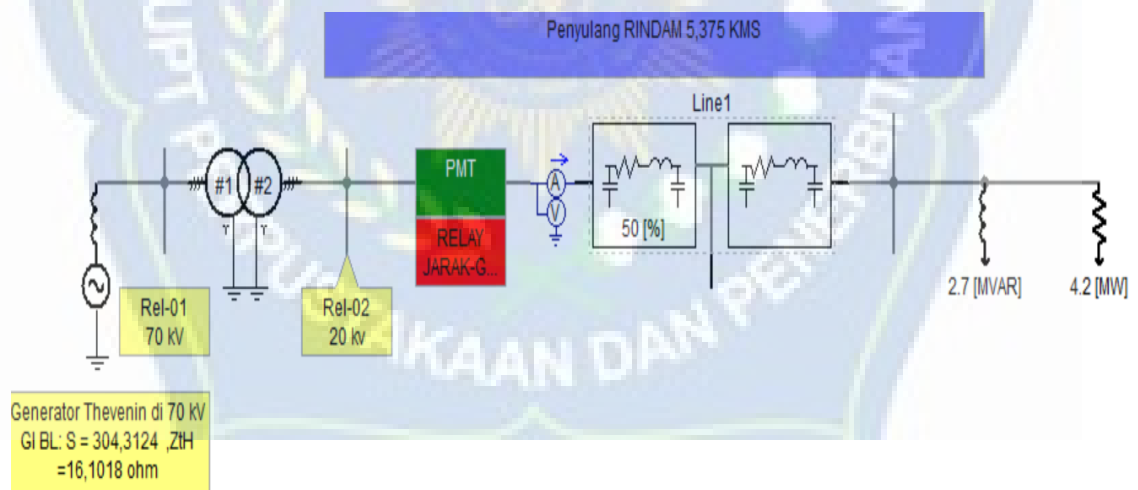
Gambar 4.2 Diagram Segaris Simulasi PSCAD

sebuah sistem tenaga listrik yang terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu sebuah generator Thevenin dengan kapasitas 304,3 MVA dan tegangan 70 kV, serta sebuah transformator yang menurunkan tegangan dari 70 kV menjadi 20 kV. Sistem ini melayani beban dari PT. Mayora, yang memiliki daya aktif sebesar 2,7 MW dan daya reaktif 4,2 MVAR. Sistem kelistrikan tersambung melalui Gardu Induk (GI) Borongloe, yang

dilengkapi dengan proteksi relai pada tegangan 70 kV dan 20 kV untuk menjaga keamanan dan kestabilan operasi. Panjang saluran yang menghubungkan sistem ini adalah sekitar 5,375 km. Proteksi utama dalam sistem ini adalah relai tanah atau relai 21N, yang berfungsi mendeteksi adanya gangguan hubung tanah yang potensial merusak peralatan atau mengganggu kontinuitas pasokan listrik. Dengan konfigurasi ini, sistem dapat memastikan distribusi listrik yang andal dan aman ke beban PT. Mayora melalui proteksi relai yang tepat pada masing-masing tingkat tegangan.

E. Pemodelan Sistem Pada PSCAD

1. Pemodelan Relai Jarak Kondisi Normal



Gambar 4.3 Relai Jarak Kondisi Normal

Program *PSCAD* pada skema Penyaluran Rindam 5,375 KMS berfungsi untuk mensimulasikan sistem penyaluran tenaga listrik secara terintegrasi mulai dari sisi pembangkitan hingga distribusi ke beban akhir. Pada skema tersebut, tegangan dari generator Thevenin yang dimodelkan pada 70 kV disalurkan ke transformator *step-down* 70/20 kV yang akan menurunkan tegangan untuk keperluan distribusi. Perlindungan awal diterapkan melalui relai, yang secara otomatis akan memutus sistem saat terjadi gangguan, sehingga mencegah kerusakan lebih lanjut pada peralatan vital. Setelah melewati pengaman utama, energi listrik akan masuk ke unit pengatur mutu tenaga (PMT) yang memastikan kualitas tegangan, arus, dan frekuensi tetap dalam batas aman. Pada bagian ini juga terdapat relai jarak yang khusus mendeteksi dan memutus sistem bila terdapat gangguan pada saluran transmisi sepanjang Line-1, sehingga area yang terkena gangguan dapat segera diisolasi tanpa mempengaruhi zona distribusi lainnya. Model saluran transmisi pada *PSCAD* mencerminkan kondisi sebenarnya termasuk zona proteksi dengan persentase panjang tertentu daya listrik akan terdistribusi ke dua zona beban yang berbeda, masing-masing memiliki karakteristik kebutuhan daya reaktif (2,7 MVAR dan 4,2 MW). Seluruh sistem pemantauan arus dan tegangan dilakukan melalui titik pengukuran baik secara manual maupun otomatis, hasilnya diintegrasikan ke sistem kontrol untuk mengambil tindakan responsif jika terdeteksi gangguan, kelebihan beban, atau kualitas daya menurun. Melalui simulasi *PSCAD* ini,

seluruh skenario pengoperasian dan gangguan dapat diuji, mulai dari keandalan sistem proteksi, respons perangkat pengaman, hingga efektivitas sistem kontrol dan distribusi.

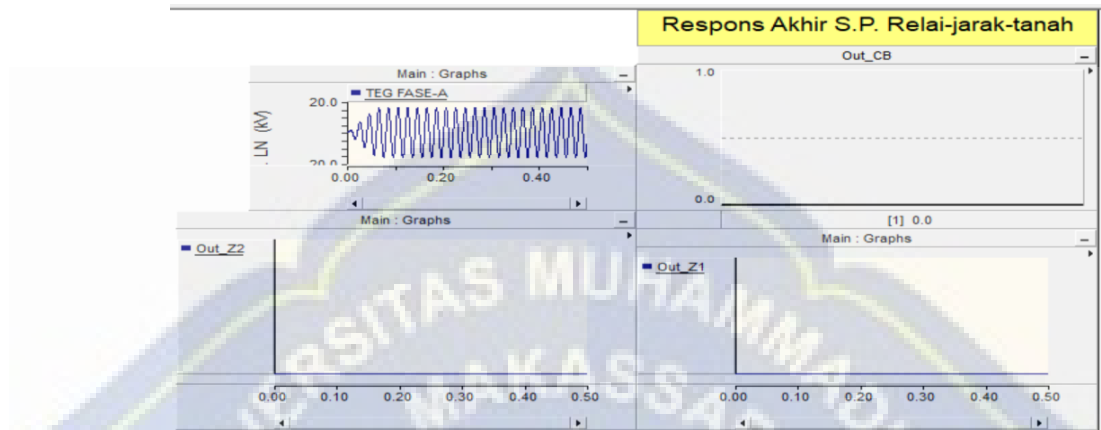
2. Model *PSCAD* Sistem Relai Jarak



Gambar 4.4 Model Sistem Relai Jarak

Diagram ini menunjukkan sistem kontrol yang kompleks dengan beberapa blok yang terintegrasi, termasuk relai, pengukuran arus dan tegangan, serta *transformasi Fourier*. Blok pertama menangani data arus dan tegangan dari sistem tiga fase, di mana sinyal diolah untuk menghasilkan spektrum frekuensi menggunakan fungsi *Fast Fourier Transform (FFT)*. Selanjutnya, data yang diolah diteruskan ke blok pengendali yang menggunakan umpan balik untuk memanipulasi output berdasarkan kondisi saat ini. Beberapa logika kontrol termasuk gerbang AND dan NAND terlihat dalam rangkaian, yang mengatur hasil akhir dari kontrol melalui proses penundaan sebelum menghasilkan *output*. Secara keseluruhan, diagram ini menggambarkan bagaimana berbagai elemen dalam sistem bekerja sama untuk memantau dan mengendalikan parameter listrik dalam aplikasi tertentu.

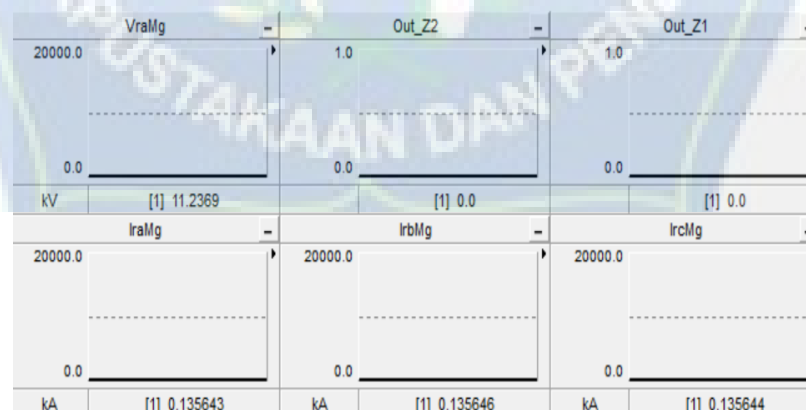
3. *Output* Program Kondisi Normal



Gambar 4.5 *Output* Program Kondisi Normal

Grafik pada Gambar 4.5, menggambarkan sinyal arus relai, tegangan relai pada *output* relai, grafik arus relai dan tegangan relai merupakan *input* pengukuran untuk menentukan arus dan tegangan yang terukur pada penyulang Rindam.

