

SKRIPSI
SIMULASI RELAI DIFERENSIAL UNTUK PROTEKSI
TRANSFORMATOR DAYA MENGGUNAKAN PSCAD/EMTDC



FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR

2019

Simulasi Relai Diferensial untuk Proteksi Transformator Berbasis Perangkat Lunak *PSCAD/EMTDC*

Skripsi
Diajukan sebagai Salah Satu Syarat
untuk Memperoleh Gelar Sarjana
Program Studi Teknik Elektro
Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik

Oleh :

MUMAYYIZ ARIFIN
105 82 1485 14

ASTRA FIRMAN
105 82 1497 14

Pada

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR
2019



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR

FAKULTAS TEKNIK

GEDUNG MENARA IQRA LT. 3

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

Website: www.unismuh.ac.id, e_mail: elektroft@unismuh.ac.id

Website: <http://teknik.unismuh.makassar.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 Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.

Judul Skripsi : **SIMULASI RELAY DIFFERENSIAL UNTUK PROTEKSI TRANSFORMATOR DAYA MENGGUNAKAN PSCAD/EMTDC**

Nama : 1. Mumayyiz Arifin
2. Astra Firman

Stambuk : 1. 10582 1485 14
2. 10582 1497 14

Makassar, 31 Agustus 2019

Telah Diperiksa dan Disetujui
Oleh Dosen Pembimbing;

Pembimbing I

Pembimbing II

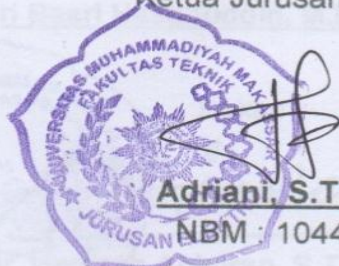
Dr. Eng. Ir. H. Zulfajri Basri Hasanuddin, M.Eng

Andi Faharuddin, S.T.,M.T

NIP.132169986

Mengetahui,

Ketua Jurusan Elektro



Adriani, S.T., M.T.

NBM : 1044 202



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR

FAKULTAS TEKNIK

GEDUNG MENARA IQRA LT. 3

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

Website: www.unismuh.ac.id, e_mail: elektroft@unismuh.ac.id

Website: <http://teknik.unismuh.makassar.ac.id>

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ PENGESAHAN

Skripsi atas nama Mumayyiz Arifin dengan nomor induk Mahasiswa 10582 1485 14 dan Astra Firman dengan nomor induk Mahasiswa 10582 1497 14 dinyatakan diterima dan disahkan oleh Panitia Ujian Tugas Akhir/Skripsi sesuai dengan Surat Keputusan Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar Nomor : 0010/SK-Y/20201/091004/2019, sebagai salah satu syarat guna memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar pada hari Sabtu tanggal 24 Agustus 2019.

Panitia Ujian : Makassar, 01 Muharram 1441 H
31 Agustus 2019 M

I. Pengawas Umum

a. Rektor Universitas Muhammadiyah Makassar

Prof. Dr. H. Abdul Rahman Rahim, SE., MM.

b. Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Dr. Ir. H. Muh. Arsyad Thaha, M.T

2. Penguji

a. Ketua : Dr. Ir. Zahir Zainuddin, M.Sc

b. Sekretaris : Adriani, S.T.,M.T

3. Anggota : 1. Ir. Abdul Hafid, M.T

2. Suryani, S.T.,M.T

3. Dr. Umar Katu, S.T.,M.T

Mengetahui :

Pembimbing I

Dr. Eng. Ir. H. Zulfajri Basri Hasanuddin, M.Eng

Pembimbing II

Andi Faharuddin, S.T.,M.T

NIP.132169986



Dekan

Ir. Hamzah Al Imran, S.T., M.T.,IPM

NBM : 855 500

KATA PENGANTAR

Bismillahi rahmani rahim.

Puji syukur kehadiran Allah S.W.T., atas berkat Rahmat dan Hidayah-Nya lah sehingga skripsi ini dapat kami susun dan selesaikan dengan sebaik mungkin. Salawat dan salam kepada junjungan kita Nabiullah Muhammad SAW.

Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan yang harus ditempuh dalam rangka penyelesaian program studi pada Jurusan Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar. Adapun judul tugas akhir kami adalah: **“Simulasi Relai Diferensial untuk Proteksi Transformator Berbasis Perangkat Lunak PSCAD/EMTDC”**.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa dalam penulisan skripsi ini masih jauh dari kata sempurna, hal ini disebabkan penulis sebagai manusia biasa tidak lepas dari kesalahan dan kekurangan baik itu ditinjau dari segi teknis penulisan maupun dari perhitungan. Oleh karena itu penulis menerima dengan ikhlas dan senang hati segala koreksi serta perbaikan guna penyempurnaan tulisan ini agar kelak dapat bermanfaat.

Skripsi ini dapat terwujud berkat adanya bantuan, arahan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu dengan segala ketulusan dan kerendahan hati, kami mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada:

1. Bapak Ir. Hamzah Al Imran, S.T., M.T. IPM Selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.

2. Ibu Adriani, S.T., M.T. Selaku Ketua Prodi Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.
3. Bapak Dr. Eng. Ir. H. Zulfajri Basri Hasanuddin, M. Eng. Selaku Pembimbing I dan Bapak Andi Faharuddin, S.T., M.T. selaku Pembimbing II, yang telah banyak meluangkan waktunya dalam membimbing kami.
4. Bapak/Ibu Dosen serta Staf Fakultas Teknik atas segala waktunya telah mendidik dan melayani kami selama mengikuti proses belajar mengajar di Universitas Muhammadiyah Makassar.
5. Ayah dan Ibu tercinta, kami mengucapkan banyak terimakasih yang sebesar-besarnya atas segala limpahan kasih sayang, doa dan pengorbanan terutama dalam bentuk materi dalam menyelesaikan kuliah.
6. Saudara-saudaraku serta rekan-rekan mahasiswa Fakultas Teknik terkhusus Vektor 2014 dan selembaga Fakultas Teknik yang dengan keakraban dan persaudaraan banyak membantu dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Semoga semua pihak tersebut di atas mendapat pahala yang berlipat ganda di sisi Allah S.W.T dan skripsi yang sederhana ini bermanfaat bagi kita semua.
Aamiin.

Makassar, 1 Agustus 2019

Penulis

Mumayyiz Arifin¹. Astra firman²

¹Prodi Teknik Elektro Fakultas Teknik Unismuh Makassar

E_mail :mumayyiz.arifien@gmail.com

²Prodi Teknik Elektro Fakultas Teknik Unismuh Makassar

E_mail : astrarfirman28@gmail.com

ABSTRAK

Abstrak; Mumayyiz Arifin dan Astra Firman (2019), Salah satu peralatan yang berperan penting dalam penyaluran daya listrik yaitu transformator daya. Transformator daya merupakan peralatan listrik yang sangat vital, oleh karena itu transformator harus dipelihara agar dapat beroperasi secara maksimal dan jauh dari gangguan-gangguan yang dapat menyebabkan kegagalan transformator. Transformator dalam sistem tenaga membutuhkan tipe proteksi yang berbeda-beda. Salah satu relai yang akan digunakan untuk memproteksi transformator adalah realai differensial. Penelitian ini menunjukkan performa relai differensial terhadap transformator daya pada gangguan internal dan eksternal. Ada tiga tipe gangguan yang akan disimulasikan di PSCAD/EMTDC yaitu gangguan satu fase ke tanah, dua fase dan tiga fase, dengan resistansi gangguan 2 ohm, 10 ohm dan 20 ohm. Sistem yang dikaji pada penelitian ini memiliki sumber 230 kV, 3 fase, 50 Hz dengan transformator *step up*, 23 kV/230kV, Y-Y, 100 MVA. Simulasi gangguan hubung singkat dan relai pada transformator menggunakan software PSCAD (*Power System Computer Aided Design*). Hasil simulasi menunjukkan bahwa relai differensial mampu mengirimkan signal trip untuk semua gangguan internal dan tetap blok untuk semua gangguan eksternal.

Kata Kunci : Proteksi Transformator, Relai differensial, PSCAD/EMTDC

Mumayyiz Arifin¹. Astra Firman²

¹Electrical Engineering Study Program Faculty of Engineering Unismuh Makassar

E_mail:mumayyiz.arifien@gmail.com

²Electrical Engineering Study Program Faculty of Engineering Unismuh Makassar

E_mail: astraфирman@gmail.com

ABSTRACT

Abstract; Mumayyiz Arifin and Astra Firman (2019), One of the equipment that plays an important role in the distribution of electrical power is the power transformer. Power transformer is a vital electrical equipment, therefore the transformer must be maintained so that it can operate optimally and away from disturbances that can cause the failure of the transformer. Transformers in power systems require different types of protection. One relay that will be used to protect the transformer is a differential relay. This study shows the differential relay performance of power transformers in internal and external interference. There are three types of noise that will be simulated in PSCAD / EMTDC, namely one-phase, two-phase and three-phase disturbances, with 2 ohms, 10 ohms and 20 ohms interference resistance. The system studied in this study has a source of 230 kV, 3 phases, 50 Hz with a step up transformer, 23 kV / 230kV, Y-Y, 100 MVA. Simulation of short circuit and relay interference on the transformer using PSCAD (Power System Computer Aided Design) software. Simulation results show that differential relays are able to send trip signals for all internal disturbances and remain block for all external interference.

Keywords: Transformer Protection, Differential Relay, PSCAD / EMTDC

DAFTAR ISI

Halaman Sampul	
Halaman Judul	i
Halaman Persetujuan	ii
Halaman Pengesahan	iii
Kata Pengantar	iv
Abstrak	vi
Daftar Isi	vii
Daftar Gambar	x
Daftar Tabel	xii
Daftar Lampiran	xiii
Daftar Notasi	xiv
Bab I Pendahuluan	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	2
C. Tujuan Penelitian	3
D. Batasan Masalah.....	3
E. Manfaat Penelitian	3
F. Metode Penulisan	4
Bab II Tinjauan Pustaka	5
A. Transformator.....	5
B. Gangguan Pada Transformator	13
C. Sistem Proteksi.....	20
D. Relai Proteksi Transformator	26
E. Relai Differensial	28
F. Perangkat Lunak <i>PSCAD/EMTDC</i>	37

Bab III Metodologi Penelitian.....	41
A. Waktu dan Tempat Penelitian	41
B. Alat dan Bahan	41
C. Skema Penelitian	43
D. Data Penelitian	44
E. Langkah Penelitian.....	44
Bab IV Pembahasan.....	45
A. Pemodelan sistem daya dan rangkaian sistem relai differensial menggunakan software <i>PSCAD</i>	45
B. Hasil Simulasi	47
Bab V Penutup	74
A. Kesimpulan	74
B. Saran.....	74
Daftar Pustaka.....	75



Daftar Gambar

Gambar	Judul	Halaman
2.1	Prinsip Kerja Pransformator	7
2.2	Inti Besi Transformator	7
2.3	Kumparan Trafo	8
2.4	Bushing	9
2.5	Transformator 3 phasa hubungan Y-Y	10
2.6	Transformator 3 phasa hubungan Y- Δ	11
2.7	Transformator 3 phasa hubungan Δ -Y	12
2.8	Transformator 3 phasa hubungan Δ - Δ	12
2.9	Gangguan hubung singkat dua fasa	16
2.10	Gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah	16
2.11	Gangguan hubung singkat tiga fasa	17
2.12	Hubung singkat tiga fasa ke tanah	17
2.13	Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah	18
2.14	komponen simetris dari tiga fase tak seimbang	19
2.15	Suatu Sistem Tenaga Listrik yang Sederhana Mengalami Gangguan Pada Titik K	24
2.16	Prinsip Kerja Relai Differensial	30
2.17	Relai differensial saat arus normal	31
2.18	Relai Differensial Keadaan Gangguan Internal	32
2.19	Relai Diferensial Keadaan Gangguan Internal	33
2.20	Karakteristik Relai Differensial	35
3.1	Diagram Balok Skema Penelitian	42
3.2	Bagan alir proses penelitian	44
4.1	Gambar model sistem daya	45
4.2	Model Sistem Relai Differensial	46
4.3	Zona Proteksi Relai Differensial	46
4.4	Model jaringan kondisi normal	47

4.5	Gelombang Arus Pada Gangguan Internal A-G dengan $R_f = 2$ ohm (a) Arus Primer (b) Arus Sekunder (c) Arus CT1 (d) arus CT2 (e) Arus Differensial (f) <i>Pick Up</i> Respon Relai	49
4.6	Model Jaringan Kondisi Gangguan Internal	50
4.7	Gelombang Arus Pada Gangguan Internal A-G dengan $R_f = 2$ ohm (a) Arus Primer (b) Arus Sekunder (c) Arus CT1 (d) arus CT2 (e) Arus Gangguan (f) Arus Differensial (g) <i>Pick Up</i> Respon Relai	53
4.8	Gelombang Arus Pada Gangguan Internal AB dengan $R_f = 2$ ohm (a) Arus Primer (b) Arus Sekunder (c) Arus Gangguan (d) arus CT1 (e) Arus CT2 (f) Arus Differensial (g) <i>Pick Up</i> Respon Relai	57
4.9	Gelombang Arus Pada Gangguan Internal ABC dengan $R_f = 2$ ohm (a) Arus Primer (b) Arus Sekunder (c) Arus Gangguan (d) arus CT1 (e) Arus CT2 (f) Arus Differensial (g) <i>Pick Up</i> Respon Relai	61
4.10	Model Jaringan Kondisi Gangguan Eksternal	63
4.11	Gelombang Arus Pada Gangguan Internal A-G dengan $R_f = 2$ ohm (a) Arus Primer (b) Arus Sekunder (c) Arus Gangguan (d) arus CT1 (e) Arus CT2 (f) Arus Differensial (g) <i>Pick Up</i> Respon Relai	66
4.12	Gelombang Arus Pada Gangguan Internal AB dengan $R_f = 20$ ohm (a) Arus Primer (b) Arus Sekunder (c) Arus Gangguan (d) arus CT1 (e) Arus CT2 (f) Arus Differensial (g) <i>Pick Up</i> Respon Relai	70
4.13	Gelombang Arus Pada Gangguan Internal ABC dengan $R_f = 20$ ohm (a) Arus Primer (b) Arus Sekunder (c) Arus Gangguan (d) arus CT1 (e) Arus CT2 (f) Arus Differensial (g) <i>Pick Up</i> Respon Relai	74

DAFTAR TABEL

Tabel	Judul	Halaman
4.1	Hasil simulasi dan perfoma relai terhadap gangguan internal satu-fasa ke tanah (A-G)	54
4.2	Hasil simulasi dan perfoma relai terhadap gangguan internal Dua-Fasa (AB)	58
4.3	Hasil simulasi dan perfoma relai terhadap gangguan internal Tiga Fase(ABC)	62
4.4	Hasil simulasi dan perfoma relai terhadap gangguan eksternal satu-fasa ke tanah (A-G)	67
4.5	Hasil simulasi dan perfoma relai terhadap gangguan eksternal dua fase (AB)	71
4.6	Hasil simulasi dan perfoma relai terhadap gangguan eksternal tiga fase (ABC)	75



DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A	Bentuk dan kegunaan komponen yang digunakan	79
LAMPIRAN B	Grafik keluaran simulasi untuk gangguan internal dan eksternal	88



DAFTAR NOTASI

A	Ampere
CT	<i>Current Transformer</i>
CB	<i>Circuit Breaker</i>
Hz	Frekuensi
I_d	Arus Diferensial
I_p	Arus Primer
I_s	Arus Sekunder
kA	Kilo Ampere
PSCAD	<i>Power Sistem Computer Aided Design</i>
R_f	<i>Resistance Fault</i>



BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Suatu sistem tenaga listrik terdiri dari tiga komponen utama yaitu stadium-stadium pembangkit, saluran-saluran transmisi dan sistem-sistem distribusi. Saluran transmisi merupakan mata rantai penghubung antara stadium pembangkit dan sistem distribusi dan menghubungkan dengan sistem daya lain melalui interkoneksi. Oleh karena itu saluran transmisi merupakan komponen yang paling vital pada sistem tenaga (Stevenson, 1990).

Sistem transmisi merupakan proses penyaluran energi listrik dari pusat pembangkit yang memiliki level tegangan tertentu yang kemudian dinaikkan tegangannya ke level yang lebih tinggi sebelum masuk ke gardu induk. Pada umumnya, gardu induk memiliki beberapa perlengkapan berupa transformator daya, pemisah, pemutus, busbar dan isolator, instrumen pengukuran, rele dan pengamanan, sistem pentanahan.

Salah satu peralatan yang berperan penting dalam penyaluran daya listrik yaitu transformator daya. Transformator daya merupakan peralatan listrik yang sangat vital, oleh karena itu transformator harus dipelihara agar dapat beroperasi secara maksimal dan jauh dari gangguan-gangguan yang dapat menyebabkan kegagalan transformator.

Dari adanya gangguan tersebut, maka transformator membutuhkan suatu proteksi yang dapat memproteksi transformator apabila terjadi gangguan, sehingga transformator dapat terhindar dari kerusakan. Transformator dalam sistem tenaga membutuhkan tipe proteksi yang berbeda-beda. Proteksi ini disediakan oleh berbagai jenis relai, baik elektromagnetik maupun statik. Relai yang akan digunakan untuk memproteksi transformator adalah relai differensial. Relai ini bekerja apabila terdapat perbedaan arus pada *Current Transformer* (CT) sisi primer dan sekunder (Syukriyadin dkk, 2011). Apabila gangguan yang terjadi di luar zona proteksi, relai tidak akan bekerja. Relai tidak dapat menghilangkan kemungkinan adanya gangguan, tetapi akan bekerja setelah terjadi gangguan. Maka dari itu untuk melihat performansi dari relai differensial untuk transformator dilakukan simulasi menggunakan software PSCAD (*Power System Computer Aided Design*)/EMTDC (*Electro Magnetic Transient DC*)

B. Rumusan Masalah

Dari penjelasan di atas maka dapat dirumuskan beberapa permasalahan sebagai berikut :

1. Bagaimana model sistem daya yang terdiri atas transformator daya, gangguan, dan relai differensial ?
2. Bagaimana performansi dari relai differensial terhadap gangguan yang terjadi ?

C. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini, yaitu :

1. Untuk menghasilkan model sistem daya yang terdiri atas transformator daya, gangguan dan relai diferensial.
2. Untuk mendapatkan performansi dari relai diferensial terhadap gangguan yang terjadi.

D. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Transformator yang akan disimulasikan adalah transformator daya 100 MVA.
2. Relai yang ditinjau hanya relai yang berada di fase A.
3. Resistansi gangguan hanya bersifat resistif.
4. Gangguan yang dibahas hanya tiga tipe gangguan yaitu satu-fasa ke tanah (Ag), dua-fasa (AB) dan tiga-fasa (ABC), dengan masing-masing tiga resistansi gangguan yaitu 2, 10, dan 20 Ohm.
5. Gangguan internal yang ditinjau berlokasi di terminal transformator.

E. Manfaat Penelitian

1. Penelitian ini dapat menjadi bahan informasi dalam pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang Teknik Elektro.
2. Dengan penelitian ini penulis dan pembaca dapat menambah wawasan mengenai transformator, relai diferensial, dan penggunaan software PSCAD/EMTDC yang penulis gunakan dalam penelitian.

F. Sistemasi Penulisan

Bab Pertama, Bab ini menjelaskan tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, serta tujuan dan manfaat dari penelitian yang dilakukan serta sistematika penulisan dari laporan hasil penelitian.

Bab Kedua, bab ini menjelaskan tentang teori-teori pendukung yang berkaitan dengan judul penelitian.

Bab Ketiga, Bab ini menjelaskan tentang waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan yang digunakan, diagram balok dan gambar rangkaian penelitian, serta metode penelitian yang berisi langkah-langkah dalam proses melakukan penelitian.

Bab Keempat, Bab ini menjelaskan tentang hasil dari penelitian, alat dan perhitungan serta pembahasan terkait judul penelitian.

Bab Kelima, Bab ini merupakan penutup yang berisi tentang kesimpulan dan saran terkait judul penelitian.

Daftar Pustaka, 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. Transformator

Transformator adalah suatu alat listrik yang digunakan untuk memindahkan daya dari satu atau lebih rangkain listrik ke rangkaian yang lain tanpa mengubah frekuensi, yang diubah adalah tegangan (Hariz Firdaus dan Azriyenni Azhari Zakri, 2018).

Dilihat dari bentuknya yang paling sederhana transformator terdiri atas kumparan dan satu induktansi mutual. Kumparan primer adalah yang menerima daya, dan kumparan sekunder tersambung ke beban. Kedua kumparan dibelit pada suatu inti yang terdiri atas material berlaminasi magnet.

Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika.

Dalam tenaga listrik pemakain transformator dikelompokkan menjadi :

1. Transformator daya
2. Transformator distribusi
3. Transformator pengukuran : yang terdiri dari transformator arus dan transformator tegangan.

Keadaan transformator yang berdasarkan induksi elektromagnetik menghendaki adanya gandengan magnet antara rangkaian primer dan sekunder. Gandengan ini berupa tipe inti dan tipe cangkang.

1. Transformator daya

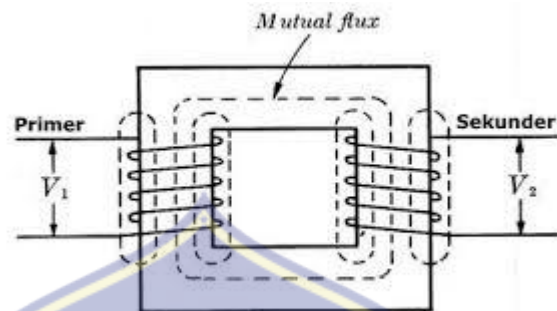
Transformator daya merupakan peralatan listrik yang tidak mempunyai bagian yang bergerak, berfungsi untuk mengubah daya dari tegangan tinggi ke tegangan rendah ataupun sebaliknya. Untuk menggunakan transformator, energi listrik dapat ditransfer dari satu rangkaian ke rangkaian yang lain tanpa melalui hubungan fisik antara dua rangkaian. Transfer daya tersebut dilakukan sepenuhnya oleh rangkaian medan magnet.

Landasan fisik transformator adalah induktansi mutual (timbal balik) antara kedua rangkaian yang dibutuhkan oleh suatu fluks magnetik bersama yang melewati suatu jalur dengan reluktansi rendah. Kedua kumparan memiliki induktansi manual yang tinggi. Jika suatu kumparan disambungkan pada suatu sumber tegangan bolak-balik, suatu fluks bolak-balik terjadi dalam inti berlaminasi, yang sebagian besar akan mengait pada kumparan lainnya, dan di dalamnya akan terinduksi suatu gaya gerak listrik (Abdul Kadir, 1989).

2. Prinsip-prinsip dasar transformator

Transformator menggunakan prinsip hukum induksi Faraday dan hukum Lorentz dalam menyalurkan daya, dimana arus bolak-balik yang mengalir mengelilingi suatu inti besi maka inti besi itu akan berubah menjadi magnet. Dan apabila magnet tersebut dikelilingi oleh suatu belitan maka pada kedua ujung belitan tersebut akan terjadi beda potensial. Arus yang mengalir pada belitan primer akan menginduksi inti besi transformator sehingga di dalam inti besi akan

mengalir fluks magnet dan fluks magnet ini akan menginduksi belitan sekunder sehingga pada ujung belitan sekunder akan terdapat beda potensial.



Gambar 2.1 Prinsip Kerja Pransformator

3. Komponen utama transformator

Komponen utama dari transformator adalah :

a. Inti besi

Berupa lempengan-lempengan besi tipis berisolasi, untuk mengurangi panas (rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh arus eddy, inti ini berfungsi media aliran fluksi, yang ditimbulkan arus listrik melalui kumparan.



Gambar 2.2 Inti Besi Transformator

b. Kumparan Trafo

Berupa gulungan diisolasi pada inti besi maupun terhadap lilitan lain. Pada trafo terdapat kumparan primer dan sekunder. Bila kumparan primer dihubungkan dengan tegangan bolak balik maka timbul fluksi. Fluksi ini akan menginduksi tegangan pada kumparan sekundernya, bila rangkaian sekunder dihubungkan dengan rangkaian beban maka akan timbul arus pada kumparan inti.



Gambar 2.3 Kumparan Trafo

c. Minyak Trafo

Pada trafo daya berkapasitas besar, kumparan dan intinya direndam dalam minyak karena minyak mempunyai sifat sebagai media pemindah panas (sirkulasi) dan bersifat pula sebagai isolasi sehingga minyak trafo tersebut berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi.

d. Bushing

Kumparan trafo ke jaringan luar daihubungkan melalui bushing berupa konduktor yang diselubungi oleh isolator dan berfungsi sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan tangki trafo.



Gambar 2.4 Bushing

e. Tangki dan Konservator

4. Jenis-jenis Hubungan Transformator Tiga Fasa

Dalam pelaksanaannya, tiga buah lilitan fasa pada sisi primer dan sisi sekunder dapat dihubungkan dalam bermacam-macam hubungan, seperti bintang dan segitiga, dengan kombinasi Y-Y, Y- Δ , Δ -Y, dan Δ - Δ , bahkan untuk kasus tertentu lilitan sekunder dapat dihubungkan secara berliku-liku (zig-zag), sehingga diperoleh kombinasi Δ -Z dan Y-Z. Hubungan zig-zag merupakan sambungan bintang istimewa, hubungan ini digunakan untuk mengantisipasi kejadian yang mungkin terjadi apabila dibungkan secara bintang dengan beban phasanya tidak seimbang. Dibawah ini pembahasan hubungan transformator 3 fasa secara umum :

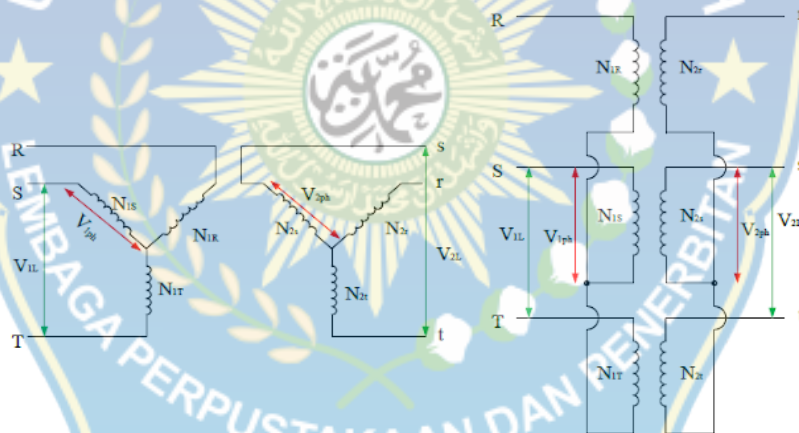
a. Hubungan Wye-wye (Y-Y)

Pada hubungan bintang-bintang, rasio tegangan fasa-fasa (L-L) pada primer dan sekunder adalah sama dengan rasio setiap trafo. Sehingga, terjadi

pergeseran fasa sebesar 30° antara tegangan fasa-netral (L-N) dan tegangan fasa-fasa (L-L) pada sisi primer dan sekundernya.

Hubungan bintang-bintang ini akan sangat baik hanya jika pada kondisi beban seimbang. Karena, pada kondisi beban seimbang menyebabkan arus netral (I_N) akan sama dengan nol. Dan apabila terjadi kondisi tidak seimbang maka akan ada arus netral yang kemudian dapat menyebabkan timbulnya rugi-rugi. Hubungan Y-Y pada transformator tiga fasa dapat dilihat pada gambar 2.

Tegangan phasa primer sebanding dengan tegangan phasa sekunder dan perbandingan belitan transformator, maka perbandingan antara tegangan primer dengan tegangan sekunder pada transformator hubungan Y-Y adalah :

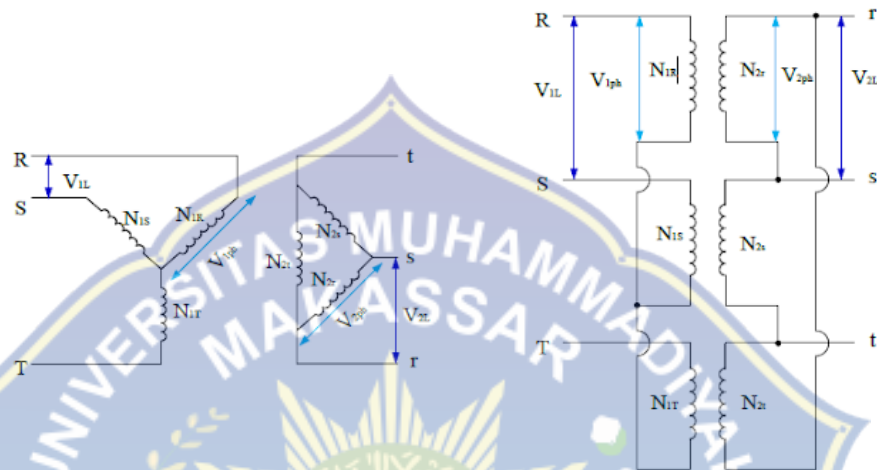


Gambar 2.5 Transformator tiga-fase hubungan Y-Y

b. Hubungan wye-delta (Y- Δ)

Transformator hubungan Y- Δ , digunakan pada saluran transmisi sebagai penaik tegangan. Rasio antara sekunder dan primer tegangan fasa-fasa $1/\sqrt{3}$ kali rasio setiap trafo. Terjadi sudut 30° antara tegangan fasa-fasa antara primer dan sekunder yang berarti bahwa trafo Y- Δ tidak bisa diparalelkan dengan trafo Y-Y

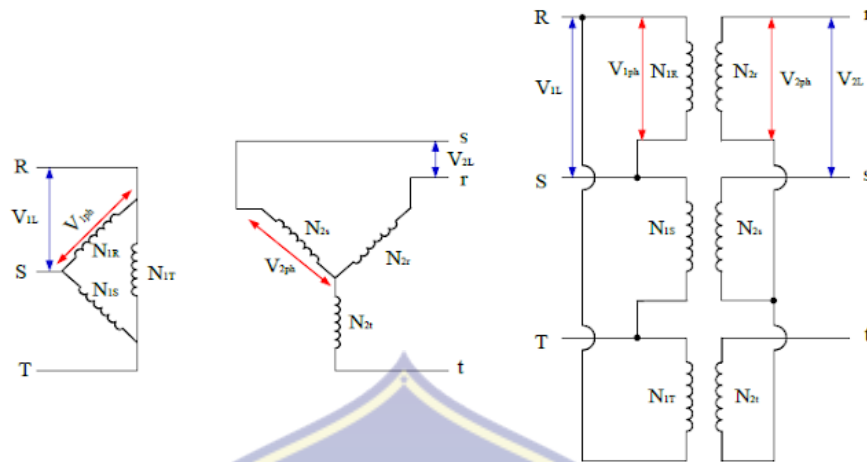
atau trafo Δ - Δ . Hubungan transformator Y- Δ dapat dilihat pada gambar 2.7. Pada hubungan ini tegangan kawat ke kawat primer sebanding dengan tegangan fase primer, dan tegangan kawat ke kawat sekunder sama dengan tegangan fase, sehingga diperoleh perbandingan tegangan pada hubungan Y- Δ adalah :



Gambar 2.6 Transformator tiga-fase hubungan Y- Δ

c. Hubungan Delta-wye (Δ -Y)

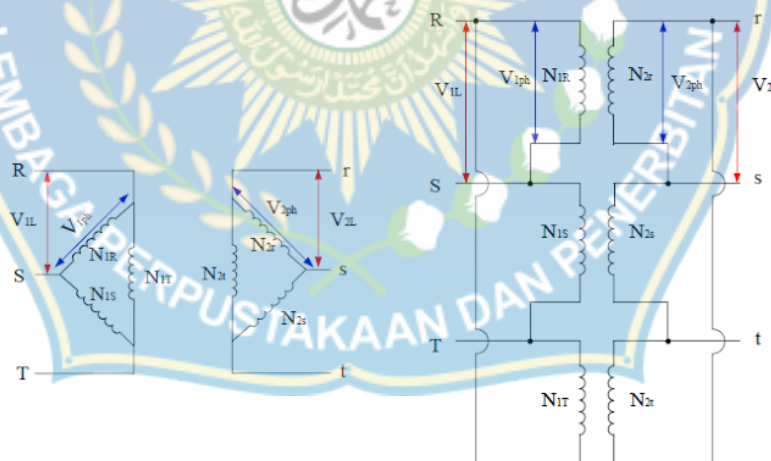
Transformator hubungan Δ -Y, digunakan untuk menurunkan tegangan dari tegangan transmisi ke tegangan rendah. Transformator hubungan Δ -Y dapat dilihat pada Gambar 2.7. Pada hubungan Δ -Y, tegangan kawat ke kawat primer sama dengan tegangan fase primer, dan tegangan sisi sekundernya, maka perbandingan tegangan pada hubungan Δ -Y adalah :



Gambar 2.7 Transformator tiga-fase hubungan Δ -Y

d. Hubungan Delta-delta (Δ - Δ)

Pada transformator hubungan Δ - Δ , tegangan kawat ke kawat dan tegangan fasa sama untuk sisi sekunder transformator ($V_{RS}=V_{ST}=V_{TR}=V_{LN}$), maka perbandingannya adalah :



Gambar 2.8 Transformator tiga-fase hubungan Δ - Δ

B. Gangguan Pada Transformator

1. Gangguan

Gangguan adalah suatu ketidaknormalan (interferes) dalam sistem tenaga listrik yang mengakibatkan mengalirnya arus yang tidak seimbang dalam sistem tiga fasa. Gangguan disebabkan adanya kesalahan dalam suatu rangkain yang menyebabkan terganggunya aliran arus normal (Stevenson, 1990)

Gangguan hubung singkat dapat dikategorikan menjadi beberapa kelompok, yaitu :

a. Berdasarkan kesimetrisannya

1) Gangguan simetris, merupakan gangguan yang mengakibatkan tegangan dan arus yang mengalir pada setiap fasanya menjadi tidak seimbang, gangguan ini terdiri dari :

- a) Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah, yakni gangguan yang disebabkan karena salah satu fasa terhubung singkat ke tanah atau *ground*.
- b) Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa, yakni gangguan yang disebabkan karena fasa dan fasa antar kedua fasa terhubung singkat dan tidak terhubung ke tanah.

c) Gangguan Hubung Singkat Dua fasa ke Tanah.

2) Gangguan Simetris, merupakan gangguan yang terjadi pada semua fasanya sehingga arus maupun tegangan setiap fasanya tetap seimbang setelah gangguan terjadi. Gangguan ini terdiri dari :

- a) Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa, yang gangguan yang terjadi ketika ketiga fasa saling terhubung singkat.
- b) Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah, yakni gangguan yang terjadi ketika ketiga fasa terhubung singkat ke tanah.

Semua gangguan hubung singkat diatas, arus gangguannya dihitung dengan menggunakan rumus dasar yaitu :

$$I = \frac{V}{Z}(1)$$

Dimana :

I = Arus (A)

V = Tegangan Sumber (V)

Z = Impedansi jaringan, nilai ekivalen dari seluruh impedansi di dalam jaringan dari sumber tegangan sampai gangguan (Ohm)

Yang membedakan antara gangguan hubung singkat tiga fasa, dua fasa dan satu fasa ke tanah adalah impedansi yang terbentuk sesuai dengan macam gangguan itu sendiri, dan tegangan yang memasok arus ke titik gangguan.

Impedansi yang terbentuk dapat ditunjukkan seperti berikut ini :

$$Z \text{ untuk gangguan tiga fasa, } Z = Z_1$$

$$Z \text{ untuk gangguan dua fasa, } Z = Z_1 + Z_2$$

$$Z \text{ untuk satu fasa, } Z = Z_1 + Z_2 + Z_0$$

Dimana :

Z_1 = Impedansi urutan positif (Ohm)

Z_2 = Impedansi urutan negatif (Ohm)

Z_3 = Impedansi urutan nol (Ohm)

b. Berdasarkan lama terjadinya gangguannya

- 1) Gangguan Transient (temporer), merupakan gangguan yang hilang dengan sendirinya apabila pemutus tenaga terbuka dari saluran transmisi untuk waktu yang singkat dan setelah itu dihubungkan kembali.
- 2) Gangguan permanen, merupakan gangguan yang tidak hilang atau tetap ada apabila pemutus tenaga terbuka pada saluran transmisi untuk waktu yang singkat dan setelah itu dihubungkan kembali.