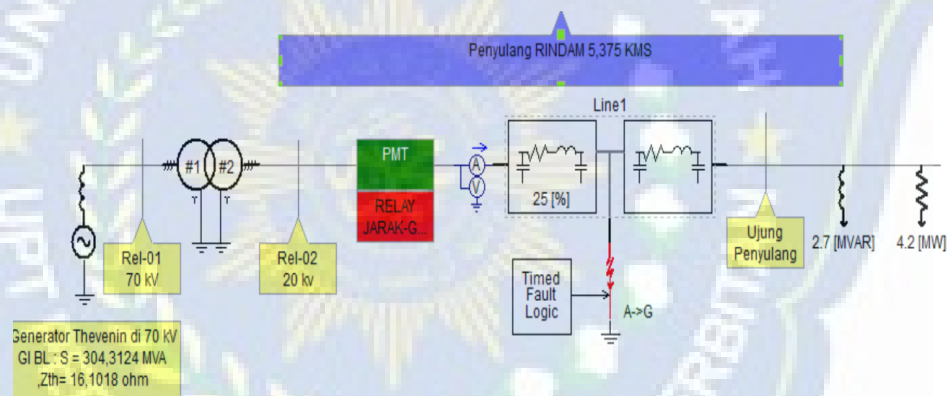
4. *Display* Kondisi Normal



Gambar 4.6 *Display* Kondisi Normal

Sementara itu, *display* pada Gambar 4.6, menggambarkan sinyal nilai numerik yang merupakan hasil pengukuran dan perhitungan sistem. Nilai-nilai tersebut meliputi *output Z1*, *output Z*, tegangan fase A sebesar 11,2369, arus A sebesar 0,135643, arus B sebesar 0,135646 dan arus C sebesar 0,135644. *Display* numerik ini memberikan informasi konkret secara kuantitatif yang digunakan oleh operator untuk menentukan posisi gangguan dan tingkat akurasi estimasi.

5. Pemodelan Relai Jarak Kondisi Gangguan 25%

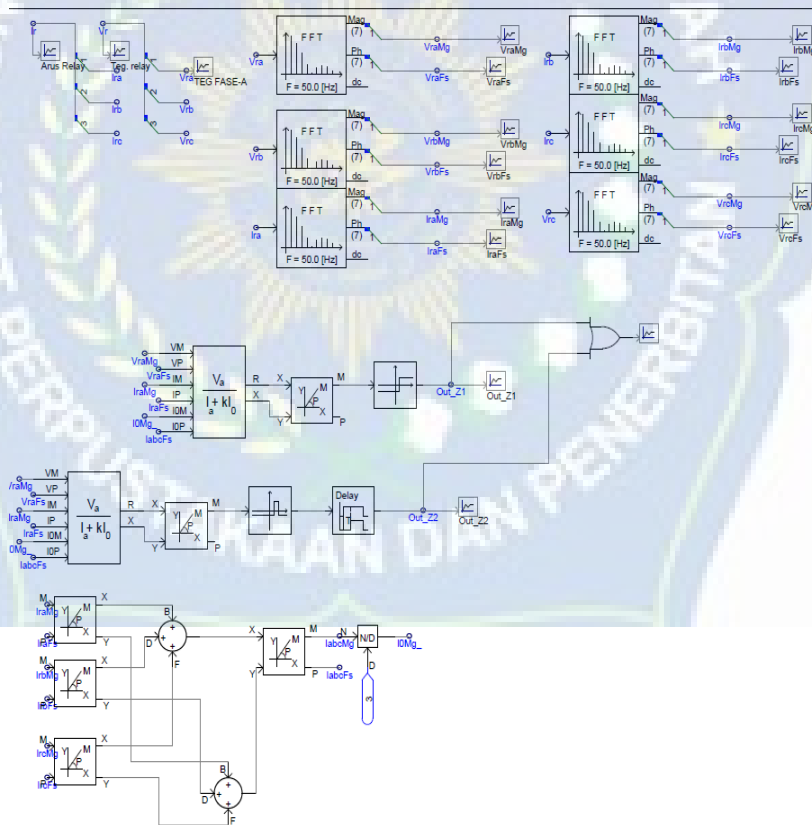


Gambar 4.7 Model *PSCAD* Relai Jarak Kondisi Gangguan 25%

Dalam diagram diatas, sistem kelistrikan yang menggunakan generator thevenin di Gardu Induk Borongloe dengan tegangan 70 kV kemudian disalurkan ke transformator *step-down* 70/20 kV yang akan menurunkan tegangan untuk keperluan distribusi. Rangkaian ini dilengkapi dengan dua relai proteksi, yaitu Rel-01 dan Rel-02 (70 kV dan 20 kV),

masing-masing berfungsi untuk melindungi sistem dari gangguan. Selain itu, terdapat pemantauan arus dan tegangan melalui relai arus yang terhubung ke struktur logika untuk mendeteksi dan menangani gangguan pada jalur 1, dengan simulasi gangguan yang diaplikasikan pada 25% keadaan pada zona 1 dan 2. Kinerja sistem dinilai dari parameter daya reaktif (2,7 MVAR) dan daya aktif (4,2 MW) yang tercatat di ujung penyulang, berkontribusi penting dalam menjaga kestabilan operasi sistem kelistrikan.

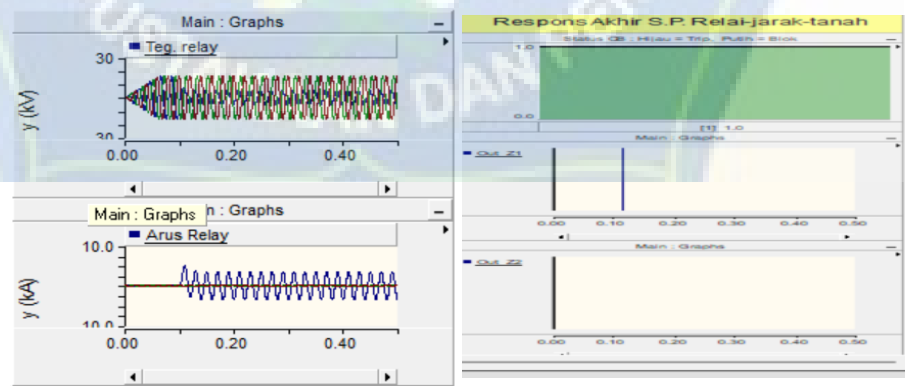
6. Model PSCAD Relai Jarak



Gambar 4.8 Model Relai Jarak

Diagram ini menunjukkan sistem kontrol yang kompleks dengan beberapa blok yang terintegrasi, termasuk relai, pengukuran arus dan tegangan, serta *transformasi Fourier*. Blok pertama menangani data arus dan tegangan dari sistem tiga fase, di mana sinyal diolah untuk menghasilkan spektrum frekuensi menggunakan fungsi *Fast Fourier Transform (FFT)*. Selanjutnya, data yang diolah diteruskan ke blok pengendali yang menggunakan umpan balik untuk memanipulasi output berdasarkan kondisi saat ini. Beberapa logika kontrol termasuk gerbang AND dan NAND terlihat dalam rangkaian, yang mengatur hasil akhir dari kontrol melalui proses penundaan sebelum menghasilkan *output*. Secara keseluruhan, diagram ini menggambarkan bagaimana berbagai elemen dalam sistem bekerja sama untuk memantau dan mengendalikan parameter listrik dalam aplikasi tertentu.

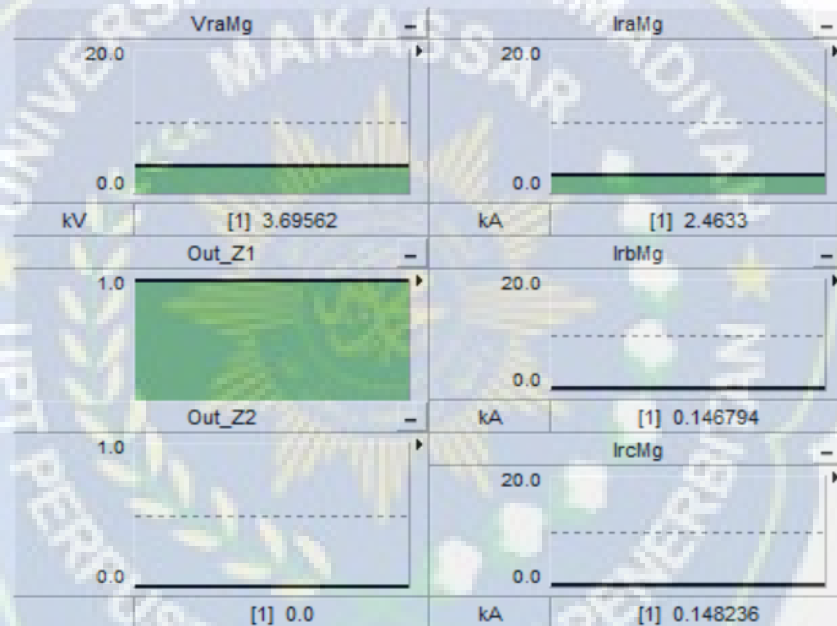
7. *Output Program Kondisi Gangguan 25%*



Gambar 4.9 *Output Kondisi Gangguan 25%*

Grafik pada Gambar 4.9, menggambarkan sinyal arus relai, tegangan relai pada *output* relai, grafik Z1 dan Z2, serta respon akhir relai jarak tanah pada keadaan gangguan 25% yaitu *circuit breaker* dalam keadaan trip (hijau), grafik arus relai dan tegangan relai merupakan *input* pengukuran untuk menentukan arus dan tegangan yang terukur pada penyulang Rindam.

8. *Display* Relai Jarak Kondisi Gangguan 25%



Gambar 4.10 *Display* Relai Kondisi Gangguan 25%

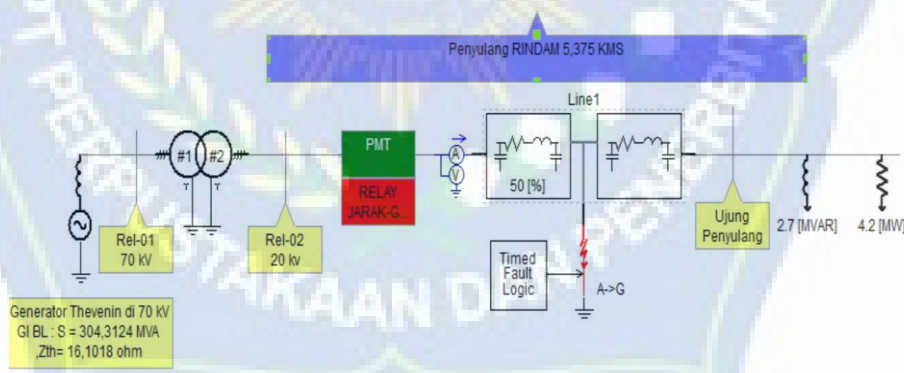
Sementara itu, *display* pada Gambar 4.10, menggambarkan sinyal nilai numerik yang merupakan hasil pengukuran dan perhitungan sistem. Nilai-nilai tersebut meliputi *output* Z1, *output* Z2, tegangan fase A sebesar 3,69562, arus A sebesar 2,4633, arus B sebesar 0,146794 dan

arus C sebesar 0,148236. *Display* numerik ini memberikan informasi konkret secara kuantitatif yang digunakan oleh operator untuk menentukan posisi gangguan dan tingkat akurasi estimasi.

Adapun tabel dari display relai gangguan 25% sebagai berikut:

VraMg	3,69562 kV
Output Z1	1 (relai yang bekerja)
Output Z2	0 (relai tidak bekerja)
IraMg	2,4633 kA
IrbMg	0,146794 kA
IrcMg	0,148236 kA

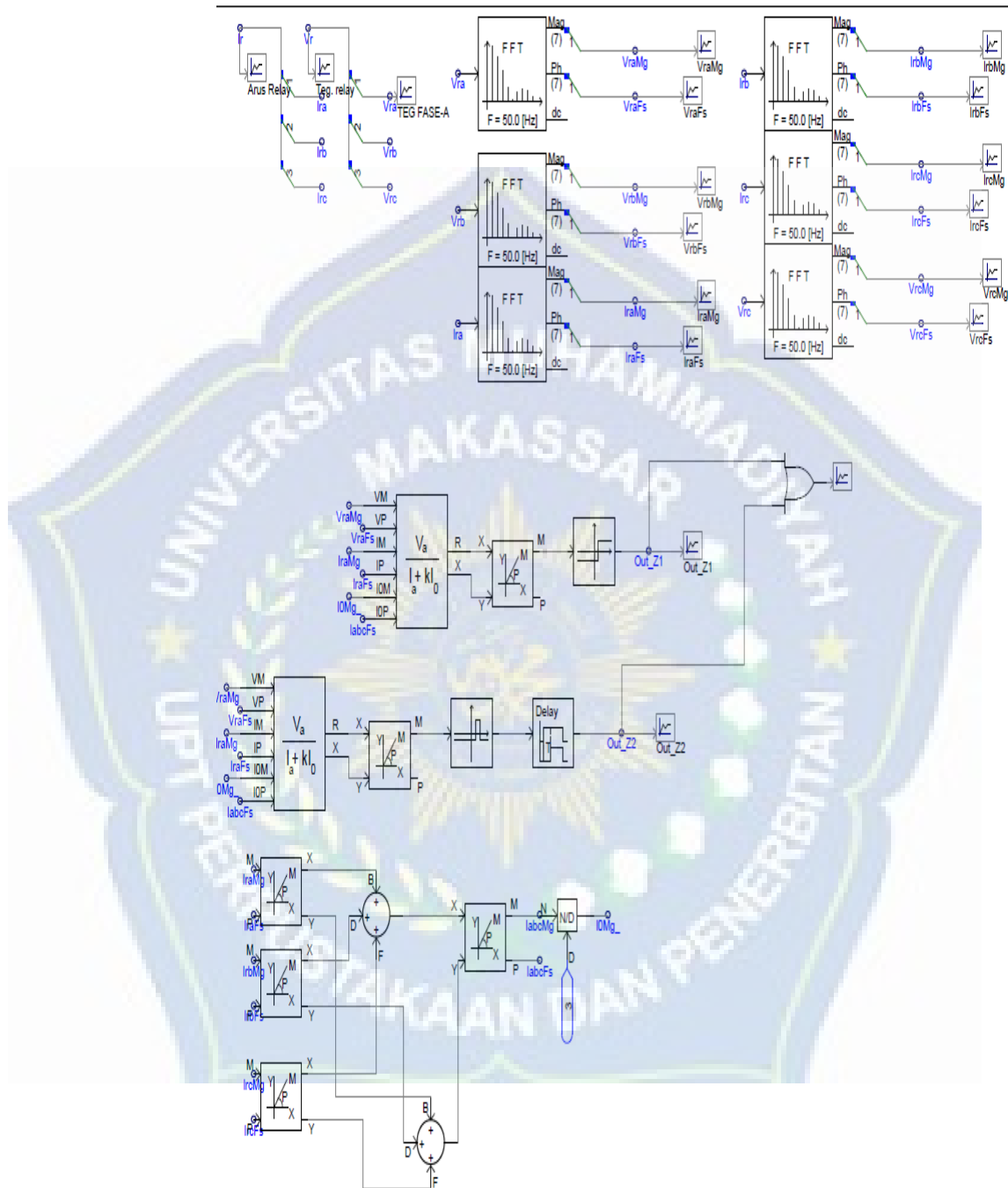
9. Pemodelan Relai Jarak Kondisi Gangguan 50%



Gambar 4.11 Model *PSCAD* Relai Jarak Kondisi Gangguan 50%

Dalam diagram diatas, sistem kelistrikan yang menggunakan generator thevenin di Gardu Induk Borongloe dengan tegangan 70 kV kemudian disalurkan ke transformator *step-down* 70/20 kV yang akan menurunkan tegangan untuk keperluan distribusi. Rangkaian ini dilengkapi dengan dua Relai proteksi, yaitu Rel-01 dan Rel-02 (70 kV dan 20 kV), masing-masing berfungsi untuk melindungi sistem dari gangguan. Selain itu, terdapat pemantauan arus dan tegangan melalui relai arus yang terhubung ke struktur logika untuk mendeteksi dan menangani gangguan pada jalur 1, dengan simulasi gangguan yang diaplikasikan pada 50% keadaan pada zona 1 dan 2. Kinerja sistem dinilai dari parameter daya reaktif (2,7 MVAR) dan daya aktif (4,2 MW) yang tercatat di ujung penyulang, berkontribusi penting dalam menjaga kestabilan operasi sistem kelistrikan