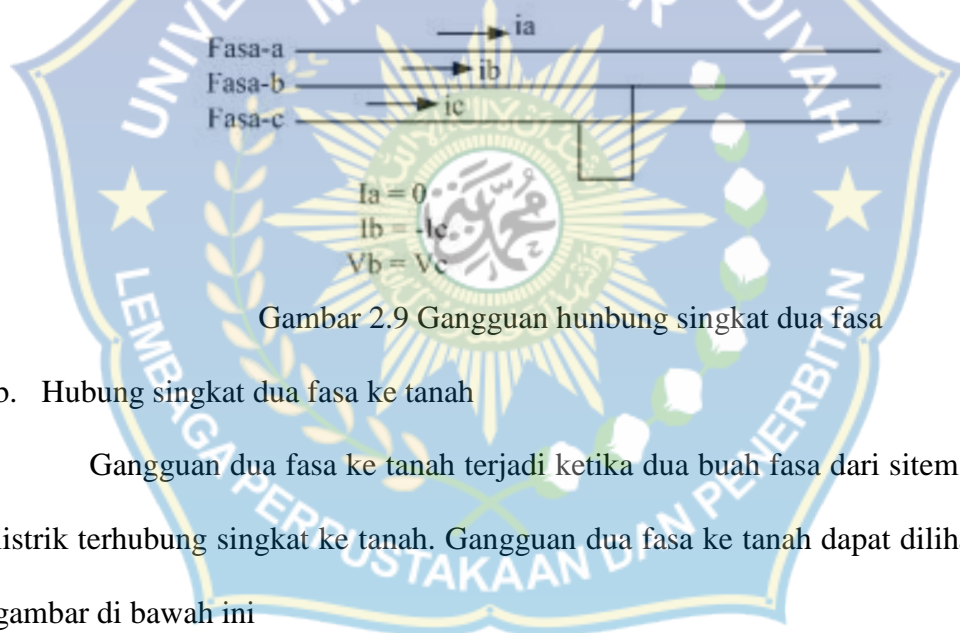
2. Studi Gangguan Hubung Singkat

Studi hubung singkat dilakukan untuk menentukan besarnya arus yang mengalir melalui sistem tenaga listrik pada berbagai jarak setelah gangguan berubah menurut waktu sampai mencapai kondisi tetap. Selama kondisi gangguan, sistem proteksi diperlukan untuk mendeteksi, menghilangkan dan mengisolasi gangguan tersebut. Hal ini dapat dilakukan pada bermacam-macam gangguan (tiga fasa simetris, fasa ke fasa, dan fasa ke tanah, satu fasa ke tanah, dan tiga fasa ke tanah). Arus hubung singkat yang begitu besar sangat membahayakan peralatan, sehingga untuk mengamankan peralatan dari kerusakan akibat hubung singkat maka hubungan kelistrikan pada bagian yang terganggu

perlu di putuskan dengan peralatan pemutus tenaga atau *Circuit Breaker* (CB). Selain itu, perhitungan hubunb singkat juga sangat penting dalam menentukan kemampuan pemutus teanga untuk koordinasi pemasangan relai proteksi.

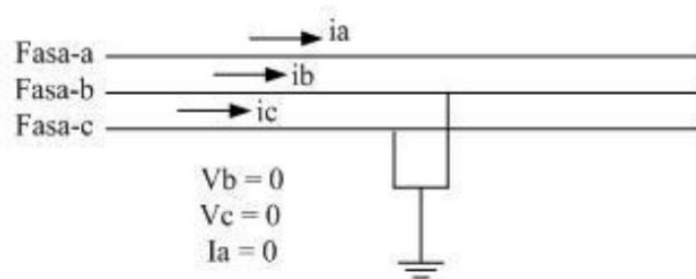
a. Hubung singkat dua fasa

Hubung singkat dua fasa atau yang biasa disebut hubung singkat fasa ke fasa adalah kondisi dimana antara fasa ke fasa saling terhubung singkat. Pada gangguan hubung singkat fasa ke fasa, arus saluran tidak mengandung komponen urutan nol dikarenakan tidak ada gangguan yang terhubung ke tanah. Gangguan bhungung singkat dua fasa ini dapat ditunjukkan pada gambar di bawah ini :



b. Hubung singkat dua fasa ke tanah

Gangguan dua fasa ke tanah terjadi ketika dua buah fasa dari sitem teanga listrik terhubung singkat ke tanah. Gangguan dua fasa ke tanah dapat dilihat pada gambar di bawah ini



c. Hubung singkat tiga fasa

Hubung singkat tiga fasa termasuk dalam klasifikasi gangguan simetris, dimana arus maupun tegangan setiap fasanya tetap seimbang setelah gangguan terjadi. Sehingga pada sistem seperti ini dapat dianalisa dengan menggunakan urutan positif saja. Gangguan hubung singkat tiga fasa dapat dilihat seperti gambar di bawah ini :



Gambar 2.11 Gangguan hubung singkat tiga fasa

d. Hubung singkat tiga fasa ke tanah

Gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah terjadi ketika ketiga fasa dari sistem tenaga listrik terhubung singkat ke tanah. Gangguan tiga fasa ke tanah dapat dilihat pada gambar di bawah ini :

Gambar 2.12 Hubung singkat tiga fasa ke tanah

e. Hubung singkat satu fasa ke tanah

Gangguan yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik merupakan gangguan asimetris sehingga memerlukan metode komponen simetris untuk menganalisa tegangan dan arus pada saat terjadi gangguan. Gangguan yang terjadi dapat dianalisa dengan menghuung singkatkan semua sumber tegangan yang ada pada sistem dan mengganti titik (node) gangguan dengan sebuah sumber tegangan

yang besarnya sama dengan tegangan sesaat sebelum terjadinya gangguan di titik gangguan tersebut. Dengan menggunakan metode ini sistem tiga fasa tidak eimbang dapat dipresentasikan dengan menggunakan teori komponen simetris yaitu berdasarkan komponen urutan positif, komponen urutan negatif, komponen urutan nol. Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah dapat dilihat pada gambar di bawah ini

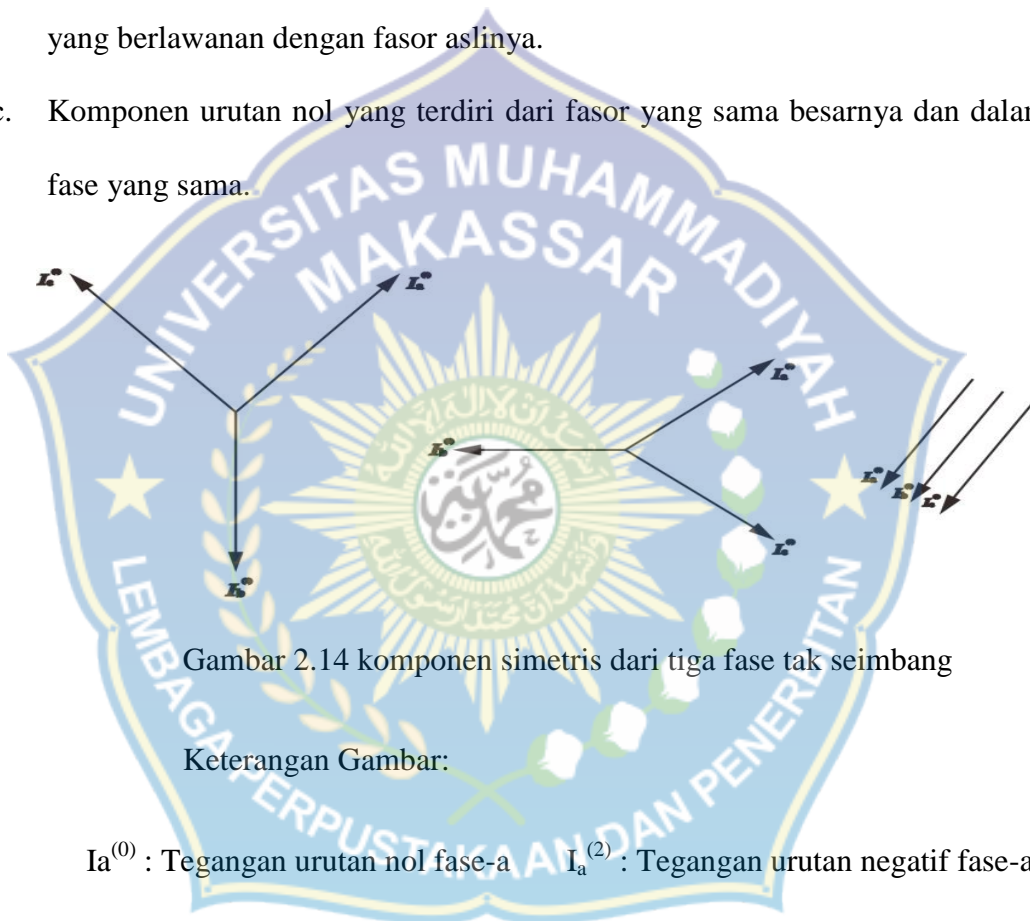


Gambar 2.13 Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah

3. Komponen Simetris

Menurut Stevenson, (1990), salah satu metode yang sering digunakan untuk menyelesaikan rangkaian tiga-fasa yang tak-seimbang adalah metode komponen simetris yang diperkenalkan oleh C. L. Fortesque. Cara *Fortesque* membuktikan bahwa suatu sistem tiga-fasa yang tak-seimbang dapat diselesaikan dalam tiga sistem fase seimbang yang disebut komponen simetris dari fase aslinya. Masing-masing himpunan komponen mempunyai panjang yang sama dan besar sudut yang sama antara fase yang berdekatan. Himpunan seimbang dari komponen-komponen tersebut adalah:

- Komponen urutan positif yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan terpisah sejauh 120° satu dengan yang lainnya, dan mempunyai urutan fase yang sama dengan fasor aslinya.
- Komponen urutan negative terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan terpisah sejauh 120° satu dengan yang lainnya, dan mempunyai urutan fase yang berlawanan dengan fasor aslinya.
- Komponen urutan nol yang terdiri dari fasor yang sama besarnya dan dalam fase yang sama.



Gambar 2.14 komponen simetris dari tiga fase tak seimbang

Keterangan Gambar:

$I_a^{(0)}$: Tegangan urutan nol fase-a $I_a^{(2)}$: Tegangan urutan negatif fase-a

$I_b^{(0)}$: Tegangan urutan nol fase-b $I_b^{(2)}$: Tegangan urutan negatif fase-b

$I_c^{(0)}$: Tegangan urutan nol fase-c $I_c^{(2)}$: Tegangan urutan negatif fase-c

$I_a^{(1)}$: Tegangan urutan positif fase-a $I_b^{(1)}$: Tegangan urutan positif fase-b

$I_c^{(1)}$: Tegangan urutan positif fase-c

4. Akibat yang Ditimbulkan oleh Gangguan Hubung Singkat

Besar dari arus hubung singkat itu tergantung dari sistem, metode hubung netral dari trafo, jarak gangguan dari unit pembangkit, angka pengenal dari alat-alat pengaman.

Akibat-akibat yang dapat ditimbulkan oleh gangguan hubung singkat antara lain:

- a. Pengurangan stabilitas sistem tenaga.
- b. Merusak peralatan karna arus yang besar atau tegangan-tegangan rendah yang ditimbulkan gangguan hubung singkat.
- c. Mengganggu kontinuitas pelayanan daya kepada konsumen apabila gangguan itu sampai menyebabkan terputusnya suatu rangkaian (sirkuit) atau menyebabkan keluarnya suatu unit pembangkit.
- d. Ledakan-ledakan yang mungkin terjadi pada peralatan yang mengandung minyak isolasi sehingga menimbulkan kebakaran dan membahayakan orang di sekitarnya.

Pengaruh mana yang akan lebih menonjol dalam suatu kasus tertentu tergantung pada sifat kondisi gangguan dan kondisi kerja sistem daya tersebut.

C. Sistem Proteksi

Untuk meminimalisir kerusakan pada sistem tenaga listrik maka bagian terjadi gangguan secepat mungkin dipisahkan. Sistem proteksi merupakan suatu peralatan yang dirancang untuk dapat merasakan atau mengukur adanya gangguan atau mulai melaraskan adanya ketidak normalan pada peralatan atau bagian

sistem tenaga listrik (sensor) dan segera secara otomatis relai proteksi memberi perintah untuk membuka dan memutus tegangan (CB) untuk memisahkan peralatan atau bagaian dari sistem terganggu. Sistem proteksi tidak mencegah munculnya gangguan, namun hanya dapat melakukan tindakan setelah terjadinya gangguan.

Sistem proteksi suatu tenaga listrik yang membentuk suatu pola pengaman tidaklah hanya relay pengaman saja tetapi juga Current Transformator (CT) dan voltage Transformator (VT) yang merupakan perangkat instrumen pada relai pengama, sumber daya DC merupakan sumber untuk mengoperasikan relai pengaman dan pemutus tenaga PMT akan menerima perintag akhir dari relai pengaman.

Jadi sistem preoteksi/pengaman tenaga listrik adalah satu kesatuan antara CT, VT, relai, sumber DC, dan PMT. Adanya kesalahan dari salah satu komponen tersebut akan berakibat sistem tersebut tidak jalan.

Relai proteksi merupakan salah satu peralatan proteksi yang berfungsi untuk merasakan atau melihat adanya gangguan pada peralatan yang diamankan dengan mengukur atau membandingkan besaran-besaran yang diterima, misalnya arus, tegangan, daya, sudut fase, frekuensi, impedansi, dan sebagainya dengan besaran yang sudah ditentukan, kemudian mengambil keputusan seketikan atau dengan perlambatan waktu untuk membuka CB ataupun hanya memberi tanda tanpa membuka pemutus tenaga. CB umumnya dipasang untuk generator, transformator daya, saluran transmisi, saluran distribusi, dan sebagainya agar masing-masing bagian sistem dapat dipisahkan sedemikian rupa sehingga sistem lainnya tetap dapat beroperasi secara normal (ram dan Vishwakarma, 1995).

Relai proteksi dapat merasakan adanya gangguan pada peralatan yang diamankan dengan mengukur atau membandingkan besaran-besaran yang diterimanya, misalnya arus, tegangan, daya, sudut fasa, frekuensi, impedansi dan sebagainya, dengan besaran yang telah ditentukan, kemudian mengambil keputusan untuk seketika ataupun perlambatan waktu membuka pemutus tenaga (Syukriyadin dkk, 2011).

1. Fungsi Sistem Proteksi

Sistem proteksi harus mampu mendeteksi perubahan parameter sistem, mengevaluasi besar perubahan parameter dan membandingkannya dengan besaran dasar yang telah ditentukan sebelumnya, serta memberikan perintah kepada peralatan untuk melakukan proses pemutusan guna memisahkan bagian tertentu dari sistem.

Fungsi utama sistem proteksi adalah mencegah bahaya gangguan terhadap manusia, membatasi segala kerusakan pada peralatan, dengan memutuskan peralatan yang terganggu dari pelayanan atau saat mulai beroperasi pada kondisi yang tidak normal. Jadi, sistem proteksi harus memisahkan bagian yang terganggu dari bagian sistem yang lain, dengan tingkat keandalan yang tinggi dan waktu pemutusan serta jumlah pemutusan sekecil mungkin. Karena itu pemutusan bagian yang terganggu, pembatasan kerusakan lebih lanjut, dan pencegahan menjalarnya gangguan dalam sistem merupakan fungsi relai proteksi berkaitan dengan peralatan pemutus tenaga (Mason, 1979).

Fungsi sekunder sistem proteksi adalah memberikan indikasi tentang lokasi gangguan dan jenis gangguan. Data ini tidak hanya membantu dalam mempercepat perbaikan tetapi juga dapat dimanfaatkan untuk dibandingkan dengan hasil pengamatan operator dan hasil pencatatan alat pendeteksi gangguan (fault detector). Hasilnya dapat digunakan untuk analisis efektivitas pencegahan gangguan.

2. Syarat-syarat Relai Pengaman

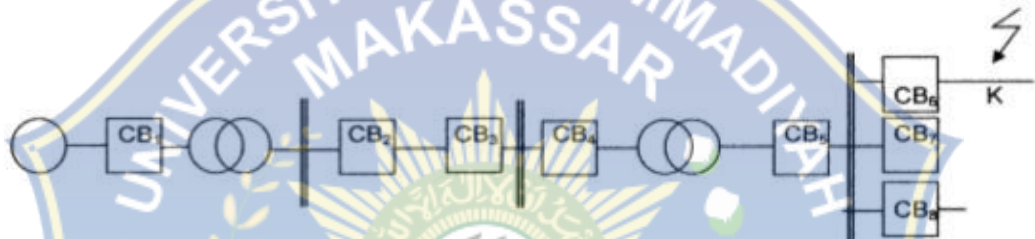
Menurut Taqiyyudin, (2006), Syarat-syarat agar peralatan relai pengaman dapat dikatakan bekerja dengan baik dan benar apabila :

a. Cepat bereaksi

Relay harus cepat bereaksi / bekerja bila sistem mengalami gangguan atau kerja abnormal. Kecepatan bereaksi dari relay adalah saat relay mulai merasakan adanya gangguan sampai dengan pelaksanaan pelepasan circuit breaker (C.B) karena komando dari relay tersebut. Waktu bereaksi ini harus diusahakan secepat mungkin sehingga dapat menghindari kerusakan pada alat serta membatasi daerah yang mengalami gangguan / kerja abnormal. Mengingat suatu sistem tenaga mempunyai batas-batas stabilitas serta kadang-kadang gangguan sistem bersifat sementara, maka relay yang semestinya bereaksi dengan cepat kerjanya perlu diperlambat (time delay). Pada umumnya untuk top sekitar 0,1 detik kerja peralatan proteksi sudah dianggap bekerja cukup baik..

b. Selektif

Yang dimaksud dengan selektif disini adalah kecermatan pemilihan dalam mengadakan pengamanan, dimana hal ini menyangkut koordinasi pengamanan dari sistem secara keseluruhan. Untuk rnenapatkan keandalan yang tinggi, maka relay pengaman harus mempunyai kemampuan selektif yang baik. Dengan demikian, segala tindakannya akan tepat dan akibatnya gangguan dapat dieliminir menjadi sekecil mungkin. Berikut diberikan contohnya pada Gambar 2.15:



Gambar 2.15 Suatu Sistem Tenaga Listrik yang Sederhana Mengalami Gangguan Pada Titik K

Dalam sistem tenaga listrik seperti gambar di atas, apabila terjadi gangguan pada titik K, maka hanya C.B.6 saja yang boleh bekerja sedangkan untuk C.B.1, C.B.2 dan C.B. - C.B. yang lain tidak boleh bekerja.

c. Peka / sensitif

Relay harus dapat bekerja dengan kepekaan yang tinggi, artinya harus cukup sensitif terhadap gangguan didaerahnya meskipun gangguan tersebut minimum, selanjutnya memberikan jawaban / response.

d. Andal / reliabililit

Keandalan relay dihitung dengan jumlah relay bekerja / mengamankan daerahnya terhadap jumlah gangguan yang terjadi. Keandalan relay dikatakan

cukup baik bila mempunyai harga : 90 % - 99 %. Misal, dalam satu tahun terjadi gangguan sebanyak 25 X dan relay dapat bekerja dengan sempurna sebanyak 23 X.