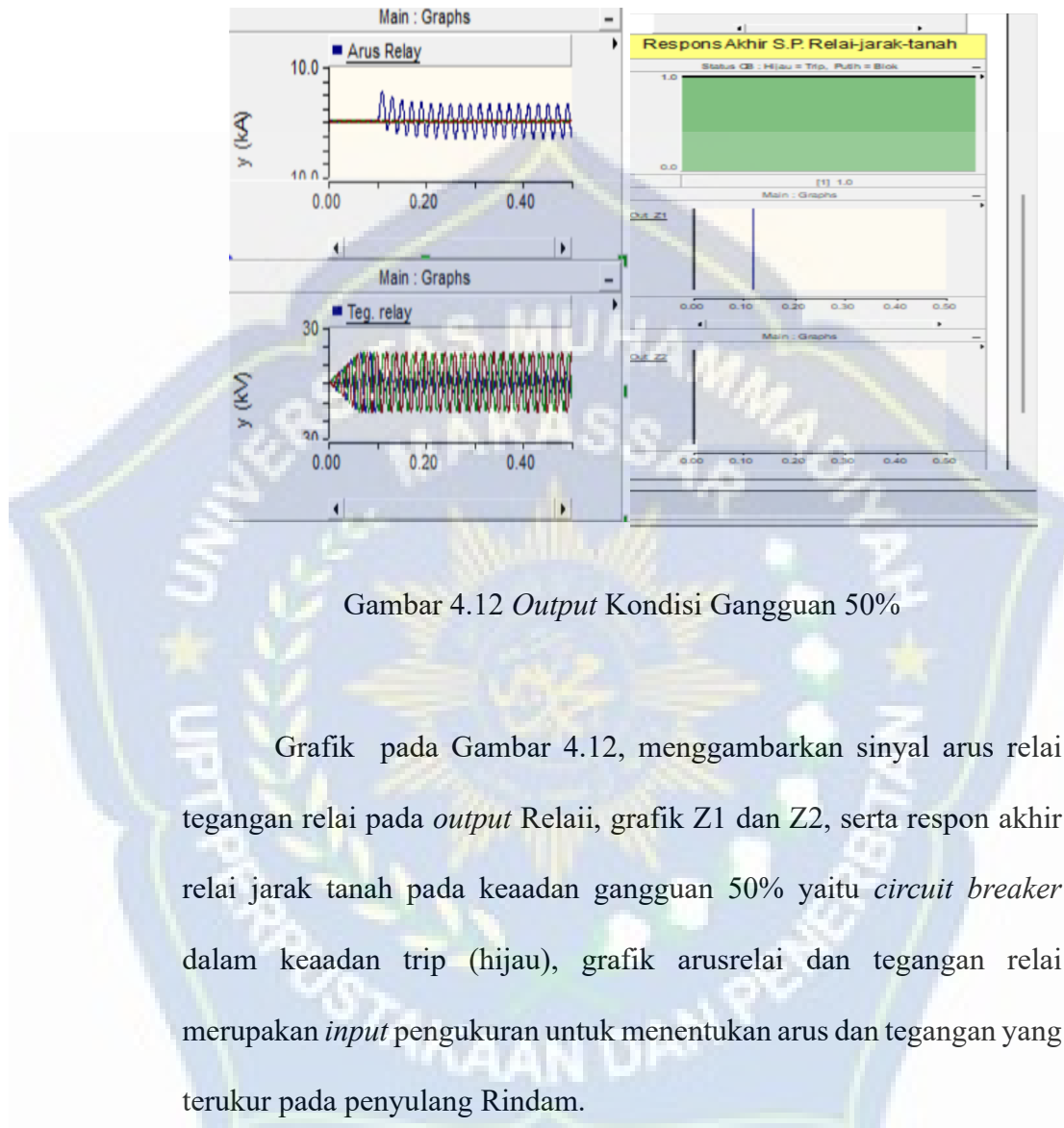
10. Model PSCAD Relai Jarak



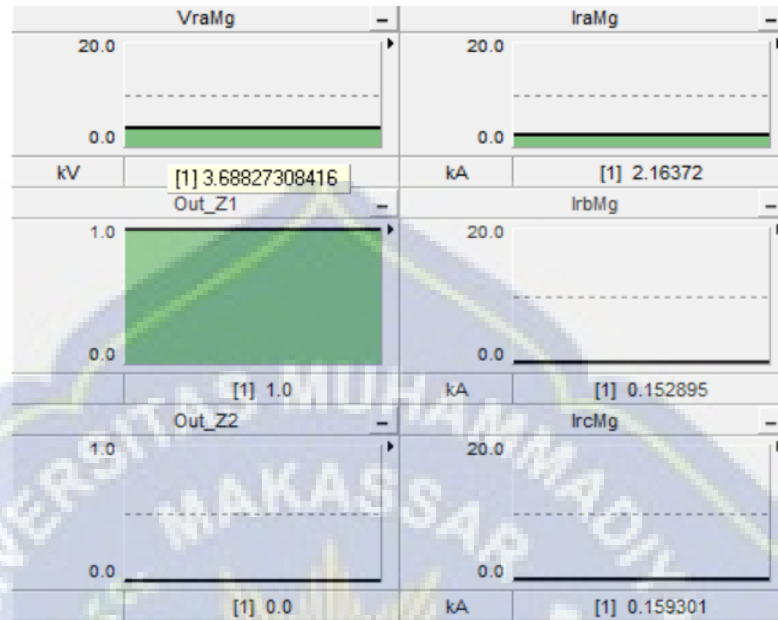
Gambar 4.11 Model Relai Jarak

Diagram ini menunjukkan sistem kontrol yang kompleks dengan beberapa blok yang terintegrasi, termasuk relai, pengukuran arus dan tegangan, serta *transformasi Fourier*. Blok pertama menangani data arus dan tegangan dari sistem tiga fase, di mana sinyal diolah untuk menghasilkan spektrum frekuensi menggunakan fungsi *Fast Fourier Transform (FFT)*. Selanjutnya, data yang diolah diteruskan ke blok pengendali yang menggunakan umpan balik untuk memanipulasi *output* berdasarkan kondisi saat ini. Beberapa logika kontrol termasuk gerbang AND dan NAND terlihat dalam rangkaian, yang mengatur hasil akhir dari kontrol melalui proses penundaan sebelum menghasilkan *output*. Secara keseluruhan, diagram ini menggambarkan bagaimana berbagai elemen dalam sistem bekerja sama untuk memantau dan mengendalikan parameter listrik dalam aplikasi tertentu.

11. Output Program Kondisi Gangguan 50%



12. *Display* Relai jarak kondisi gangguan 50%



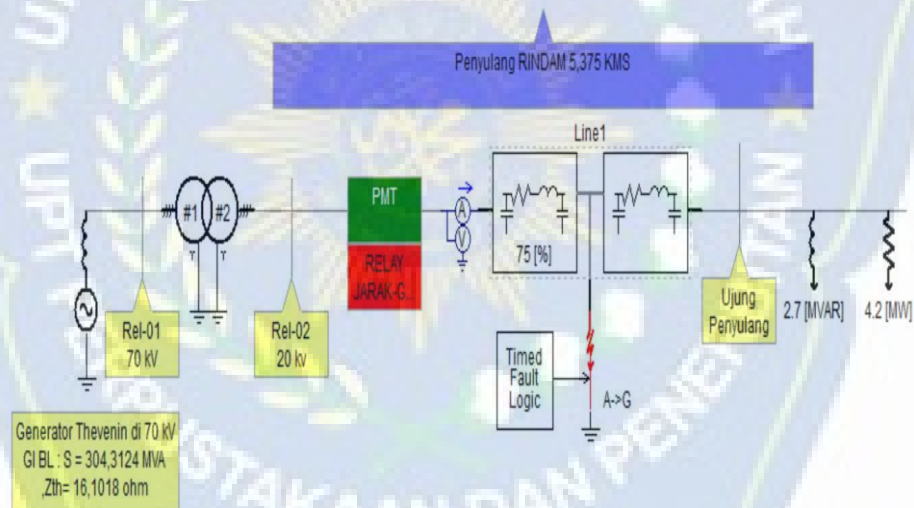
Gambar 4.13 *Display* Relai Kondisi Gangguan 50%

Sementara itu, *display* pada Gambar 4.13, menggambarkan sinyal nilai numerik yang merupakan hasil pengukuran dan perhitungan sistem. Nilai-nilai tersebut meliputi *ouput* Z1, *output* Z2, tegangan fase A sebesar 3,6882, arus A sebesar 2,16372, arus B sebesar 0,152895 dan arus C sebesar 0,159301. *Display* numerik ini memberikan informasi konkret secara kuantitatif yang digunakan oleh operator untuk menentukan posisi gangguan dan tingkat akurasi estimasi.

Adapun tabel dari display relai jarak gangguan 50% sebagai berikut:

VraMg	3,6882 kV
Output Z1	1 (relai yang bekerja)
Output Z2	0 (relai tidak bekerja)
IraMg	2,16372 kA
IrbMg	0,152895 kA
IrcMg	0,159301 kA

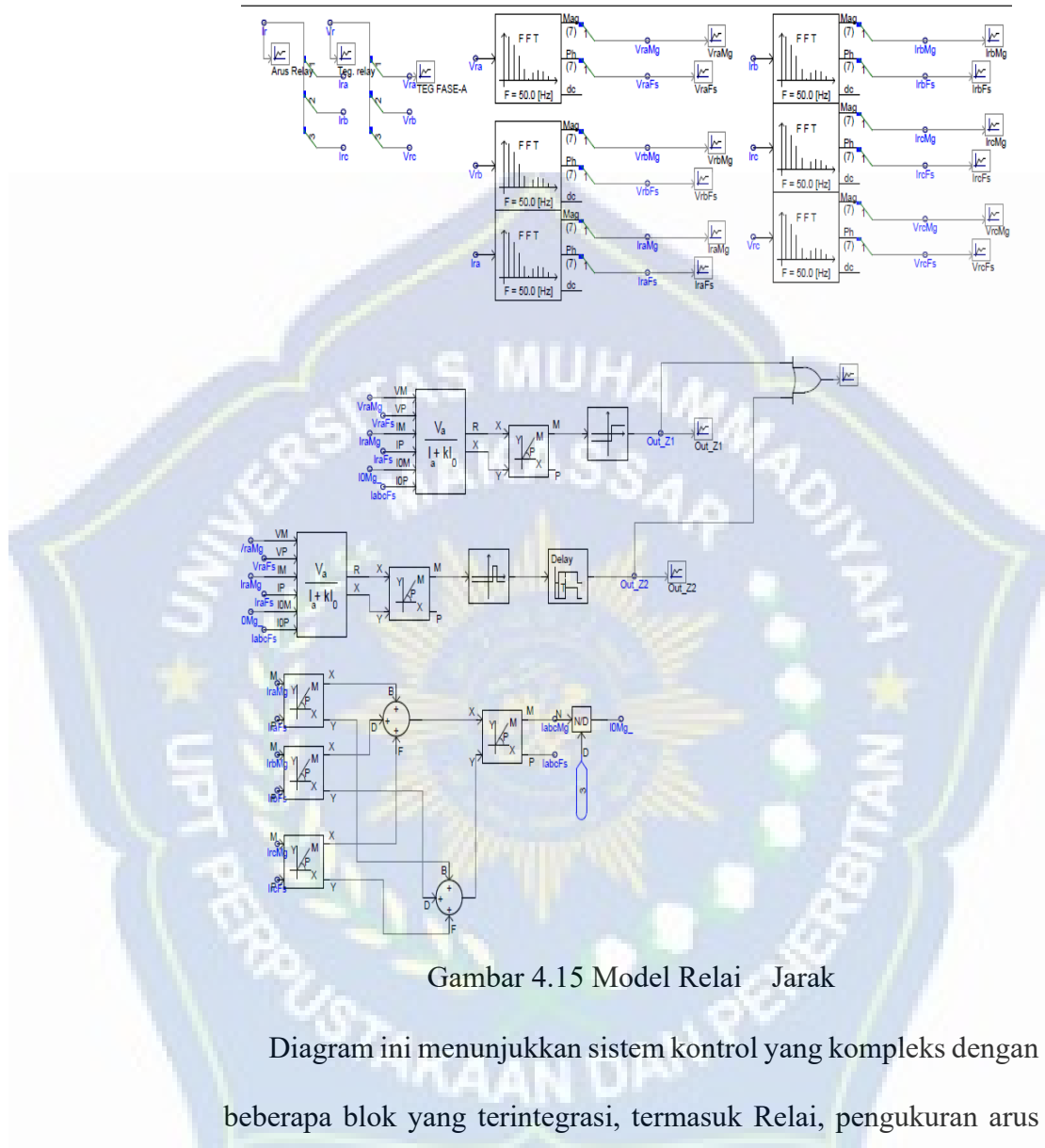
13. Pemodelan Relai Jarak Kondisi Gangguan 75%