Keandalan dapat di bagi 2 :

1) dependability : relay harus dapat diandalkan setiap saat.

2) security : tidak boleh salah kerja / tidak boleh bekerja yang bukan seharusnya bekerja.

e. Sederhana / simplicity

Makin sederhana sistem relai semakin baik, mengingat setiap peralatan / komponen relai memungkinkan mengalami kerusakan. Jadi sederhana maksudnya kemungkinan terjadinya kerusakan kecil (tidak sering mengalami kerusakan).

f. Murah / economy

Relai sebaiknya yang murah, tanpa meninggalkan persyaratan-persyaratan yang telah tersebut di atas.

3. Daerah Proteksi

Daerah proteksi adalah bagian sistem yang dijaga oleh sistem proteksi yang umumnya berisi satu elemen (maksimum dua) dari sistem. Untuk dapat mengamankan seluruh komponen dan agar sistem pengamanan menjadi selektif, maka sistem tenaga listrik dibagi dalam daerah-daerah pengamanan. Setiap daerah pengamanan pada umumnya terdiri dari satu atau lebih elemen sistem tenaga listrik. Mengingat bahwa seluruh sistem ini harus diamankan, maka tidak ada

pilihan lain selain daerah pengamanan ini harus tumpang tindih (overlap) (Ram dan Vishwakarma, 1995).

4. Proteksi Komponen Utama Sistem

Pada prinsipnya sistem proteksi tenaga listrik terdiri atas beberapa komponen antara lain relai, pemutus daya, sumber penyuplai, transformator arus, dan tegangan.

a. Relai

Relai adalah sebuah alat yang menanggapi suatu perubahan dalam rangkaian listrik dengan maksud untuk memberikan perubahan dalam rangkaian listrik itu atau yang lain. Rangkaian yang digerakkan dengan relai itu adalah rangkaian pengendali atau sinyal.

Tugas suatu relai adalah membedakan keadaan di dalam daerah perlindungannya dengan semua keadaan sistem yang lain. Relai ini harus memberikan daya pada kumparan pemutus (trip coil) untuk membuka atau menutup, menyediakan pengamanan terhadap pemutusan yang keliru (proses blok) untuk gangguan yang terjadi di luar daerah tersebut. Suatu relai harus mempunyai kemampuan untuk membuka keputusan logis berdasarkan keadaan sinyal masukannya sehingga relai tersebut mampu menghasilkan keluaran yang sinyal masukannya benar untuk setiap kemungkinan keadaan sinyal.

Pemutus daya ini harus memiliki kapasitas yang cukup untuk memikul arus hubung singkat maksimum sesaat yang dapat mengalir pada pemutus daya dan kemudian memutuskannya. Pemutus daya juga harus mampu menahan proses

penutupan balik pada saat hubung singkat (reclosing) dan kemudian memutuskannya menurut standar yang telah ditentukan (ram dan Vishwakarma, 1995).

D. Relai Proteksi Transformator

Berberapa jenis relai proteksi transformator, yaitu :

1. Relai Bucholz

Relai ini digunakan untuk mendeteksi dan mengamankan transformator terhadap gangguan di dalam transformator yang menimbulkan Gas yang timbul ini diakibatkan oleh hubung singkat pada kumparan, busur listrik antarlaminasi dan busur listrik akibat kontak yang kurang baik.

Relai bucholz dipasang di antaratangi transformator dan konservator. Relai ini memberikan indikasi alarm kalau terjadi gangguan di dalam transformator yang relatif kecil dan akan memberikan sinyal tripping kalau gangguan yang terjadi di dalam transformator serius (cukup membahayakan). Relai ini biasanya digunakan pada transformator yang mempunyai rating kapasitas 750 KVA.

2. Relai Suhu

Relai ini digunakan untuk mengamankan transformator dari kerusakan akibat adanya suhu yang berlebihan. Ada 2 macam relai suhu pada transformator, yaitu :

- a. Relai Suhu Minyak
- b. Relai Suhu Kumaran

3. Relai Gangguan Tanah(*Graund Fault Relay*)

Relai gangguan tanah berfungsi untuk mengamankan transformator dari kerusakan akibat gangguan tanah. Relai ini dilengkapi dengan transformator arus, kumparan kerja relai, dan kumparan tripping. Pada kondisi normal, dimana tidak ada gangguan yang terjadi pada transformator, jumlah arus ketiga fasa sama dengan nol sehingga jumlah fluks pada inti transformator sama dengan nol. Apabila terjadi gangguan tanah, maka jumlah fluks pada inti transformator tidak lagi nol.

4. Relai Beban Lebih (*Over Current Relay*)

Relai ini berfungsi untuk mengamankan transformator dari kerusakan akibat adanya beban (arus) yang melebihi harga tertentu. Beban lebih jika dibiarkan terlalu lama akan menyebabkan panas pada kumparan transformator sehingga dapat menyebabkan kerusakan isolasi pada kumparan transformator. Sensor relai ini pada umumnya berupa bimetal yang mendapat sinyal atau arus masukan dari transformator arus. Arus sinyal masukan diubah kepanas untuk menggerakkan elemen bimetal (termis).

5. Relai Tekanan Lebih

Relai tekanan lebih digunakan sebagai pengaman transformator untuk mendeteksi adanya tekanan-tekanan yang berlebihan akibat gangguan didalam

ransformator. Relai ini merupakan relai mekanik yang menggunakan sejenis membran atau plat yang akan pecah oleh karena tekanan atau desakan jarum pemecah (*breaking needle*) akibat gangguan dalam ransformator.

6. Relai Diferensial

Pemakaian relai diferensial sebagai pengamanan transformator diharapkan mampu mendeteksi gangguan-gangguan internal transformator. Gangguan-gangguan tersebut antara lain hubung singkat di dalam kumparan dan hubung singkat antar fase kumparan. Prinsip kerja relai diferensial pada transformator berdasarkan sirkulasi arus masukan atau perbandingan besarnya arus sisi primer dengan arus sisi sekunder.

E. Relai Diferensial

Pengembangan suatu sistem tenaga listrik berbanding lurus dengan majunya perkembangan teknologi. Dengan teknologi yang semakin moderen akan membuat semakin handalnya sistem proteksi yang digunakan pada transformator daya.

Proteksi transformator daya pada prinsip kerjanya dilakukan dengan menghindarkan transformator daya mengalami panas yang berlangsung pada kurun waktu yang cukup lama. Hal ini membuktikan bahwa transformator daya harus diisolasi untuk menghindari terjadinya gangguan.

1. Prinsip Kerja Relai Diferensial

Relai diferensial adalah salah satu relai pengaman utama sistem tenaga listrik yang bekerja seketika tanpa koordinasi relai disekitarnya sehingga waktu kerja dapat dibuat secepat mungkin. Sebuah relai diferensial didefinisikan sebagai relai yang bekerja ketika perbedaan fasor dari dua atau lebih listrik melebihi jumlah yang ditentukan. Hampir seluruh tipe relai, ketika dihubungkan dengan cara tertentu dapat bekerja menjadi relai diferensial. Relai differensial bekerja dengan membandingkan nilai arus pada CT sisi kumparan primer dan CT sisi kumparan sekunder. Apabila selisih antara kedua CT tersebut melebihi nilai setelan maka relai akan trip (Syukriyadin dkk, 2011).

Gambar dibawah ini menunjukkan prinsip kerja relai differensial pada transformator :



Gambar 2.16 Prinsip Kerja Relai Differensial

Arus primer I_1 dan I_2 dideteksi oleh CT1 dan CT2, dalam keadaan normal atau ada gangguan diluar daerah pengamanannya (diantara dua CT), arus yang mengalir di CT1 sama dengan arus yang mengalir di CT2. Jadi kalau kedua trafo arus itu identik (mempunyai rasio yang sama), I_2' sama besardan sefasa dengan

I_2'' , sehingga $\text{diff} = 0$ dan relai-relai tidak akan bekerja. Jika $\text{diff} \neq 0$ maka relai akan bekerja (Baharuddin dan Ridwan Kurniawan, 2012).

Daerah pengamanannya dibatasi oleh pasangan trafo arus dimana relai diferensial tidak dapat dijadikan sebagai pengaman cadangan untuk daerah berikutnya.

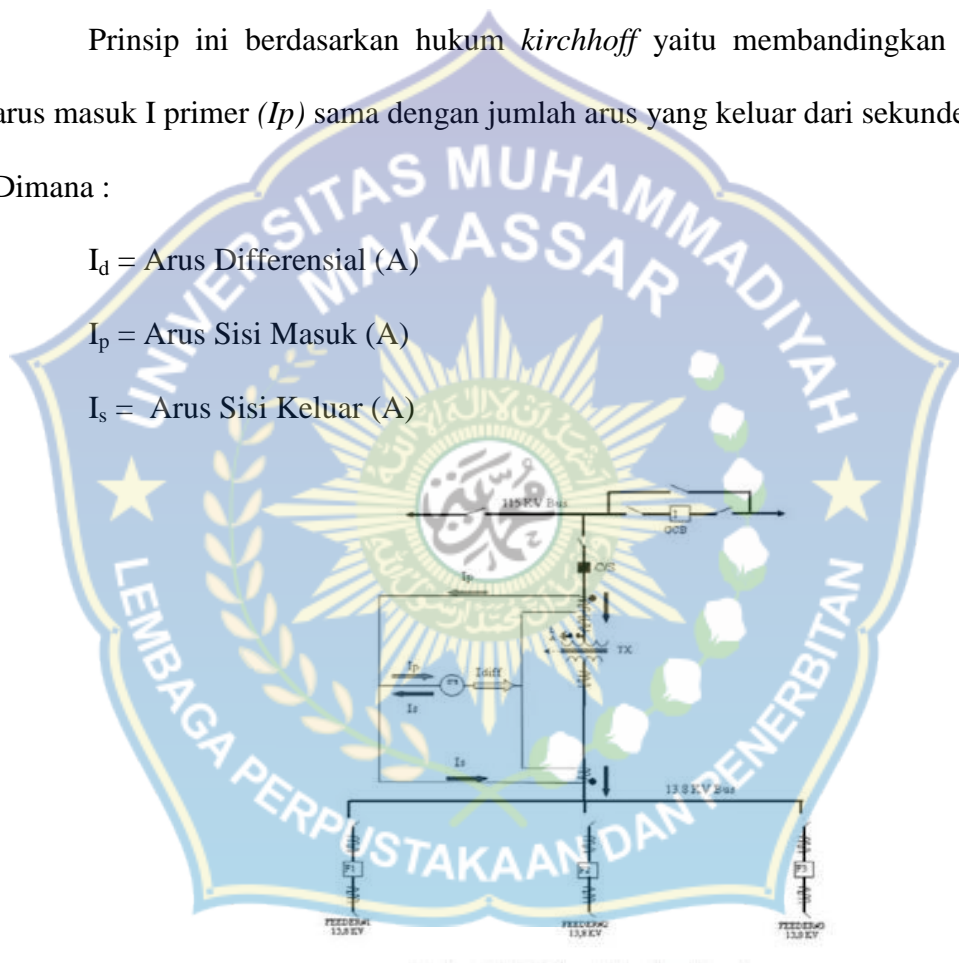
Prinsip ini berdasarkan hukum *kirchhoff* yaitu membandingkan jumlah arus masuk I primer (I_p) sama dengan jumlah arus yang keluar dari sekunder (I_s).

Dimana :

I_d = Arus Differensial (A)

I_p = Arus Sisi Masuk (A)

I_s = Arus Sisi Keluar (A)



Gambar 2.17 Relai differensial saat arus normal

$$I_d = I_p + I_s = 0 \text{ A} \dots\dots\dots(2)$$

$$I_{diff} = I_p - I_s = 0 \text{ A} \dots\dots\dots(3)$$

Maka tidak ada tegangan yang melintasi *coil relay* dan tidak ada arus yang mengalir pada relai tersebut, sehingga relai diferensial tidak bekerja.

2. Relai Differensial Keadaan Gangguan Internal

Gangguan internal adalah gangguan yang terjadi pada daerah pengamanan relai differensial (Gambar 2.18). Pada saat terjadi gangguan pada daerah pengamanan relai differensial, maka arus akan mengalir menuju titik gangguan tersebut. Sehingga arus yang mengalir pada CT_2 akan berbalik dari arah normalnya menuju titik gangguan tersebut. Gangguan tersebut mengakibatkan keamanan transformator terancam ketika transformator bekerja dan menjadikan sistem tidak seimbang. Asumsi sederhananya adalah :



Gambar 2.18 Relai Differensial Keadaan Gangguan Internal

$$I_d = I_p + I_s > 0 \text{ A} \dots\dots\dots(4)$$

$$I_{dif} = I_p + I_s > 0 \text{ A} \dots\dots\dots(5)$$

Karena $I_d \neq 0$, maka relai differensial harus bekerja dengan memberikan sinyal trip kepada CB karena dapat menyebabkan kerusakan padatransformator jika gangguan tersebut dibiarkan.

3. Relai Differensial Keadaan Gangguan Internal

Gangguan eksternal adalah gangguan yang terjadi di luar daerah pengamanan relai differensial (Gambar 2.19), seperti gangguan hubung singkat pada saluran transmisi dan gangguan lainnya. Pada saat terjadi gangguan diluar daerah pengaman relai differensial, relai differensial tidak akan bekerja. Karena arus yang mengalir pada CT_1 dan CT_2 besarnya sama tapi arahnya berlawanan. Asumsi sederhananya adalah sebagai berikut :



Gambar. 2.19 Relai Diferensial Keadaan Gangguan Eksternal

$$I_d = I_p + I_s = 0 \text{ A} \quad (6)$$

$$I_{dif} = I_p + I_s = 0 \text{ A} \dots\dots\dots (7)$$

4. Jenis Relai Differensial

a. Relai differensial longitudinal

Relai differensial longitudinal biasa dikenal sebagai *circulating current type*. Dalam keadaan normal, maka gangguan yang terjadi diluar pengamanan (*zone*) mengakibatkan tidak ada arus atau bahkan sangat kecil yang mengalir pada *operating coil*.

Nilai setting relai differensial longitudinal adalah :

$$i_{setting} = \Delta i = i_1 - i_2$$

Dimana :

$I_{setting}, \Delta i$ = nilai setting relay differensial longitudinal (A)

i_1 = Arus CT sisi primer (A)

i_2 = Arus CT sisi sekunder (A)

Relai differensial longitudinal menggunakan susunan relay arus lebih yang terhubung untuk beroperasi sebagai relay diferensial. Elemen sistem ini bisa berupa rangkaian panjang, sebagian bus atau belitan generator atau transformator. Sepasang CT dipasang pada kedua ujung bagian yang akan dilindungi. Sekunder CT dihubungkan secara seri dengan bantuan kabel pilot sedemikian rupa sehingga mereka membawa arus yang diinduksi ke arah yang sama. Koil operasi dari relai arus lebih terhubung di seluruh sirkuit sekunder CT.

Biasanya ketika tidak ada kesalahan atau ada kesalahan eksternal, arus dalam kedua CT sekunder sama dan kumparan operasi relai, oleh karena itu, tidak membawa arus apa pun.

Aliran pada satu sisi saja, atau bahkan beberapa arus yang mengalir dari satu sisi sementara arus yang lebih besar memasuki sisi lain akan menyebabkan arus diferensial mengalir melalui koil operasi relai. Dengan kata lain, arus relai diferensial akan sebanding dengan perbedaan fasor antara arus yang masuk dan meninggalkan elemen yang dilindungi; dan, jika arus diferensial melebihi nilai pengambilan relai, relai akan beroperasi.

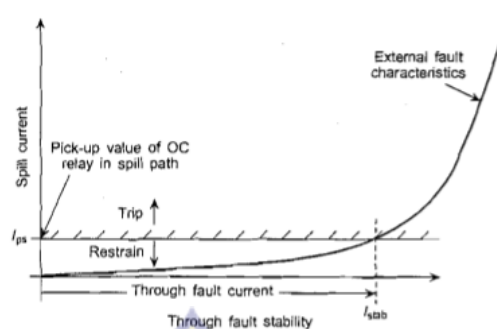
b. Relai differensial persentase

Relai differensial persentase muncul karena kelemahan relai differensial longitudinal yakni arus setting harus dibuat lebih besar dari arus operasi dalam keadaan normal untuk mengatasi arus inrush dan gangguan yang cukup besar berada diluar daerah proteksinya.

Relai differensial persentase mempunyai restrain coil yang di tap pada bagian tengahnya, sehingga membentuk dua bagian dengan jumlah lilitan yang sama, Nr/2. *Restraining coil*, dihubungkan pada bagian arus yang bersirkulasi, sehingga menerima arus gangguan yang lewat.

5. Karakteristik Relai Differensial Longitudinal

Setiap relai differensial dilengkapi dengan nilai settingnya dan memberikan karakteristik tripping tertentu. Karakteristik inilah yang akan mengenali jenis gangguan.



Gambar 2.20 Karakteristik Relai Differensial Longitudinal

Relai ini akan bekerja sketika tanpa nilai waktu tunda ketika nilai I_{diff} melebihi nilai setting relai, relai ini kan bekerja beberapa milli detik (10-20 ms).

6. Pertimbangan Relai Diferensial

Menurut Bonar Panjaitan, (2012), dalam penerapan prinsip pengaman diferensial suatu trafo daya, terdapat beberapa pertimbangan yang perlu diperhatikan, yaitu sebagai berikut :

- Koreksi trafo terhadap kemungkinan terjadinya pergeseran sudut fasa kumparan trafo.
- Pengaruh jenis sistem pentanahan dan arrangement kumparan.
- Koreksi terhadap kemungkinan ketidakseimbangan arus dari trafo arus (koreksi rasio).
- Pengaruh inrush magnetisasi pada waktu awal pemberian tegangan.
- Kemungkinan terjadinya magnetisasi berlebihan (*over fluxing*).

7. Penyetelan Relai Diferensial

a. Menentukan rasio CT

Sebelum menentukan rasio CT terlebih dahulu menghitung arus rating :

$$I_n = \frac{S}{v \times \sqrt{3}} \dots\dots\dots (8)$$

I_n atau arus nominal merupakan arus yang mengalir pada masing-masing jaringan (tegangan tinggi dan tegangan rendah). Arus *rating* berfungsi sebagai batas pemilihan CT .

$$I_{rating} = 110\% \times I_n \dots\dots\dots (9)$$

Dimana :

I_p = Arus primer CT1 (A)

I_s = Arus sekunder CT2 (A)

I_n = Arus nominal (A)

S = Daya (MVA)

Rasio CT yang dipilih mendekati nilai *rating* arus yang telah dihitung dan CT dengan rasio tersebut dipasaran.

b. Menghitung kesalahan *mismatch*

Kesalahan *mismatch* adalah kesalahan pembacaan perbedaan arus dan tegangan disisi primer dan sekunder transformator serta pergeseran fasa di trafo arus. Untuk menentukan kesalahan *mismatch* terlebih dahulu menghitung nilai CT yang ideal di salah satu sisi transformator sesuai persamaan dibawah ini :

$$CT_2(ideal) = CT_1 \times \frac{V_1}{V_2} \dots\dots\dots (10)$$

Dimana :

CT_1 : *Current transformer* pada sisi primer

CT_2 : *Current transformer* pada sisi sekunder

V_1 : Tegangan di sisi primer (KV)

V_2 : Tegangan di sisi sekunder (KV)

Kesalahan *mismatch* didapat dari perbandingan antara CT ideal dengan CT yang ada dipasaran. Kesalahan *mismatch* diharapkan nilainya tidak boleh lebih 5% agar proteksi relai diferensial bekerja secara optimal dalam mengamankan transformator daya. Kesalahan *mismatch* untuk relai diferensial adalah :

$$\text{Kesalahan mismatch} = \frac{CT_{ideal}}{CT_2} \% \dots\dots\dots (11)$$

F. Perangkat Lunak PSCAD/EMTDC

PSCAD (*Power Systems ComputerAidedDesign*) adalah antarmuka pengguna grafis yang kuat dan fleksibel untuk mesin solusi EMTDC yang terkenal di dunia. PSCAD memungkinkan pengguna untuk membuat skematissirkuit, menjalankan simulasi, menganalisis hasil, dan mengelola data dalam lingkungan grafis yang benar-benar terintegrasi. Fungsi perencanaan online, kontrol dan meter juga disertakan, sehingga pengguna dapat mengubah parameter sistem selama menjalankan simulasi, dan melihat hasilnya secara langsung (Muller, 2005).

PSCAD dilengkapi dengan pustaka model yang telah diprogram dan diuji, mulai dari elemen pasif sederhana dan fungsi kontrol, hingga model yang lebih kompleks, seperti mesin listrik, perangkat FACTS, saluran transmisi dan kabel. Jika model tertentu tidak ada, PSCAD menyediakan fleksibilitas pembuatan

model khusus, baik dengan merakitnya secara grafis menggunakan model yang ada, atau dengan memanfaatkan Editor Desain yang dirancang secara intuitif (Muller, 2005).

PSCAD dan mesin simulasi EMTDC-nya, telah dikembangkan hampir 30 tahun, terinspirasi oleh ide dan saran oleh basis pengguna yang terus berkembang di seluruh dunia. Hal di atas adalah filosofinya dan pengembangannya (Muller, 2005).

PSCAD / EMTDC adalah simulasi domain waktu dan alat profesional untuk mempelajari perilaku transien jaringan listrik. PSCAD adalah antarmuka pengguna grafis dan EMTDC adalah mesin simulasinya. PSCAD / EMTDC adalah yang paling cocok untuk mensimulasikan tanggapan instan domain waktu, yaitu transien elektromagnetik sistem listrik. Ini dapat digunakan untuk semua aspek melakukan simulasi sistem daya termasuk perakitan sirkuit, kontrol *run-time*, analisis dan pelaporan (Wilson, P.L.)

Pada PSCAD/ EMTDC, beberapa cara juga disediakan untuk membuat beberapa model dan komponen khusus yang tidak ada di perpustakaan. EMTDC mendukung model yang ditulis dalam bahasa FORTRAN / C (Wilson, P.L.)

Dijelaskan dalam Muller, (2005), pengguna PSCAD mencakup insinyur dan ilmuwan dari utilitas, produsen, konsultan, lembaga penelitian dan akademis. Ini digunakan dalam perencanaan, operasi, desain, komisioning, persiapan spesifikasi tender, pengajaran dan penelitian. Berikut ini adalah contoh dari jenis penelitian yang secara rutin dilakukan menggunakan PSCAD :

- a. Studi kontijensi jaringan AC yang terdiri dari mesin berputar, exciters, governor, turbin, transformer, jalur transmisi, kabel, dan muatan
- b. Relay koordinasi
- c. Efek saturasi trafo
- d. Koordinasi isolasi transformator, pemutus dan penangkap
- e. Pengujian impuls transformer
- f. Studi resonansi sub-sinkron (SSR) jaringan dengan mesin, saluran transmisi, dan sistem HVDC
- g. Evaluasi desain filter dan analisis harmonik
- h. Kontrol desain sistem dan koordinasi FACTS dan HVDC; termasuk STATCOM, VSC, dan *cycloconverters*
- i. Desain parameter pengontrol yang optimal
- j. Investigasi sirkuit baru dan konsep kontrol
- k. Sambaran petir, kesalahan atau operasi pemutus arus
- l. Pembelajaran *Steep front and fast front*
- m. Investigasi efek pulsing mesin diesel dan turbin angin pada jaringan listrik.

PSCAD/EMTDC digunakan oleh Washington Group International untuk melakukan studi transfer bus cepat di IPEC Energy Center Indian Point 2 (IP2) Entergi Corp. Model simulasi terdiri dari sekitar 50 motor induksi baik pada level tegangan 6.9kV dan 480V dengan beban torsi dinamis, sembilan (9) transformer, tap changer, skema transfer bus, kesalahan bus, urutan beban, lebih dari 70 pemutus, kabel, dan jalur transmisi. (Corporation, Nayak)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode eksperimen menggunakan aplikasi PSCAD/EMTDC dengan membuat rangkaian sistem tenaga listrik, kemudian menerapkan model Sistem daya, gangguan dan relai pada sistem tenaga listrik tersebut, dan menjalankan simulasinya untuk menganalisis data dari sistem daya, gangguan dan relai pada sistem tenaga listrik tersebut.

A. Waktu dan Tempat Penelitian

Waktu : Februari 2019 hingga Mei 2019
Tempat : Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar
Jalan Sultan Alauddin 259 Makassar

B. Alat dan Bahan

1. Alat

Adapun alat yang digunakan pada penelitian ini adalah:

a. Laptop ACER Aspire V5-431 dengan spesifikasi:

Prosesor : Intel Pentium 987 1.5GHz 2MB

Prosesor Grafis : Intel HD Graphics

Memori RAM : 2 GB DDR3.

Memori Harddisk : 250 GB.

Sistem Operasi : Windows 10 Pro 64-bit.

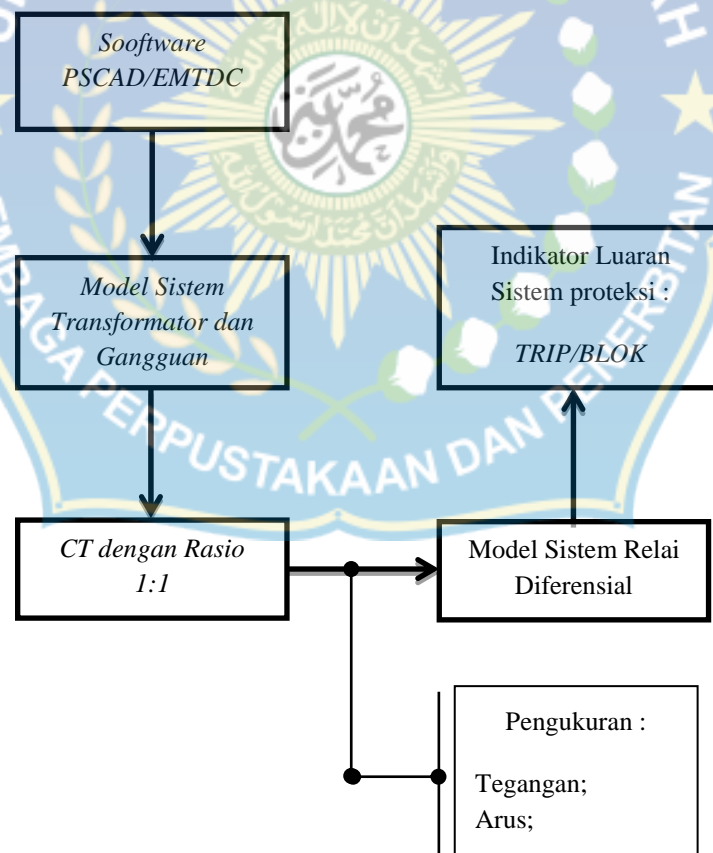
- b. Perangkat Lunak *Power System Computer Aided Design (PSCAD) Student version*

2. Bahan

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

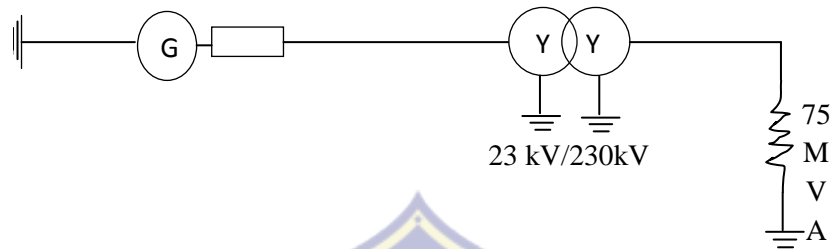
C. Skema Penelitian

Adapun garis besar dari rangkaian kelistrikan pada modul yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.1 berikut.



Gambar 3.1. Diagram Balok Skema Penelitian

D. Data Penelitian

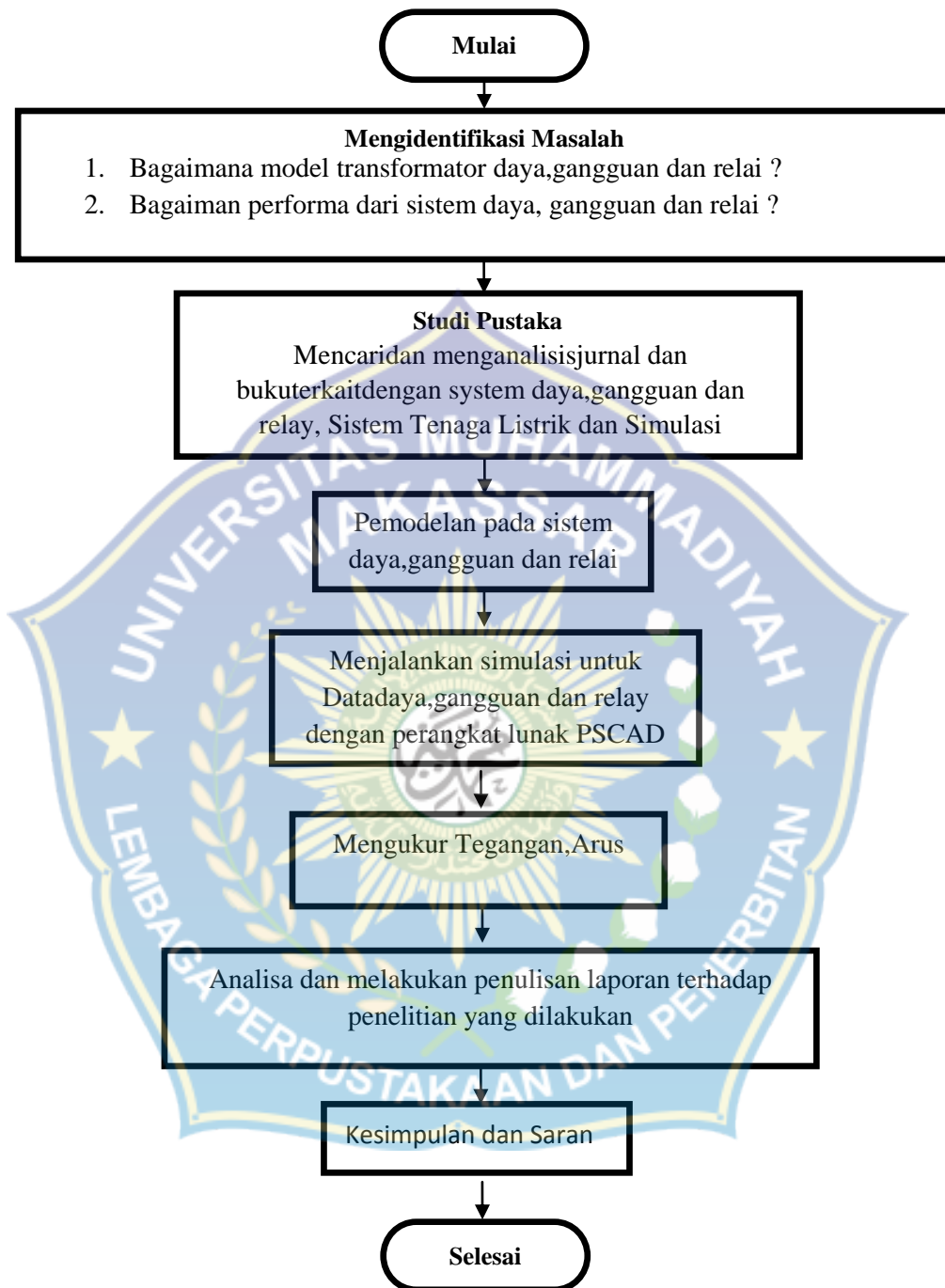


F = 50 Hz
S = 100 MVA

E. Langkah Penelitian

Secara garis besar tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini di tunjukkan pada bagan alir berikut.





Gambar 3.2. Bagan alir proses penelitian

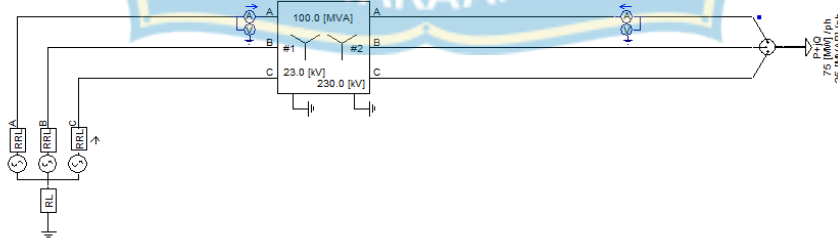
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

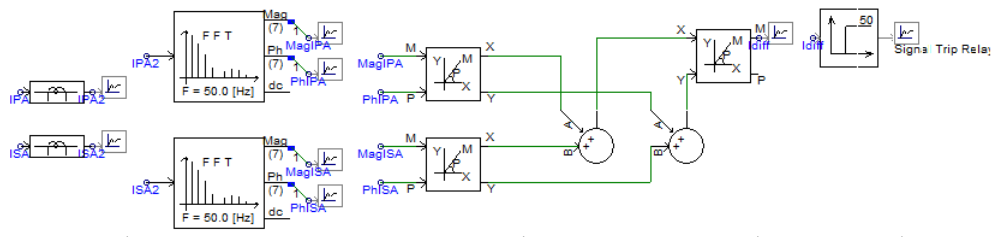
A. Pemodelan Sistem Daya dan Rangkaian Sistem Relai Differensial menggunakan Software *PSCAD*

Dalam penelitian ini akan menganalisa bagaimana kinerja relai differensial terhadap gangguan internal dan eksternal pada transformator secara tepat berdasarkan nilai-nilai yang diperoleh dari simulasi *PSCAD*.

Sistem tenaga listrik yang akan disimulasikan adalah sistem tenaga listrik berbeban terdiri dari satu sumber ekivalen 230 kV, 3 fase, 50 Hz, dan ransorfamtor yang digunakan pada simulasi ini adalah transformator *step up*, 23 kV/230kV, Y-Y, 100 MVA dengan tegangan rendah (TR) berada pada sisi primer transformator dan tegangan tinggi (TT) berada pada sisi sekunder dengan beban reaktif sebesar 75 MW, 25 MVAR dengan menggunakan perangkat lunak *PSCAD V 4.2.0 Student Version*.



Gambar 4.1 Gambar model sistem daya

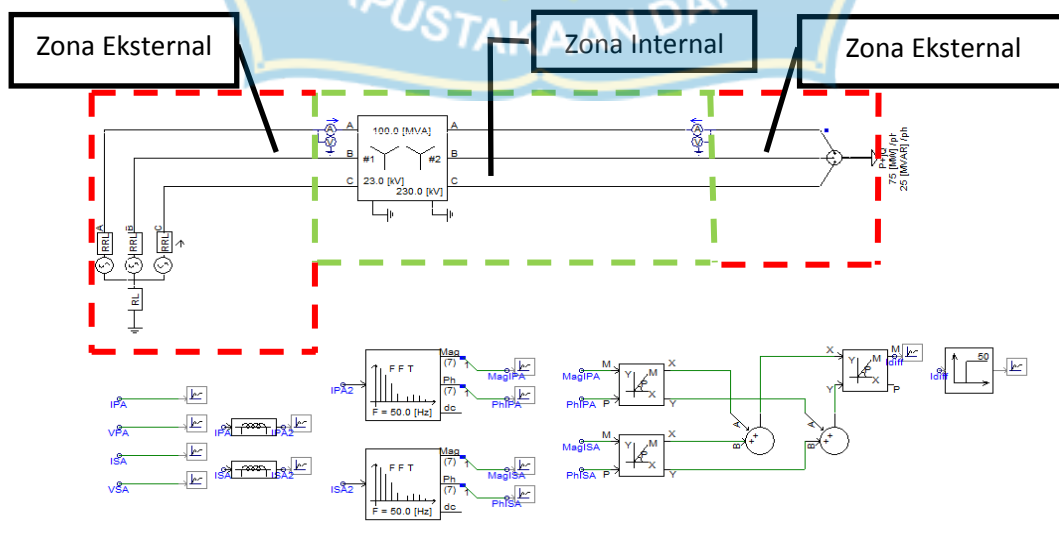


Gambar 4.2 Model sistem relai differensial

Pada Gambar 4.2 Adalah gambar model sistem relai yang terdiri dari Current Transformer (CT), Frekuensi scanner, Polar rectanguler cordinate converter, Summing/Difference Junction, dan Over current detection blok.