Gambar 4.14 Model PSCAD Relai Jarak Kondisi Gangguan 75%

Dalam diagram diatas, sistem kelistrikan yang menggunakan generator thevenin di Gardu Induk Borongloe dengan tegangan 70 kV kemudian disalurkan ke transformator *step-down* 70/20 kV yang akan menurunkan tegangan untuk keperluan distribusi. Rangkaian ini dilengkapi dengan dua relai proteksi, yaitu Rel-01 dan Rel-02 (70 kV dan 20 kV), masing-masing berfungsi untuk melindungi sistem dari gangguan. Selain itu, terdapat pemantauan arus dan tegangan melalui relai arus yang terhubung ke struktur logika untuk mendeteksi dan menangani gangguan pada jalur 1, dengan simulasi gangguan yang diaplikasikan pada 50% keadaan pada zona 1 dan 2. Kinerja sistem dinilai dari parameter daya reaktif (2,7 MVAR) dan daya aktif (4,2 MW) yang tercatat di ujung penyulang, berkontribusi penting dalam menjaga kestabilan operasi sistem kelistrikan

14. Pemodelan PSCAD Relai Jarak

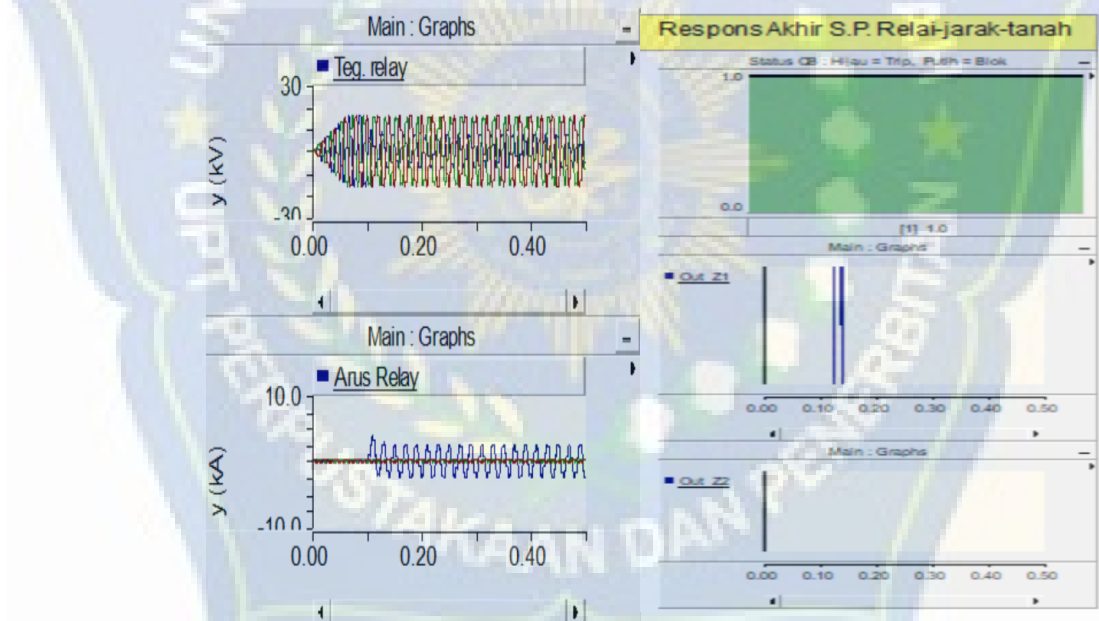


Gambar 4.15 Model Relai Jarak

Diagram ini menunjukkan sistem kontrol yang kompleks dengan beberapa blok yang terintegrasi, termasuk Relai, pengukuran arus dan tegangan, serta *transformasi Fourier*. Blok pertama menangani data arus dan tegangan dari sistem tiga fase, di mana sinyal diolah untuk menghasilkan spektrum frekuensi menggunakan fungsi *Fast Fourier Transform (FFT)*. Selanjutnya, data yang diolah diteruskan

ke blok pengendali yang menggunakan umpan balik untuk memanipulasi *output* berdasarkan kondisi saat ini. Beberapa logika kontrol termasuk gerbang AND dan NAND terlihat dalam rangkaian, yang mengatur hasil akhir dari kontrol melalui proses penundaan sebelum menghasilkan *output*. Secara keseluruhan, diagram ini menggambarkan bagaimana berbagai elemen dalam sistem bekerja sama untuk memantau dan mengendalikan parameter listrik dalam aplikasi tertentu.

15. *Output* Program Kondisi Gangguan 75%

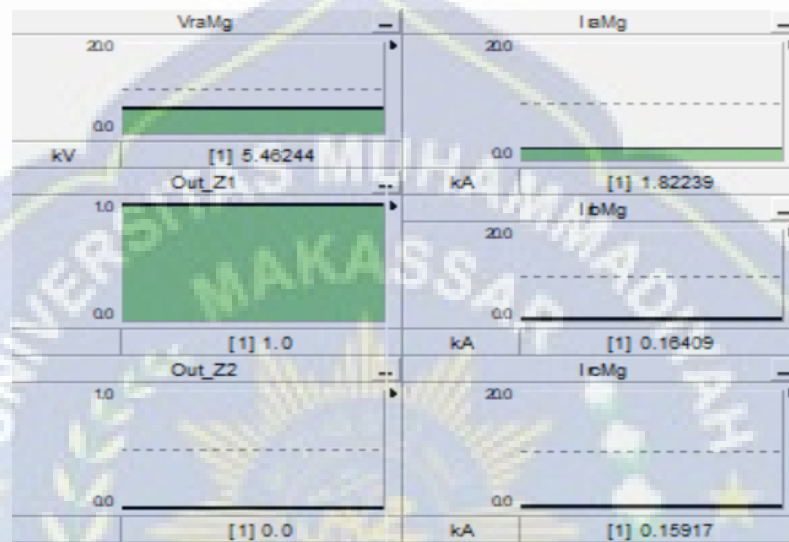


Gambar 4.16 *Output* kondisi Gangguan 75%

Grafik pada Gambar 4.16, menggambarkan sinyal arus relai, tegangan relai pada output relai, grafik Z1 dan Z2, serta respon akhir relai jarak tanah pada keadaan gangguan 75% yaitu *circuit breaker*

dalam keadaan trip (hijau), grafik arus relai dan tegangan relai merupakan *input* pengukuran untuk menentukan arus dan tegangan yang terukur pada penyulang Rindam.

16. *Display* Relai Jarak Kondisi Gangguan 75%



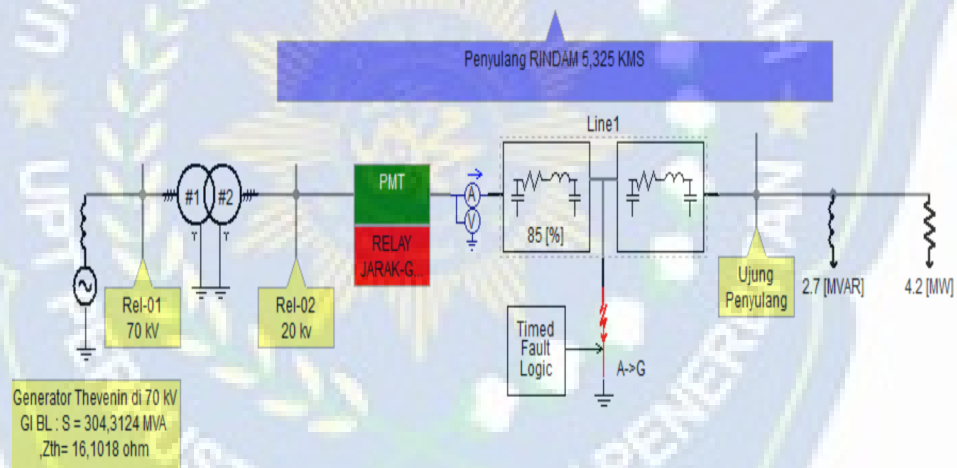
Gambar 4.17 *Display* Relai Kondisi Gangguan 75%

Sementara itu, *display* pada Gambar 4.17, menggambarkan sinyal nilai numerik yang merupakan hasil pengukuran dan perhitungan sistem. Nilai-nilai tersebut meliputi *ouput* Z1, *output* Z2, tegangan fase A sebesar 5,46244 kV, arus A sebesar 1,82239 , arus B sebesar 0,16403 dan arus C sebesar 0,15917. *Display* numerik ini memberikan informasi konkret secara kuantitatif yang digunakan oleh operator untuk menentukan posisi gangguan dan tingkat akurasi estimasi.