Rasio CT relai differensial pada sisi primer adalah (sisi TR) dipilih 3000:1 dan rasio CT sisi sekunder (sisi TT) dipilih 300:1.

Simulasi yang akandilakukan terdiri dari tiga kondisiyaitu sistem dalam kondisi normal, kondisi gangguan internal, dankondisi gangguan eksternal.. Setiapsimulasi, dilakukan0,50detik. Dengannilaiarusyangakandijadikanebagaidasarsetting-an untukrelai, sehinggakinerjarirelaidifferensialdapatdenganjelasmembedakanantaragangguan internal, eksternaldankondisi normal.



Gambar 4.3 Zona proteksi relai differensial

B. Hasil Simulasi

Setelah simulasi dijalankan dengan program PSCAD/EMTDC, maka didapat hasil sebagai berikut :

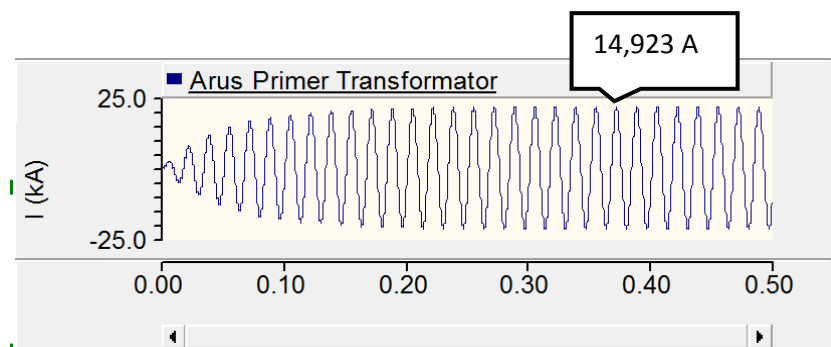
1. Sistem Dalam Kondisi Normal

Berikut adalah model jaringan dalam kondisi normal :

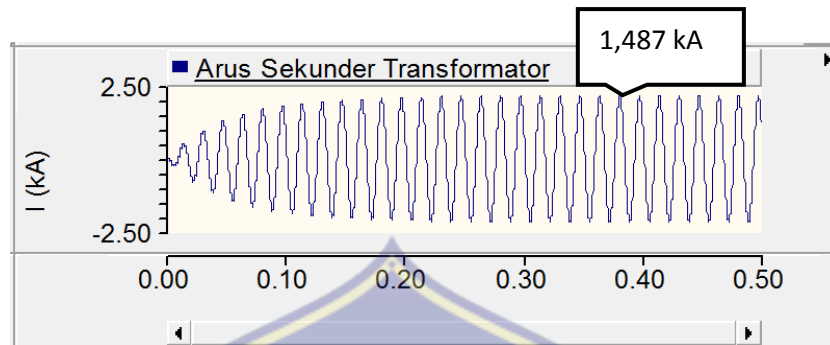


Gambar 4.4 Model sistem dalam kondisi normal

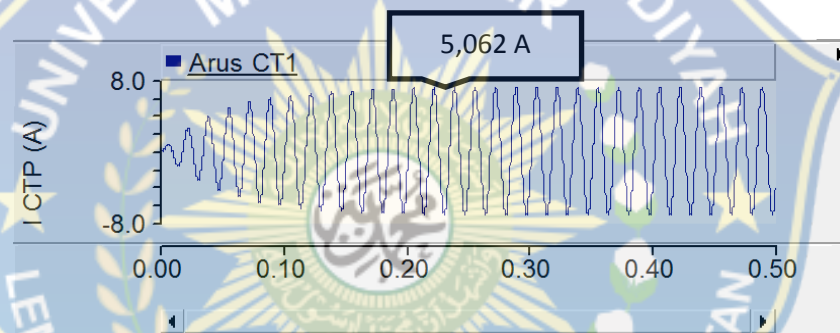
Bentuk gelombang hasil simulasi pada saat keadaan normal keluaran dari PSCAD dapat dilihat pada Gambar 4.5 sebagai berikut :



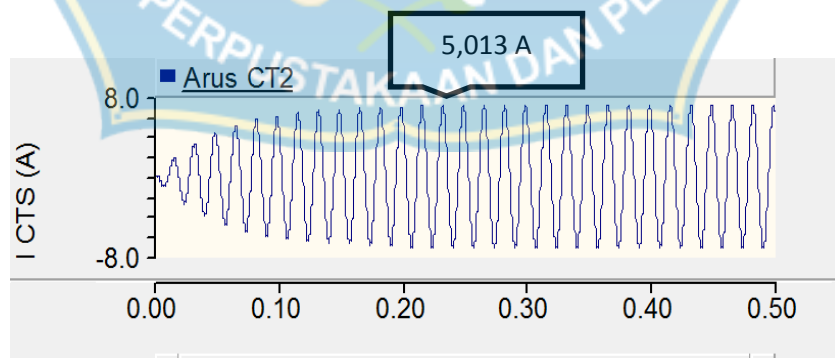
(a)



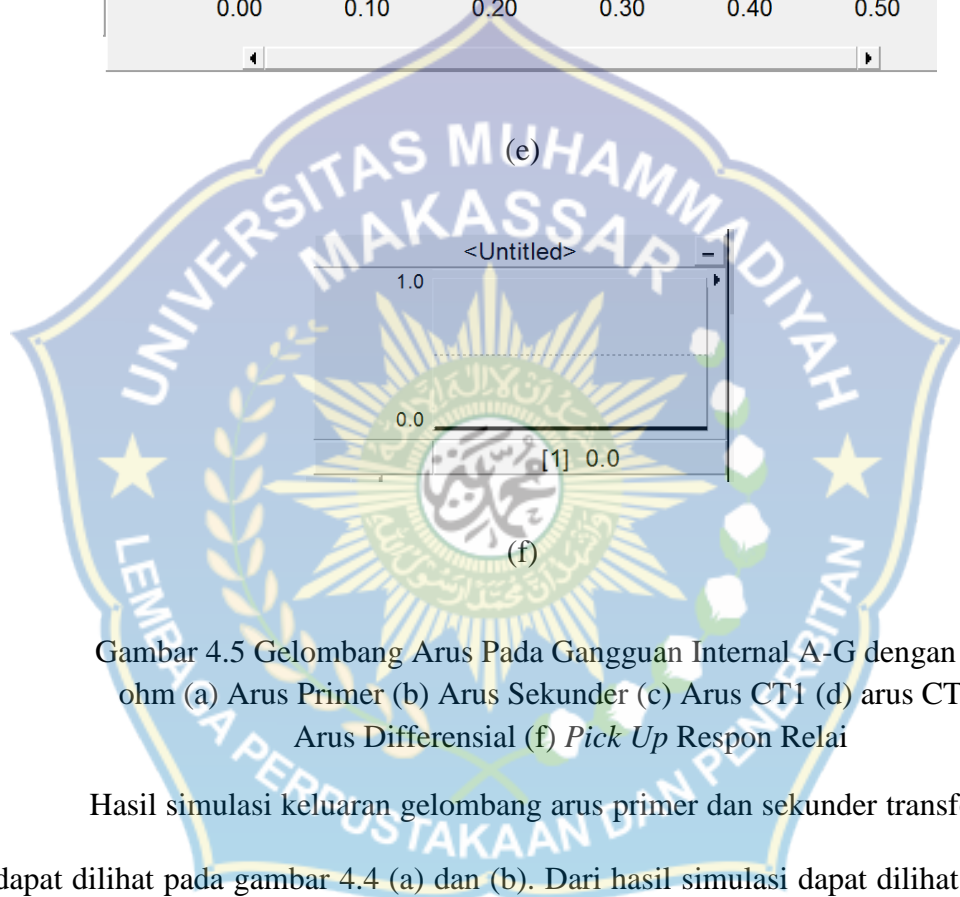
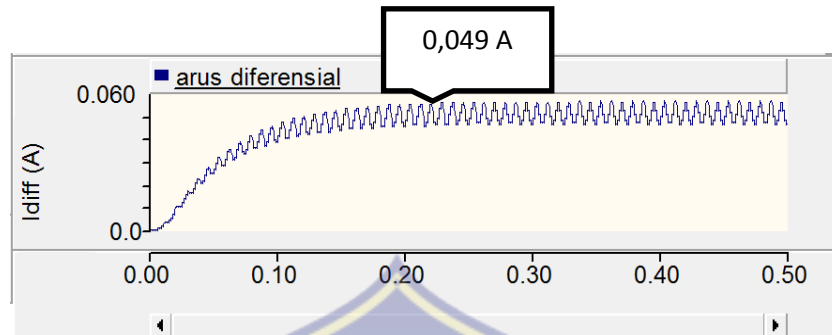
(b)



(c)



(d)



Gambar 4.5 Gelombang Arus Pada Gangguan Internal A-G dengan $R_f = 2$ ohm (a) Arus Primer (b) Arus Sekunder (c) Arus CT1 (d) arus CT2 (e) Arus Diferensial (f) *Pick Up* Respon Relai

Hasil simulasi keluaran gelombang arus primer dan sekunder transformator dapat dilihat pada gambar 4.4 (a) dan (b). Dari hasil simulasi dapat dilihat bahwa pada keadaan normal arus yang mengalir pada sisi primer transformator sebesar 14,923 kA dan pada sisi sekunder sebesar 1,487 kA.

Gambar 4.4 (c) dan (d) menunjukkan besar arus yang mengalir pada CT1 dan CT2. Besar arus pada CT1 yaitu 5,042 A dan besar arus pada CT2 yaitu 5,013 A. Dari data tersebut dapat dilihat bahwa arus pada CT1 dan CT2 nilainya hampir

sama. Sehingga pada keadaan normal besar arus differensial adalah 0,049 A, hal ini dapat dilihat pada gambar 4.4 (e).

Dari data di atas maka dapat ditentukan nilai arus setting relai dengan menggunakan persamaan berikut :

$$i_{setting} = \Delta i = i_1 - i_2$$

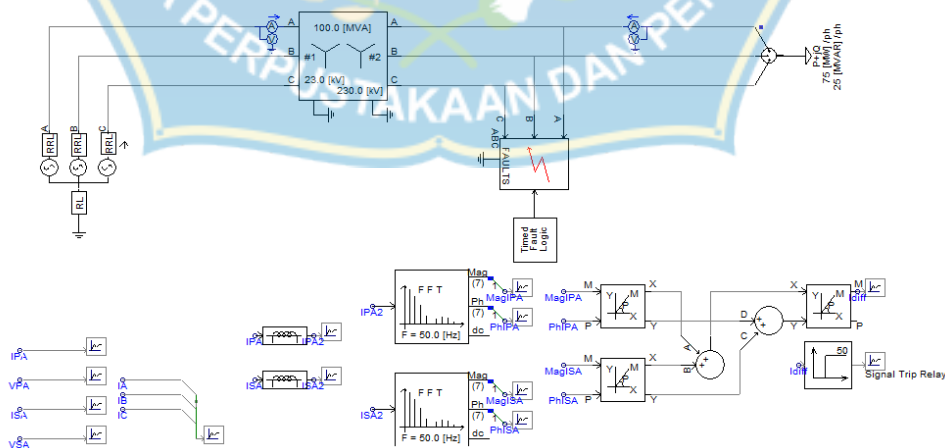
$$\Delta i = 5,062 A - 5,013 A$$

$$= 0,049 A$$

Dari perhitungan di atas didapat nilai setting sebesar 0,049 A. Nilai setting tersebut sama besar dengan arus differensial. Dengan pertimbangan kesalahan rasio CT maka nilai arus setting dinaikkan 20% diatas nilai arus differensial maksimum dalam kondisi normal yaitu $0,049 A \times 120\% = 0,058 A$. Jadi nilai arus setting relai adalah 0,058 A

2. Sistem Dalam Kondisi Gangguan Internal

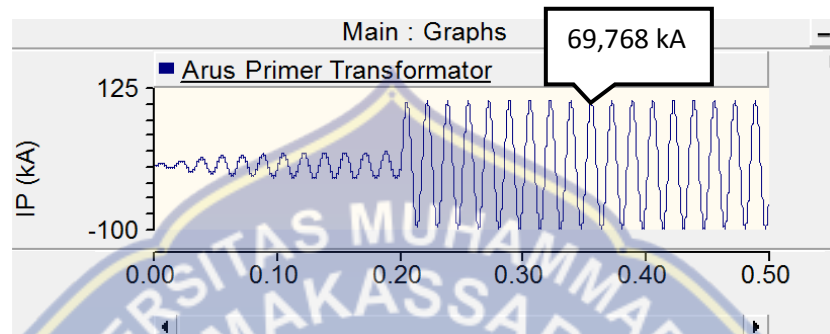
Berikut model jaringan dalam kondisi gangguan internal :



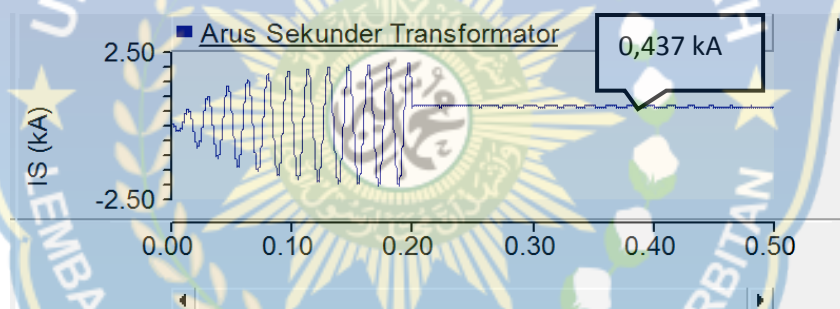
Gambar 4.6 Model jaringan kondisi gangguan internal

a. Gangguan satu fase ke tanah (A-G)

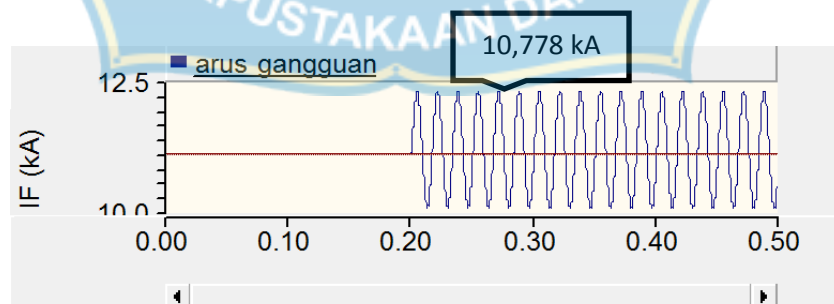
Gangguan divariasikan dengan tiga variasi resistansi gangguan (R_f) dari 2, 10 dan 20 Ohm. Gangguan sistem terjadi pada detik 0,20. Bentuk gelombang hasil simulasi gangguan fase A ke tanah dengan nilai R_f sebesar 2 Ohm keluaran dari PSCAD dapat dilihat pada Gambar 4.7 sebagai berikut:



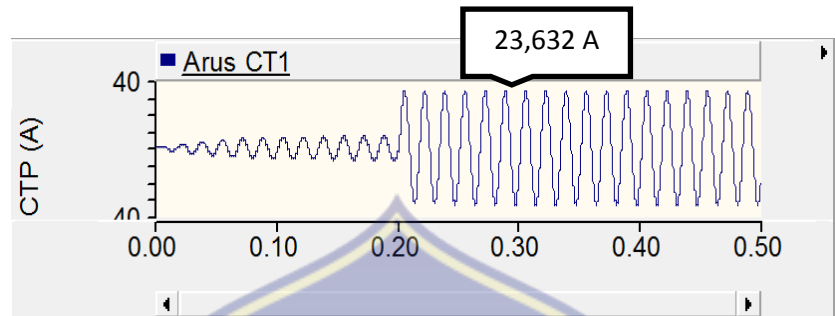
(a)



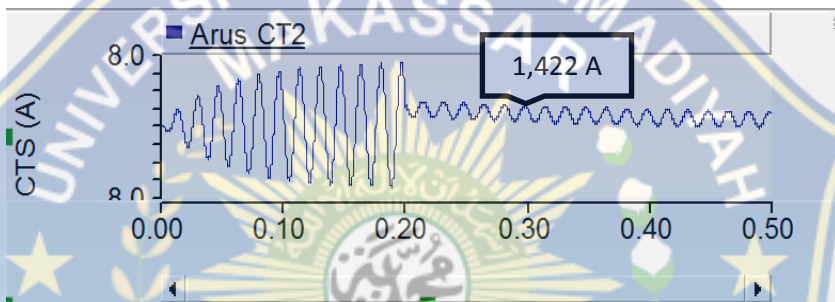
(b)



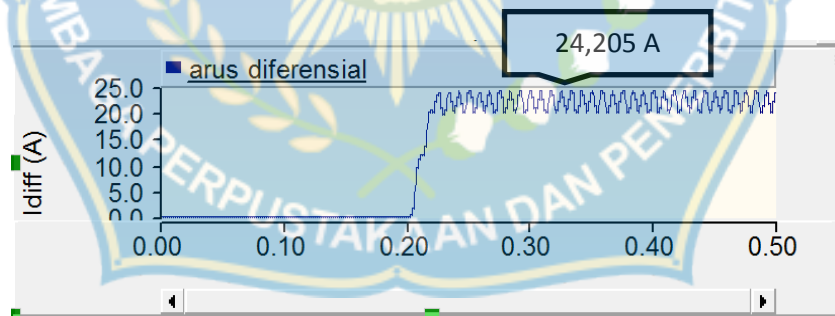
(c)



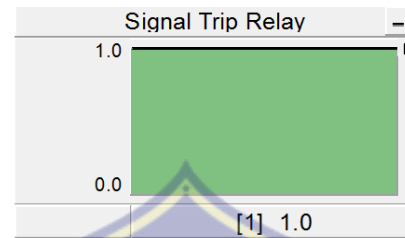
(d)



(e)



(f)



(g)

Gambar 4.7 Gelombang Arus Pada Gangguan Internal A-G dengan $R_f = 2$ ohm (a) Arus Primer (b) Arus Sekunder (c) Arus CT1 (d) arus CT2 (e) Arus Gangguan (f) Arus Differensial (g) *Pick Up Respon Relai*

Hasil simulasi keluaran gelombang arus primer dan sekunder transformator dapat dilihat pada Gambar 4.7 (a) dan (b). Dari hasil simulasi dapat dilihat bahwa pada saat terjadi gangguan di zona internal yaitu pada detik 0,20 terjadi peningkatan nilai arus pada sisi primer transformator menjadi 69,768 kA, sedangkan pada sisi sekunder nilai arus yang mengalir ketika terjadi gangguan di zona internal pada detik 0,20 mengalami penurunan menjadi 0,437 kA. Dan besar arus gangguan yang terjadi ditunjukkan pada Gambar 4.7 (c) yaitu 10,778 kA.