Adapun tabel hasil dari display gangguan 75% sebagai berikut ;

VraMg	5,46244 kV
Output Z1	1 (relai yang bekerja)
Output Z2	0 (relai tidak bekerja)
IraMg	1,82239 kA
IrbMg	0,16409 kA
IrcMg	0,15917 kA

17. Pemodelan Relai Jarak Kondisi Gangguan 85%

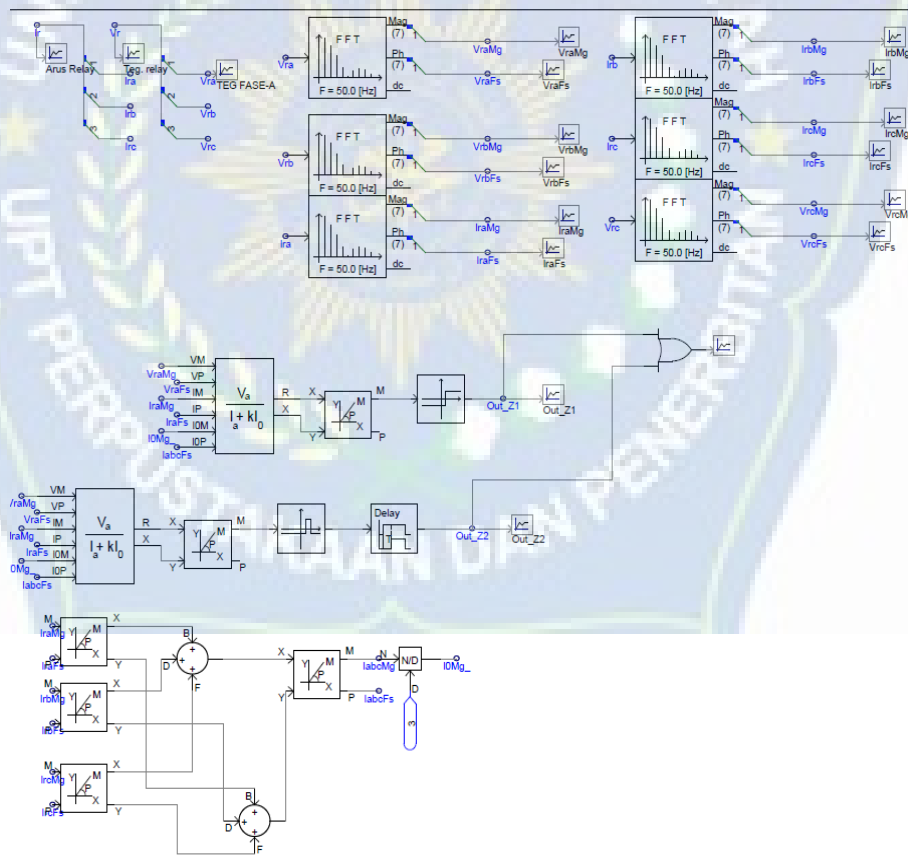


Gambar 4.16 Model PSCAD Relai Jarak Kondisi Gangguan 85%

Dalam diagram diatas, sistem kelistrikan yang menggunakan generator thevenin di Gardu Induk Borongloe dengan tegangan 70 kV kemudian disalurkan ke transformator *step-down* 70/20 kV yang akan menurunkan tegangan untuk keperluan distribusi. Rangkaian ini dilengkapi dengan dua relai proteksi, yaitu Rel-01 dan Rel-02 (70 kV dan 20 kV),

masing-masing berfungsi untuk melindungi sistem dari gangguan. Selain itu, terdapat pemantauan arus dan tegangan melalui relai arus yang terhubung ke struktur logika untuk mendeteksi dan menangani gangguan pada jalur 1, dengan simulasi gangguan yang diaplikasikan pada 50% keadaan pada zona 1 dan 2. Kinerja sistem dinilai dari parameter daya reaktif (2,7 MVAR) dan daya aktif (4,2 MW) yang tercatat di ujung penyulang, berkontribusi penting dalam menjaga kestabilan operasi sistem kelistrikan

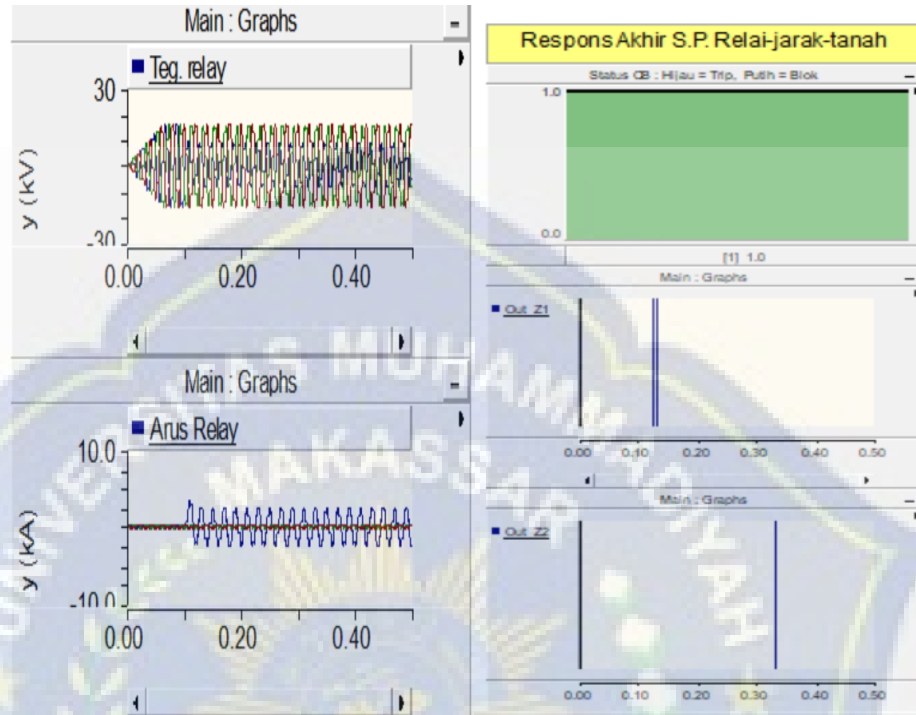
18. Model *PSACD* Sistem Relai Jarak



Gambar 4.17 Model Sistem Relai Jarak

Diagram ini menunjukkan sistem kontrol yang kompleks dengan beberapa blok yang terintegrasi, termasuk relai, pengukuran arus dan tegangan, serta *transformasi Fourier*. Blok pertama menangani data arus dan tegangan dari sistem tiga fase, di mana sinyal diolah untuk menghasilkan spektrum frekuensi menggunakan fungsi *Fast Fourier Transform (FFT)*. Selanjutnya, data yang diolah diteruskan ke blok pengendali yang menggunakan umpan balik untuk memanipulasi *output* berdasarkan kondisi saat ini. Beberapa logika kontrol termasuk gerbang AND dan NAND terlihat dalam rangkaian, yang mengatur hasil akhir dari kontrol melalui proses penundaan sebelum menghasilkan *output*. Secara keseluruhan, diagram ini menggambarkan bagaimana berbagai elemen dalam sistem bekerja sama untuk memantau dan mengendalikan parameter listrik dalam aplikasi tertentu.

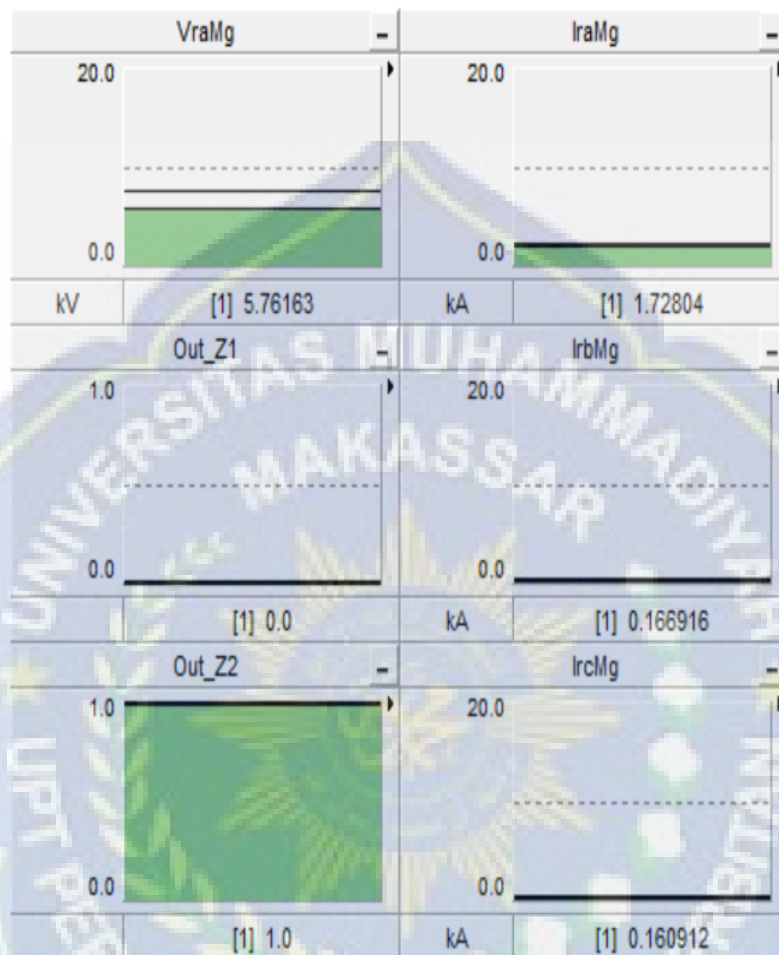
19. Output Relai Kondisi Gangguan 85%



Gambar 4.18 Output Relai Kondisi Gangguan 85%

Grafik pada Gambar 4.12, menggambarkan sinyal arus relai , tegangan relai pada *output* relai , grafik Z1 dan Z2, serta respons akhir relai jarak tanah pada keadaan gangguan 85% yaitu *circuit breaker* dalam keadaan trip (hijau), grafik arus relai dan tegangan relai merupakan *input* pengukuran untuk menentukan arus dan tegangan yang terukur pada penyulang Rindam.

20. *Display* Relai Kondisi Gangguan 85%



Gambar 1.19 *Display* Relai Kondisi Gangguan 85%

Sementara itu, *display* pada Gambar 4.19, menggambarkan sinyal nilai numerik yang merupakan hasil pengukuran dan perhitungan sistem. Nilai-nilai tersebut meliputi *output* Z1, *output* Z2, tegangan fase A sebesar 5,76163, arus A sebesar 1,72804, arus B sebesar 0,166916 dan arus C sebesar 0,160921. *Display* numerik ini memberikan informasi

konkret secara kuantitatif yang digunakan oleh operator untuk menentukan posisi gangguan dan tingkat akurasi estimasi.