Gambar 4.7 (d) dan (e) menunjukkan besar arus yang mengalir pada CT1 dan CT2. Besar arus yang mengalir pada CT1 dan CT2 ketika terjadi gangguan di zona internal pada detik 0,20 yaitu 23,632 A dan 1,442 A. Dari hasil simulasi dapat dilihat bahwa pada saat terjadi gangguan dalam zona internal terjadi perbedaan arus yang terbaca oleh masing-masing CT. Gambar 4.7 (f) menunjukkan besar arus differensial pada saat terjadi gangguan internal yaitu

sebesar 21,592 A, nilai arus setting relai yaitu 0,058 A. Maka dari data tersebut dapat dilihat bahwa arus differensial melebihi batas dari *over current limit* pada penyetelan relai sehingga relai bekerja dan memerintahkan untuk trip pada CB, hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.7 (g).

Untuk nilai dari hasil simulasi dengan tiga variasi resistansi gangguan dapat dilihat selengkapnya pada Tabel 4.1 berikut :

Tabel 4.1 Hasil simulasi dan perfoma relai terhadap gangguan internal satu-fasa ke tanah (A-G)

R _f (Ohm)	Arus Transformator (kA)		Arus CT (A)		Arus Gangguan (kA)			Arus Diff (A)	Respon Relai
	Primer	Sekunder	CT1	CT2	Fase	Fase	Fase		
					-A	-B	-C		
2	69,768	0,437	23,632	1,422	10,778	0	0	24,205	Trip
10	66,939	0,460	22,687	1,611	10,105	0	0	22,976	Trip
20	64,657	0,460	20,844	1,527	9,181	0	0	22,976	Trip

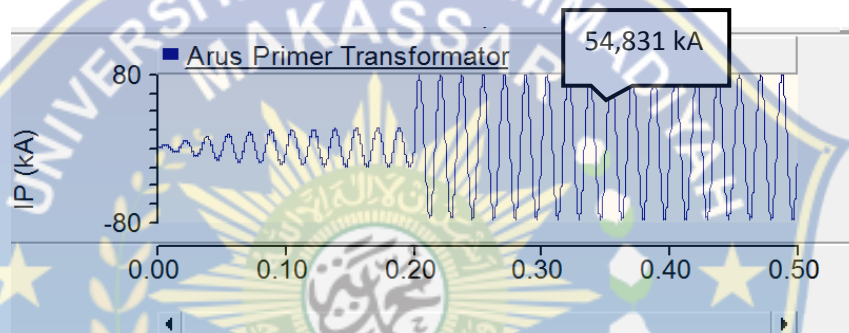
Tabel 4.1 menampilkan kerja dari relai untuk gangguan internal A-G dengan tiga variasi resistansi gangguan (R_f) yaitu 2, 10, dan 20 Ohm. Respon relai adalah trip untuk ketiga resistansi gangguan yang diberikan, yang berarti bahwa relai memberikan respon yang sangat baik terhadap gangguan yang terjadi.

Pada saat terjadi gangguan internal A-G untuk R_f 2 Ohm besar arus differensial adalah 24,205 A, R_f 10 Ohm besar arus differensial adalah 22,976 A, dan R_f 20 Ohm besar arus differensial adalah 22,976 A. Sementara nilai arus setting untuk relai adalah 0,058 A. Jadi arus differensial yang terjadi untuk gangguan internal A-G dengan resistansi gangguan 2, 10, dan 20 Ohm melewati

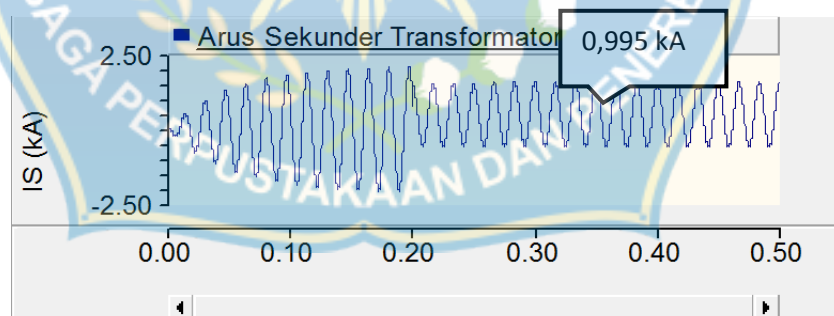
batas maksimum arus differensial atau arus setting pada relai sehingga relai mengirimkan signal untuk trip.

b. Gangguan dua-fase (AB)

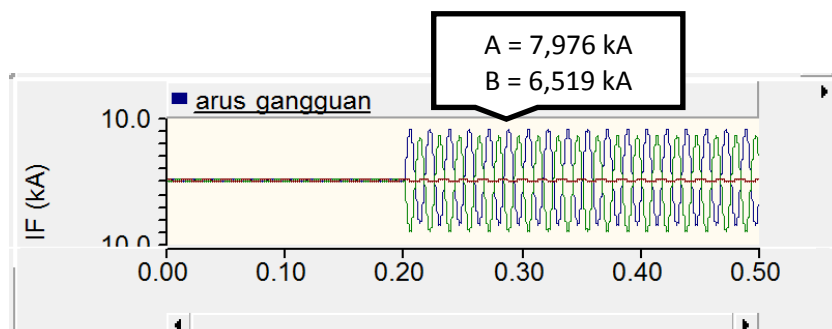
Gangguan divariasikan dengan tiga variasi reaktif gangguan (R_f) dari 2, 10 dan 20 Ohm. Gangguan di sistem terjadi pada detik 0,2. Bentuk gelombang hasil simulasi gangguan dua-fase dengan nilai R_f sebesar 2 Ohm keluaran dari *PSCAD* dapat dilihat pada Gambar 4.8 berikut :



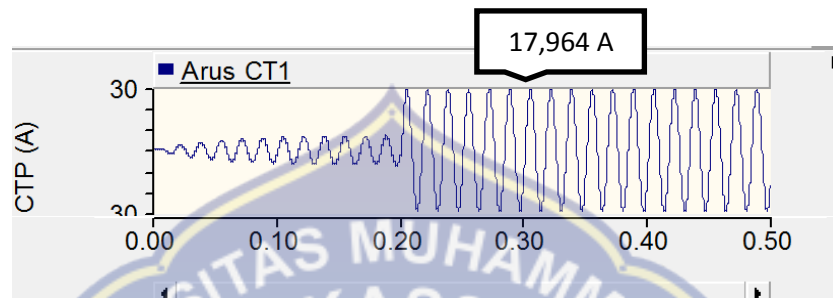
(a)



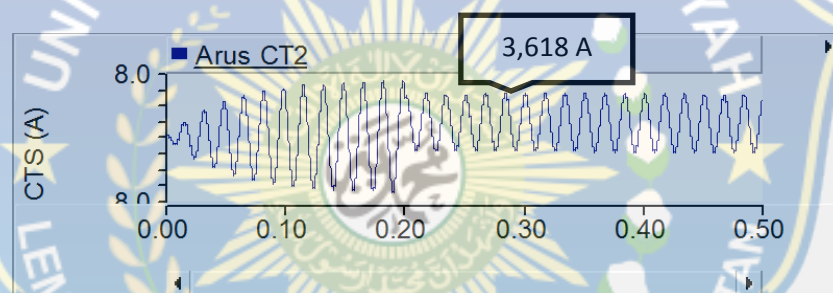
(b)



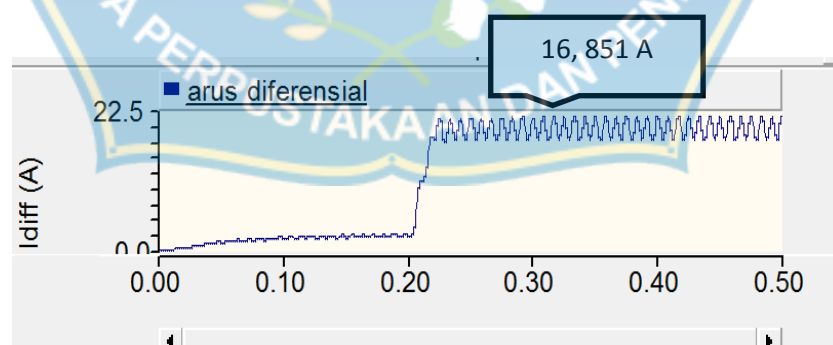
(c)



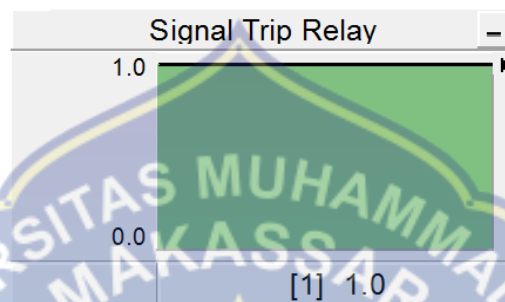
(d)



(e)



(f)



(g)

Gambar 4.8 Gelombang Arus Pada Gangguan Internal AB dengan $R_f = 2$ ohm (a) Arus Primer (b) Arus Sekunder (c) Arus Gangguan (d) arus CT1 (e) Arus CT2 (f) Arus Differensial (g) *Pick Up* Respon Relai

Hasil simulasi keluaran gelombang arus primer dan sekunder transformator dapat dilihat pada Gambar 4.8 (a) dan (b). Dari hasil simulasi dapat dilihat bahwa pada saat terjadi gangguan di zona internal yaitu pada detik 0,20 terjadi peningkatan nilai arus pada sisi primer transformator menjadi 54,831 kA, sedangkan pada sisi sekunder nilai arus yang mengalir ketika terjadi gangguan di zona internal pada detik 0,20 mengalami penurunan menjadi 0,995 kA. Dan besar arus gangguan yang terjadi ditunjukkan pada Gambar 4.8 (c) yaitu pada fase A sebesar 7,976 kA dan fase B sebesar 6,489 kA.

Gambar 4.8 (d) dan (e) menunjukkan besar arus yang mengalir pada CT1 dan CT2. Besar arus yang mengalir pada CT1 dan CT2 ketika terjadi gangguan di

zona internal pada detik 0,20 yaitu 17,964 A dan 3,618 A. Dari hasil simulasi dapat dilihat bahwa pada saat terjadi gangguan dalam zona internal terjadi perbedaan arus yang terbaca oleh masing-masing CT. Gambar 4.8 (f) menunjukkan besar arus differensial pada saat terjadi gangguan internal yaitu sebesar 17,270 A, nilai arus setting relai yaitu 0,058 A. Maka dari data tersebut dapat dilihat bahwa arus differensial melebihi batas dari *over current limit* pada penyetelan relai sehingga relai bekerja dan memerintahkan untuk trip pada CB, hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.8 (g).

Untuk nilai dari hasil simulasi dengan tiga variasi resistansi gangguan dapat dilihat selengkapnya pada Tabel 4.2 berikut :

Tabel 4.2 Hasil simulasi dan performa relai terhadap gangguan internal Dua-Fasa (AB)

Rf (Ohm)	Arus Transformator (kA)		Arus CT (A)		Arus Gangguan (kA)			Arus Diff (A)	Respon Relai
	Primer	Sekunder	CT1	CT2	Fase-A	Fase-B	Fase-C		
2	54,831	0,995	17,964	3,618	7,976	6,489	0	17,270	Trip
10	53,520	0,809	17,839	3,610	7,798	6,519	0	16,851	Trip
20	52,569	0,932	17,171	3,499	7,509	6,372	0	16,352	Trip

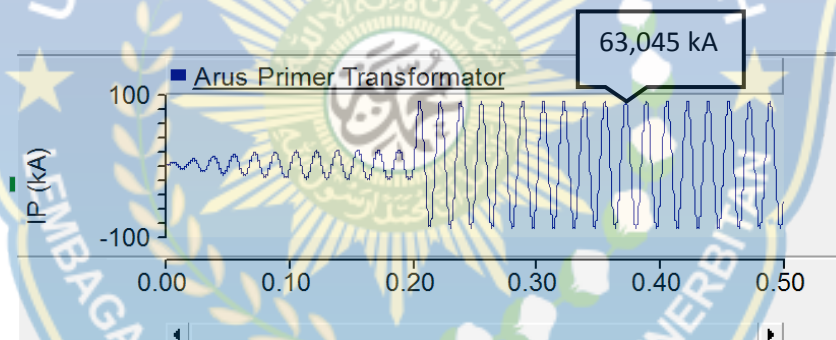
Tabel 4.2 menampilkan kerja dari relai untuk gangguan internal dua-fase (AB) dengan tiga variasi resistansi gangguan (R_f) yaitu 2, 10, dan 20 Ohm. Respon relai adalah trip untuk ketiga resistansi gangguan yang diberikan, yang berarti bahwa relai memberikan respon yang sangat baik terhadap gangguan yang terjadi.

Pada saat terjadi gangguan internal dua-fase (AB) untuk R_f 2 Ohm besar arus differensial adalah 17,270 A, R_f 10 Ohm besar arus differensial adalah

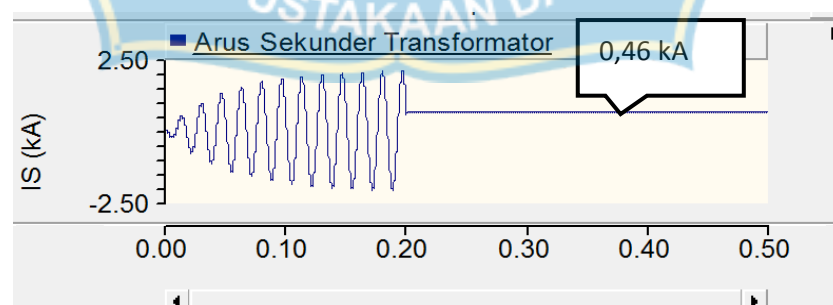
16,851 A, dan R_f 20 Ohm besar arus differensial adalah 16,352 A. Sementara nilai arus setting untuk relai adalah 0,058 A. Jadi arus differensial yang terjadi untuk gangguan internal dua-fase (AB) dengan resistansi gangguan 2, 10, dan 20 Ohm melewati batas maksimum arus differensial atau arus setting pada relai sehingga relai mengirimkan signal untuk trip.

c. Gangguan tiga-fase (ABC)

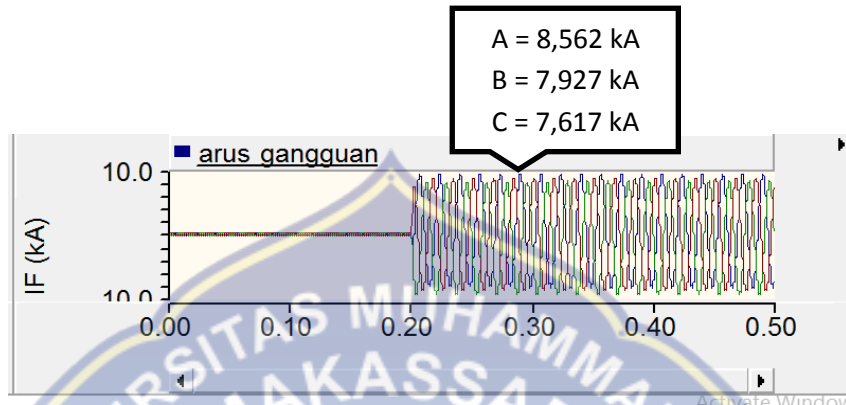
Gangguan divariasikan dengan tiga variasi reaktif gangguan (R_r) dari 2, 10 dan 20 Ohm. Gangguan di sistem terjadi pada detik 0,20. Bentuk gelombang hasil simulasi gangguan dua-fase dengan nilai R_f sebesar 2 Ohm keluaran dari *PSCAD* dapat dilihat pada Gambar 4.9 sebagai berikut:



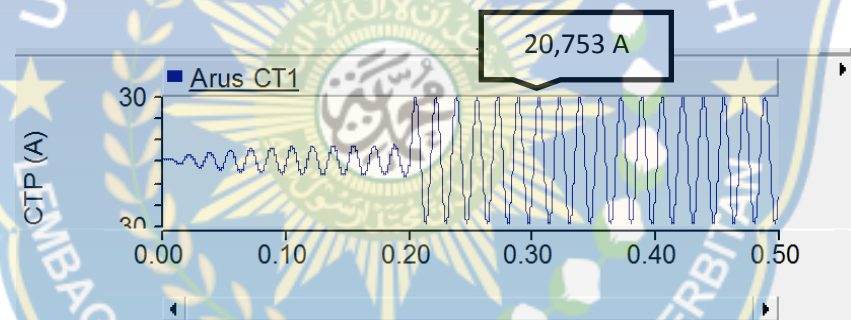
(a)



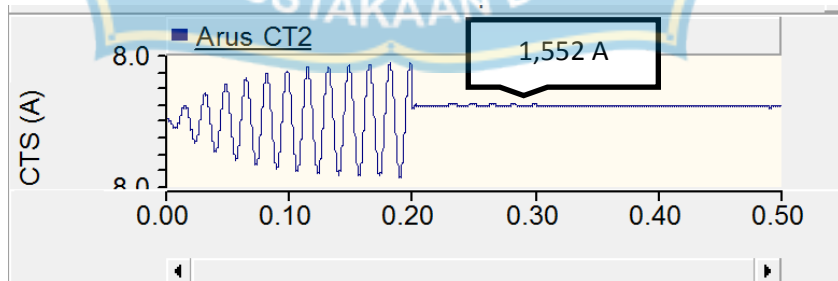
(b)



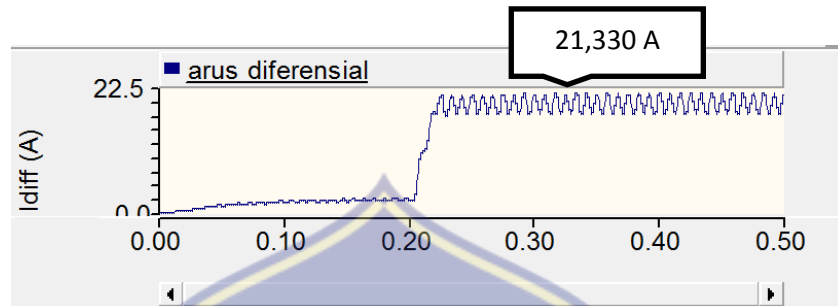
(c)



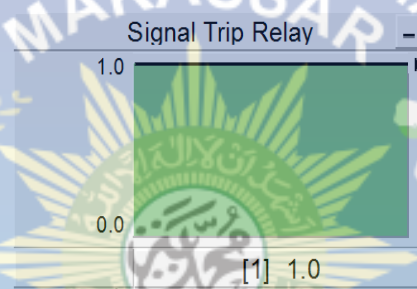
(d)



(e)



(f)



(g)

Gambar 4.9 Gelombang Arus Pada Gangguan Internal AB dengan $R_f = 2$ ohm (a) Arus Primer (b) Arus Sekunder (c) Arus Gangguan (d) arus CT1 (e) Arus CT2 (f) Arus Differensial (g) *Pick Up* Respon Relai

Hasil simulasi keluaran gelombang arus primer dan sekunder transformator dapat dilihat pada Gambar 4.9 (a) dan (b). Dari hasil simulasi dapat dilihat bahwa pada saat terjadi gangguan di zona internal yaitu pada detik 0,20 terjadi peningkatan nilai arus pada sisi primer transformator menjadi 63,045 kA, sedangkan pada sisi sekunder nilai arus yang mengalir ketika terjadi gangguan di zona internal pada detik 0,20 mengalami penurunan menjadi 0,460 kA. Dan besar arus gangguan yang terjadi ditunjukkan pada gambar 4.8 (c) yaitu pada fase A sebesar 8,562 kA, fase B sebesar 7,927 kA dan fase C sebesar 7,617 kA.