Adapun tabel hasil dari display gangguan 85% sebagai berikut:

VraMg	5,76163 kV
Output Z1	0 (relai tidak bekerja)
Output Z2	1 (relai yang bekerja)
IraMg	1,72804 kA
IrbMg	0,166916 kA
IrcMg	0,160912 kA

BAB V

PENUTUP

A. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dalam tugas akhir ini, telah dikembangkan model aplikasi relai jarak-tanah (21N) di Penyulang Rindam yang tersuplai oleh GI Borongloe, menggunakan software PSCAD (versi pelajar), dengan hasil sebagai berikut:

1. Model aplikasi relai jarak-tanah berbasis PSCAD saluran distribusi penyulang Rindam tegangan 20 kV, telah berhasil direalisasikan. Ia terdiri dari dua model, yaitu model sistem daya Penyulang Rindam yang memodelkan karakteristik saluran distribusi, serta model relai jarak dengan komponen-komponen seperti komponen Phi Transmission Line, Three-phase Fault, Timed fault logic, CT dan VT, FFT Frequency scanner dan Impedance Processor.
2. Model relai jarak-tanah ini diuji untuk berbagai kondisi operasi dari normal hingga tipe gangguan satu-fase ke tanah (Fase AG) dari titik lokasi gangguan 25 sampai 85% pada saluran. Relai menunjukkan operasi pengiriman sinyal blok untuk kondisi normal dan sebaliknya ia mengirimkan sinyal trip ke CB, pada saat gangguan Fase A, di titik 25, 50, 75 sampai 85% dari posisi relai. Relai menunjukkan kinerja yang sangat baik dalam merespons kedua kondisi operasi yang diujikan.

B. SARAN

Berdasarkan simulasi disarankan untuk peneliti selanjutnya memodelkan gangguan pada fase, bukan hanya pada fase ke tanah. Hal ini dikarenakan pada penelitian ini model yang dikembangkan masih terbatas pada gangguan satu fase ke tanah (fase A). Dengan memodelkan gangguan yang hanya melibatkan fase saja, dapat diperoleh pemahaman dan analisis yang lebih lengkap mengenai berbagai tipe gangguan yang mungkin terjadi di sistem distribusi, termasuk gangguan antar fase maupun gangguan fase ke netral, sehingga proteksi yang dihasilkan lebih akurat dan andal.

DAFTAR PUSTAKA

- ADHA, M. R. (2024). *Studi Analisis Koordinasi Zona Proteksi Relai Jarak Saluran Transmisi GI Kendari-GI Kasipute Sebelum dan Setelah Masuknya Saluran Transmisi Baru= Analytical Study of Distance Relai Protection Zones Coordination of Transmission Lines from Kendari Substation to Kasipute Substation Before and After New Transmission Line Addition* (Doctoral dissertation, Universitas Hasanuddin).
- Andreansyah, L., Gunawan, G., & Sukoco, B. (2020). Analisis Relai Jarak Sebagai Proteksi Pada Jaringan Transmisi Saluran Udara Tegangan Tinggi 150 KV Gardu Induk Randu Garut –Weleri. *Prosiding Konstelasi Ilmiah Mahasiswa Unissula (KIMU) Klaster Engineering*.
- Anshar, C. N., & Budiman, B. (2022). Studi Analisa Arus Gangguan Hubung Singkat Berdasarkan Lokasi Titik Gangguan Pada Saluran Udara Tegangan Menengah 20 kV. *Jurnal Teknik, Komputer, Agroteknologi Dan Sains*, 1(1), 140-149.
- Duyo, R. A. (2020). Analisis Penyebab Gangguan Jaringan Pada Distribusi Listrik Menggunakan Metode Fault Tree Analysis Di Pt. Pln (Persero) Rayon Daya Makassar. *Vertex Elektro*, 12(2), 1-12.
- Iriando, G. R., & Agung, A. I. (2019). Studi Koordinasi Sistem Proteksi Pada Transformator 20KV Di Jaringan Distribusi 20KV Penyulang Bandilan. *Jurnal Teknik Elektro*, 8(3).
- Liu, J. F., Wilson, P. L., & Jayasinghe, R. P. (2004, April). A PSCAD/EMTDC based simulation study of protective Relai. In *Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection* (pp. 264-267). Stevenage UK: IEE.
- Mangera, P., & Jayadi, J. (2023). Analisi Rugi Tegangan Jaringan Distribusi 20 KV pada Penyulang KOMPI C PT. PLN (Persero) UP3 Merauke. *MUSTEK ANIM HA*, 12(01), 56-63.
- Multi, A., & Addaus, T. (2022). Analisa Proteksi Over Current Relai (OCR) Dan Ground Fault Relai (GFR) Pada Transformator Daya Gardu Induk. *SAINSTECH: Jurnal Penelitian dan Pengkajian Sains dan Teknologi*, 32(1), 1-8.

- Nadeak, P., Sitompul, T. P., & Napitupulu, J. (2024). Studi Penggunaan Relai pada Saluran Transmisi Gardu Induk TELE SAMOSIR. *Jurnal Tteknologi Energi UDA: Jurnal Teknik Elektro*, 13(1), 18-26.
- Purba, Y. P., & Pramono, W. B. (2018, June). Analisi Relai Jarak Jaringan Transmisi 150 KV GI KARIANGAU-GI KUARO. IN *PROSIDING SEMINAR NASIONAL ENERGI & TEKNOLOGI (SINERGI)* (pp. 25-32).
- Sampeallo, A. S., Nursalim, N., & Sagho, M. A. S. (2020). Evaluasi Penyetelan Rele Jarak Pada Jaringan Transmisi 70 KV Bolok–Maulafa Menggunakan Digsilent 15.1. 7. *Jurnal Media Elektro*, 1-9.
- Semuel, N., Tumaliang, H., Patras, L., & Pakiding, M. (2012). Koordinasi Setting Relai Jarak Pada Transmisi 150 kV PLTU 2 SULUT 2 X 25 MW. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, 1(3).
- Syukriyadin, S., Syahrizal, S., & Nakhrisya, C. R. (2011). Analisis Proteksi Relai Differensial Terhadap Gangguan Internal dan Eksternal Transformator Menggunakan PSCAD/EMTDC. *Jurnal Rekayasa Elektrika*, 9(3), 101-107.
- Wijaya, B. A., Ihsandi, A., Nainggolan, O., & Murdiyat, P. (2024). Rancang Bangun Rele Arus Lebih Tipe Inverse Time Dengan Time Multiplier Setting 0, 05 Detik Berbasis Arduino. *PoliGrid*, 5(1).

LAMPIRAN A

Beberapa komponen yang digunakan dalam pemodelan rangkaian simulasi normal dan gangguan pada aplikasi *PSCAD* meliputi :

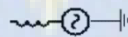
1. Output Channel



Gamabar A.1 Bentuk Komponen Output Channel

Output channel merupakan komponen yang berperan sebagai pengeluaran sinyal dari suatu simulasi, yang dapat berupa kurva, grafik, polimeter, meter, dan lain-lain

2. Three-Phase Voltage Source Model 2



Gambar A.2 Bentuk Komponen Sumber Tiga Fasa

Three-Phasa Voltage Source model 2 adalah komponen yang memberikan input tegangan (kV), frekuensi (Hz) dan tipe impedansi yang diinginkan.

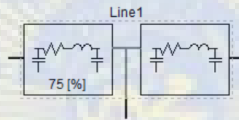
3. Multimeter



Gambar A.3 Bentuk Komponen Multimeter

Multimeter adalah komponen yang berfungsi untuk mengukur nilai arus (KA), tegangan (kV), tegangan RMS (kV) dan sudut phasa (derajat atau radians).

4. Coupled PI Section Transmission Line



Gambar A.4 Komponen Coupled PI Section Transmssion Line

Saluran transmisi bagian PI yang digabungkan dalam perangkat lunak *PSCAD* digunakan untuk memodelkan karakteristik listrik dari saluran transmisi dengan mewakilinya sebagai rangkaian ekuivalen. Pendekatan ini memungkinkan simulasi yang akurat dari aliran daya dan analisis transien dalam sistem tenaga.

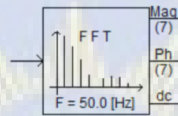
5. Ground



Gabar A.5 Bentuk Komponen Ground

Grounding adalah suatu jalur langsung dari arus listrik menuju bumi atau koneksi fisik langsung ke bumi.

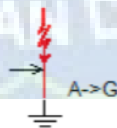
6. *On-Line Frequency Scanner (FFT)*



Gambar A.6 Bentuk Komponen FFT

FFT adalah sebuah komponen yang dapat memproses nilai arus atau tegangan untuk menghasilkan nilai magnitudo dan sudut fase. Nilai magnitudo atau sudut fase berupa nilai domain waktu ($I \angle \Theta$) dimana nilai I adalah magnitudo dan Θ adalah sudut fase.

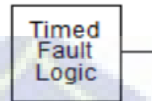
7. *Three-Phase Fault*



Gambar A.7 Bentuk Komponen Three-Phase Fault

Three-phase Fault adalah sebuah komponen untuk melakukan pemodelan gangguan pada sistem daya.

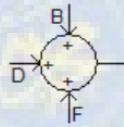
8. *Timed Fault Logic*



Gambar A.8 Bentuk Komponen *Timed Fault Logic*

Timed fault logic adalah komponen yang berfungsi untuk pengaturan waktu gangguan. Waktu yang diatur berupa saat mulai gangguan (*apply fault*), dan lam waktu terjadi gangguan (*duration fault*).

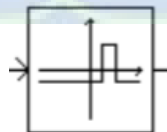
9. *Summing/Difference Junction*



Gambar A.9 Bentuk Komponen *Summing/Difference Junction*

Summing/Difference Junction adalah sebuah komponen yang dapat menjumlahkan atau mengurangi nilai yang diinginkan.

10. *Range Comparator*



Gambar A.10 Bentuk Komponen *Range Comparator*

Range comparator adalah adalah suatu komponen yang berfungsi sebagai detector pita yang menghasilkan satu nilai yang *input* berada diantara dua batas, dan nilai yang berbeda diantara dua batas.

11. *Signal Name*



SignalName

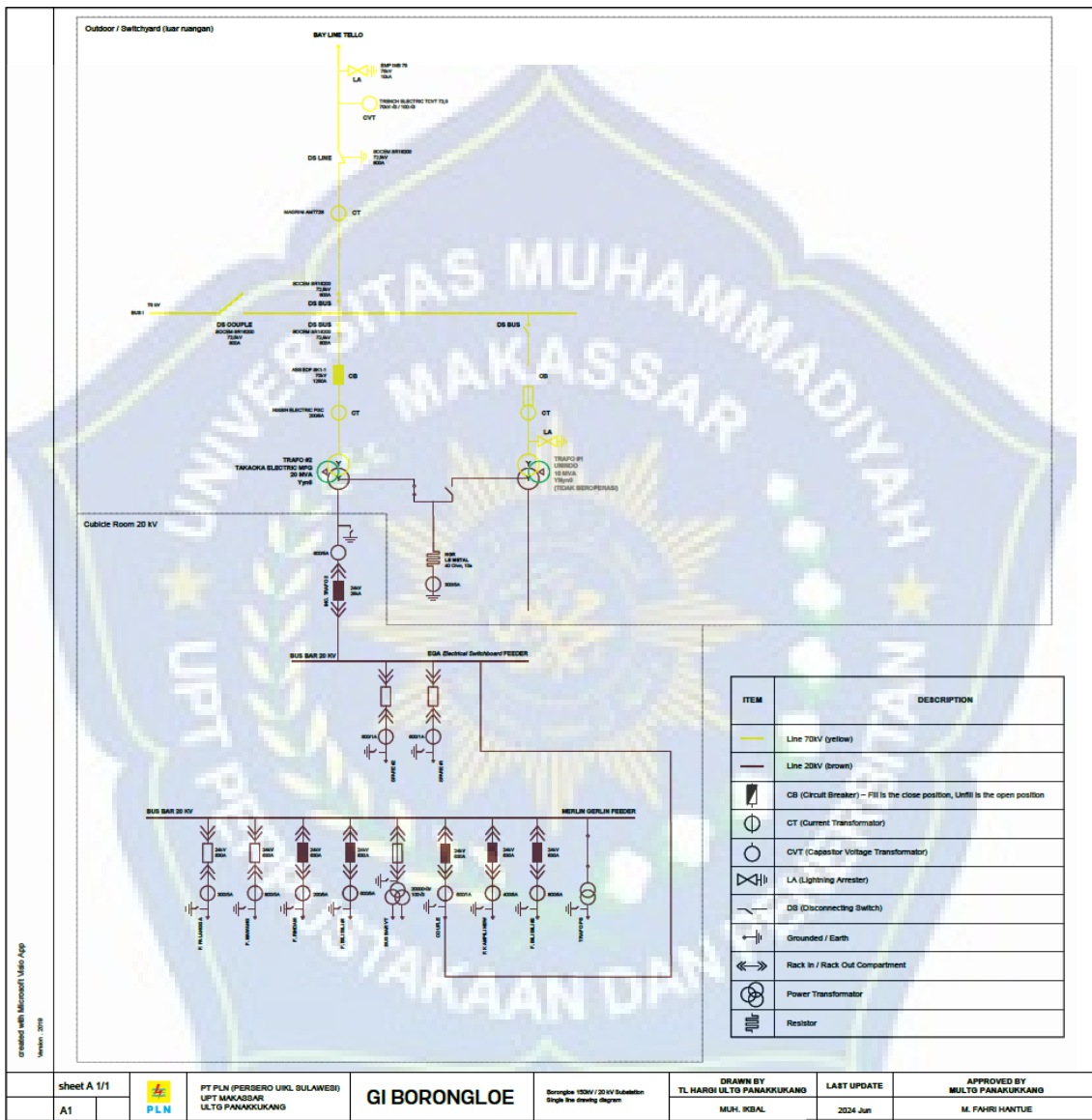
Gambar A.10 Bentuk Komponen *Signal Name*

Label data dapat digunakan untuk menetapkan nama sinyal ke kawat yang membawa sinyal data jika nama sinyal datainput cocok dengan nama sinyal data lain dalam modul halaman yang sama (atau halaman utama), kedua sinyal ini dianggap terhubung bersama.

Label data digunakan untuk mentransfer sinyal data dalam suatu halaman atau untuk menyediakan titik koneksi untuk sinyal output internal yang dihasilkan dalam komponen. Label data tidak dapat digunakan untuk mentransfer data antar halaman.

LAMPIRAN B

DATA PENELITIAN DAN DOKUMENTASI



Gambar B.1 Diagram line GI BORONGLOE
Sumber PLN 2025



Gambar B.2 Diagram Penyulan Rindam
Sumber PLN 20205

Pada hari ini Senin, tanggal Tujuh Belas bulan Februari tahun Dua Ribu Dua Puluh Lima (17/02/2025), telah dilaksanakan Pengoperasian Jaringan Distribusi sebagai berikut :

I. Lokasi

Alamat : JURUSAN MAYORA 1
Panjang Jaringan (KMS) 5,375 KMS
Jenis Konduktor XLPE 240 MM2

II. PO NO : 'SPK NO.0164.SPJB/AGA.04.01/F16100000/2024 III. Waktu Penjumlahan
SENIN/17-02-2025

Demikian berita acara ini dibuat dengan sebenarnya, dengan ini manajemen trafo tersebut dinyatakan telah selesai.

Pelaksana Pekerjaan,

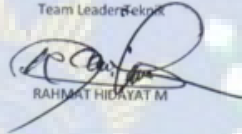


PT. LAKAWAN

Team Leader

Mengetahui,

Team Leader Teknik



RAHMAT HIDAYAT M

Pengawas Pekerjaan,
Staff Teknik U

MUH. AZWAR

-L. PT PLN (PERSERO) UID SULSELBAR
UP3 MAKASSAR SELATAN
PLN ULP SUNGGUMINASA

REALISASI 1 DARI 3

DOWMENTASI FOTO

Pengawas Pekerjaan,
Team Leader Teknik



RAHMAT HIDAYAT M

Gambar Surat B.3 Data Panjang Dan Impedans Penyulan Rindam

**DATA HUBUNG SINGKAT GARDU INDUK TERSEBAR
SISTEM SULBAGSEL - UIP3B SULAWESI**

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 BORONGLOE	70	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

Gambar Tabel B.4 Data Hubung-Singkat GI BORONGLOE
Sumber : PLN 2025



Gambar B.5 Namplate Trafo 2 GI BORONGLOE
Sumber : PLN 2025



Gambar B.6 Surat Izin Penelitian



**UID SULSELBARABAR
UP3 MAKASSAR SELATAN**

Nomor : 1456/STH.01.04/F16100000/2025
 Lampiran : 1 Set
 Sifat : Segera - Biasa
 Hal : Persetujuan Permintaan Data Penyelesaian Tugas Akhir

13 Agustus 2025

Kepada

Yth, Wakil Dekan I
 Fakultas Teknik
 Universitas Muhammadiyah
 Makassar

Menunjuk Surat Saudara Nomor 006/DEKAN-I/FEB/UPRI/VI/2025 tanggal 12 Juni 2025 perihal Izin Penelitian, maka disampaikan bahwa:

NO	NAMA/NIM	PROGRAM STUDI	JUDUL PENELITIAN
1	Nur Hikmah Afsa/ 2162201060	Teknik Elektro	Model Penerapan dan Simulasi Kinerja Relai Jarak - Tanah di Penyulang Boulevard PLN Sulselrabar dengan Menggunakan Perangkat PSCAD

Dapat kami setuju untuk melaksanakan Penelitian di PT. PLN (Persero) UP3 Makassar Selatan tanggal 18 Agustus - 18 September 2025.
 Adapun ketentuan yang harus dilaksanakan selama melaksanakan penelitian di Lingkungan PT PLN (Persero) UP3 Makassar Selatan, yaitu:

- Data penelitian hanya berhubungan dengan Laporan sesuai dengan judul di atas.
- Mengikuti dan menaati aturan yang berlaku di PT. PLN (Persero) UP3 Makassar Selatan
- Data penelitian yang diberikan oleh PT PLN (Persero) UP3 Makassar Selatan agar dipergunakan hanya untuk keperluan penelitian, bukan untuk tujuan komersil/publikasi di media massa.
- Apabila terdapat penyalahgunaan terhadap data penelitian yang diberikan, maka PT PLN (Persero) UP3 Makassar Selatan berhak menindaklanjuti sesuai peraturan yang berlaku.
- Hasil Laporan disampaikan ke Team Leader Administrasi Umum UP3 Makassar Selatan sebanyak 1 (Satu) Eksamplar.

Demikian kami sampaikan untuk dapat diperhatikan. Atas kerjasama Bapak/Ibu, kami ucapkan terima kasih.

PLH MANAGER UNIT PELAKSANA
 PELAYANAN PELANGGAN MAKASSAR SELATAN,
 ASSISTANT-MANAGER PERENCANAAN,



RUDI YUNianto

Gambar B.6 Surat Izin Penelitian



**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 : Nur Hikmah Afsa

Nim : 105821101721

Program Studi : Teknik Elektro

Dengan nilai:

No	Bab	Nilai	Ambang Batas
1	Bab 1	10%	10 %
2	Bab 2	8%	25 %
3	Bab 3	9%	10 %
4	Bab 4	2%	10 %
5	Bab 5	0%	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, 26 Agustus 2025

Mengetahui,

Kepala UPT- Perpustakaan dan Penerbitan,


Nurshah, S.H., M.I.D.
NBM. 964 591

Jl. Sultan Alauddin no 259 makassar 90222
Telepon (0411)866972,881 593,fax (0411)865 588
Website: www.library.unismuh.ac.id
E-mail : perpustakaan@unismuh.ac.id