Gambar 4.9 (d) dan (e) menunjukkan besar arus yang mengalir pada CT1 dan CT2. Besar arus yang mengalir pada CT1 dan CT2 ketika terjadi gangguan pada zona internal didetik 0,20 yaitu 20,573 A dan 1,522 A. Dari hasil simulasi dapat dilihat bahwa pada saat terjadi gangguan dalam zona internal terjadi perbedaan arus yang terbaca oleh masing-masing CT. Gambar 4.9 (f) menunjukkan besar arus differensial pada saat terjadi gangguan internal yaitu sebesar 20,995 A, nilai arus setting relai yaitu 0,058 A. Maka dari data tersebut dapat dilihat bahwa arus differensial melebihi batas dari *over current limit* pada penyetelan relai sehingga relai bekerja dan memerintahkan untuk trip pada CB, hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.9 (g).

Untuk nilai dari hasil simulasi dengan tiga variasi resistansi gangguan dapat dilihat selengkapnya pada Tabel 4.3 berikut :

Tabel 4.3 Hasil simulasi dan performa relai terhadap gangguan internal Tiga-Fase (ABC)

Rf (Ohm)	Arus Transformator (kA)		Arus CT (A)		Arus Gangguan (kA)			Arus Diff (A)	Respon Relai
	Primer	Sekunder	CT1	CT2	Fase-A	Fase-B	Fase-C		
2	63,045	0,460	20,753	1,522	8,562	7,927	7,617	21,330	Trip
10	62,205	0,412	20,737	1,435	9,177	7,702	7,525	20,995	Trip
20	60,915	0,436	20,056	1,465	9,076	8,117	6,924	20,588	Trip

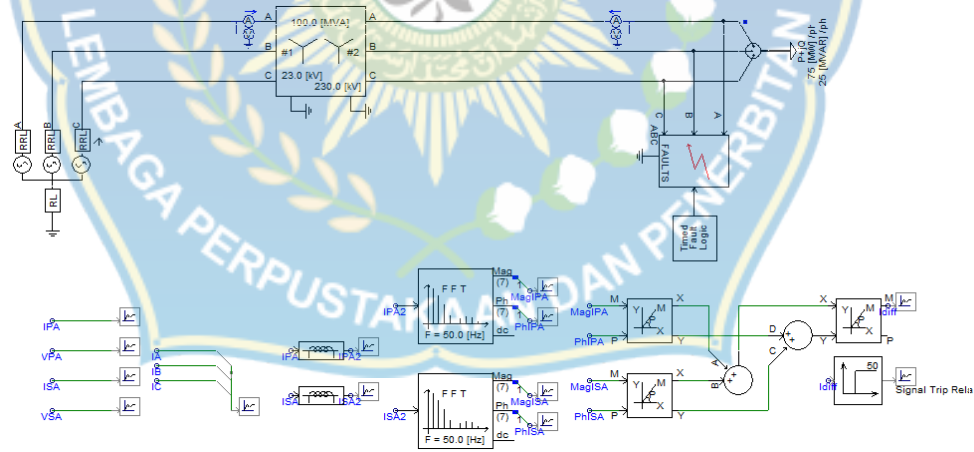
Tabel 4.3 menampilkan kerja dari relai untuk gangguan internal tiga-fase (ABC) dengan tiga variasi resistansi gangguan (R_f) yaitu 2, 10, dan 20 Ohm. Respon relai adalah trip untuk ketiga resistansi gangguan yang diberikan, yang

berarti bahwa relai memberikan respon yang sangat baik terhadap gangguan yang terjadi.

Pada saat terjadi gangguan internal tiga-fase (ABC) untuk R_f 2 Ohm besar arus differensial adalah 21,330 A, R_f 10 Ohm besar arus differensial adalah 20,995 A, dan R_f 20 Ohm besar arus differensial adalah 20,588 A. Sementara nilai arus setting untuk relai adalah 0,058 A. Jadi arus differensial yang terjadi untuk gangguan internal tiga-fase (ABC) dengan resistansi gangguan 2, 10, dan 20 Ohm melewati batas maksimum arus differensial atau arus setting pada relai sehingga relai mengirimkan signal untuk trip.

3. Jaringan Kondisi Gangguan Eksternal

Berikut model jaringan dalam kondisi gangguan eksternal :

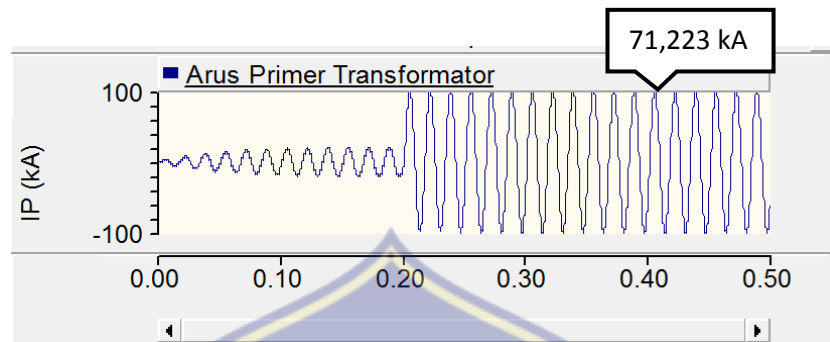


Gambar 4.10 Model Jaringan Kondisi Gangguan Eksternal

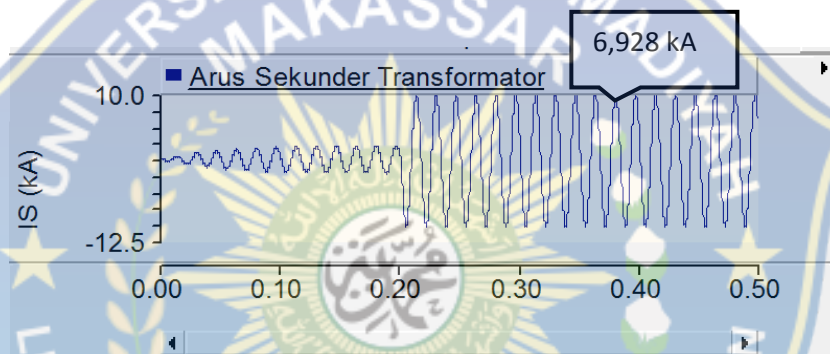
a. Gangguan fase ke tanah (A-G)

Gangguan divariasikan dengan tiga variasi reaktif gangguan (R_r) dari 2, 10 dan 20 Ohm. Gangguan di sistem terjadi pada detik 0,20. Bentuk gelombang hasil

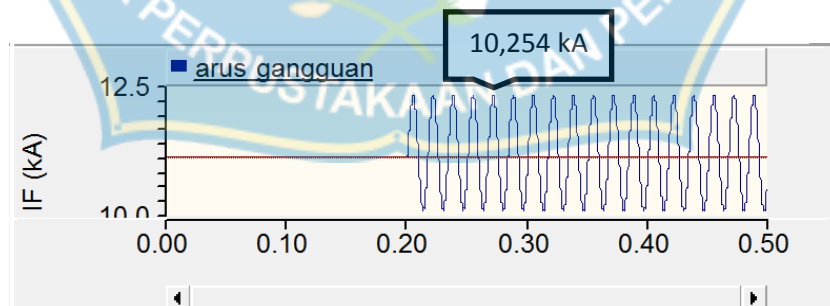
simulasi gangguan fase ke tanah (A-G) dengan nilai R_f sebesar 2 Ohm keluaran dari PSCAD di perlihatkan pada Gambar 4.11 :



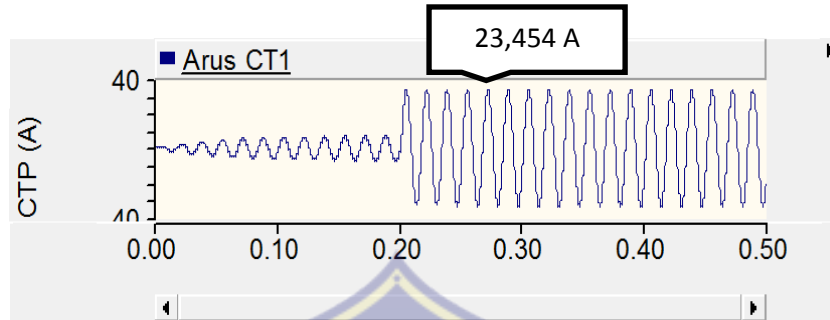
(a)



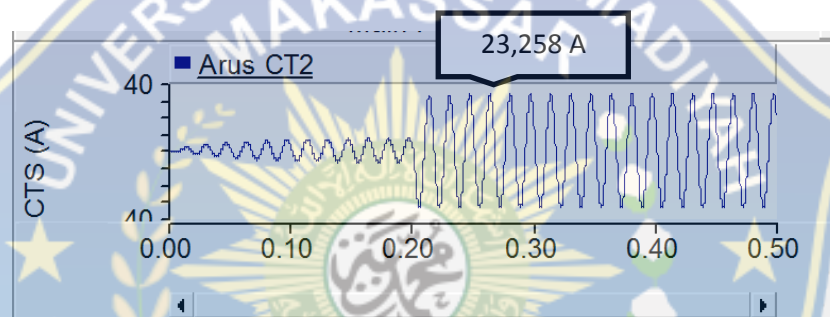
(b)



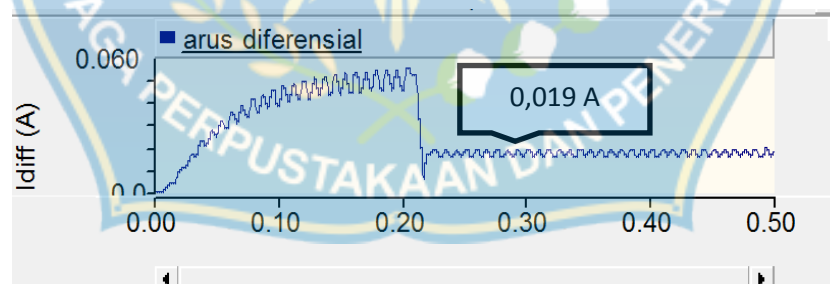
(c)



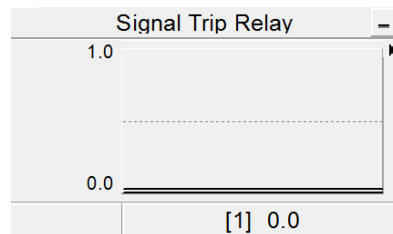
(d)



(e)



(f)



(g)

Gambar 4.11 Gelombang Arus Pada Gangguan Internal AB dengan $R_f = 2$ ohm (a) Arus Primer (b) Arus Sekunder (c) Arus Gangguan (d) arus CT1 (e) Arus CT2 (f) Arus Differensial (g) *Pick Up* Respon Relai

Hasil simulasi keluaran gelombang arus primer dan sekunder transformator dapat dilihat pada Gambar 4.11 (a) dan (b). Dari hasil simulasi dapat dilihat bahwa pada saat terjadi gangguan eksternal pada detik 0,20 terjadi kenaikan arus yang mengalir pada kedua sisi transformator. Pada sisi primer nilai arus yang mengalir sebesar 71,223 kA dan pada sisi sekunder sebesar 6,928 kA. Dan besar arus gangguan yang terjadi ditunjukkan pada Gambar 4.11 (c) yaitu pada fase-A sebesar 10,254 kA.

Gambar 4.11 (d) dan (e) menunjukkan besar arus yang mengalir pada CT1 dan CT2. Besar arus pada CT1 yaitu 23,454A dan besar arus pada CT2 yaitu 23,258A. Dari hasil simulasi dapat dilihat bahwa arus yang mengalir pada CT1 dan CT2 identik atau hampir sama sehingga menghasilkan arus differensial yang mendekati angka nol seperti yang ditunjukkan Gambar 4.11(f) yaitu 0,019 A dan nilai harus maksimum pada saat kondisi normal yaitu 0,058 A. Maka dari data tersebut dapat dilihat bahwa arus differensia tidak mencapai atau melebihi batas

dari *over current limit* pada penyetelan relai sehingga relai tidak bekerja dan tidak memerintahkan untuk trip pada CB, hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.11 (g).

Untuk nilai dari hasil simulasi dengan tiga variasi resistansi gangguan dapat dilihat selengkapnya pada Tabel 4.4 berikut :

Tabel 4.4 Hasil simulasi dan performa relai terhadap gangguan eksternal satu-fasa ke tanah (A-G)

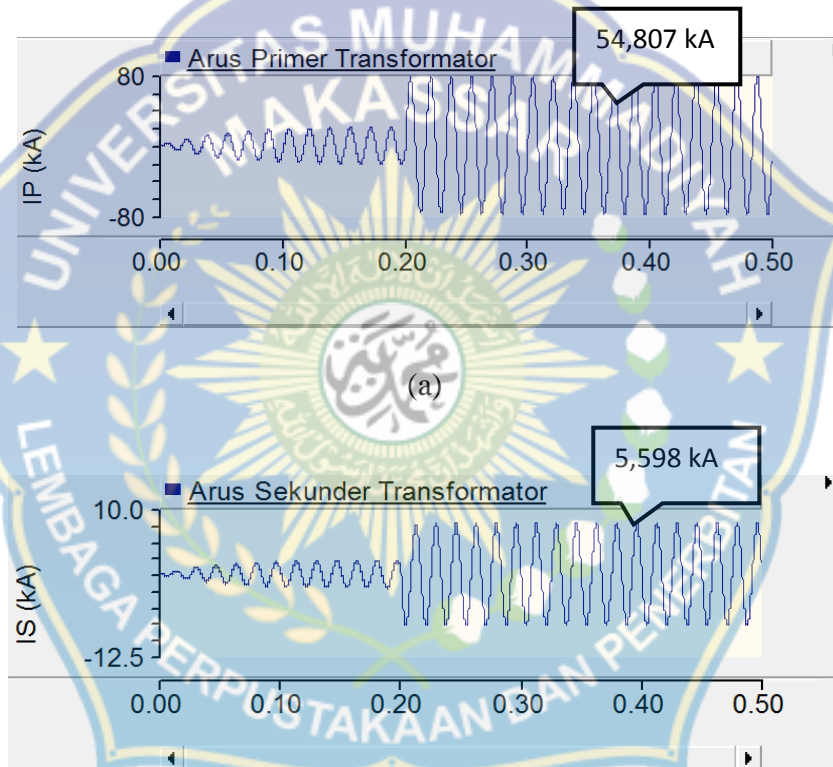
R _f (Ohm)	Arus Transformator (kA)		Arus CT (A)		Arus Gangguan (kA)			Arus Diff (A)	Respon Relai
	Primer	Sekunder	CT1	CT2	Fase-A	Fase-B	Fase-C		
2	71,223	6,928	23,454	23,258	10,254	0	0	0,019	Blok
10	68,666	6,771	22,888	22,647	10,106	0	0	0,019	Blok
20	65,091	6,515	21,502	21,389	9,418	0	0	0,019	Blok

Tabel 4.4 menampilkan kerja dari relai untuk gangguan eksternal fase ke tanah (A-G) dengan tiga variasi resistansi gangguan (R_f) yaitu 2, 10, dan 20 Ohm. Respon relai adalah signal blok untuk ketiga resistansi gangguan yang diberikan, yang berarti bahwa relai memberikan respon yang sangat baik terhadap gangguan yang terjadi diluar dari zona peganannya.

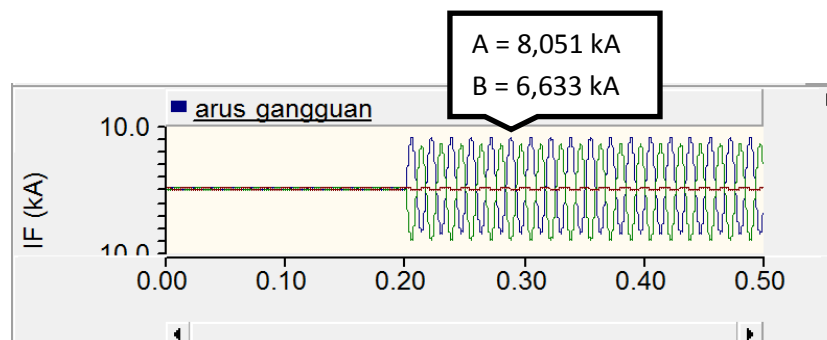
Pada saat terjadi gangguan eksternal fase ke tanah (A-G) untuk R_f 2 Ohm besar arus differensial adalah 0,019 A, R_f 10 Ohm besar arus differensial adalah 0,019 A, dan R_f 20 Ohm besar arus differensial adalah 0,019 A. Sementara nilai arus setting untuk relai adalah 0,058 A. Jadi arus differensial yang terjadi untuk gangguan eksternal fase ke tanah (A-G) dengan resistansi gangguan 2, 10, dan 20 Ohm tidak mencapai atau melewati batas maksimum arus differensial atau arus setting pada relai sehingga relai mengirimkan signal untuk blok.

b. Gangguan dua- fase AB

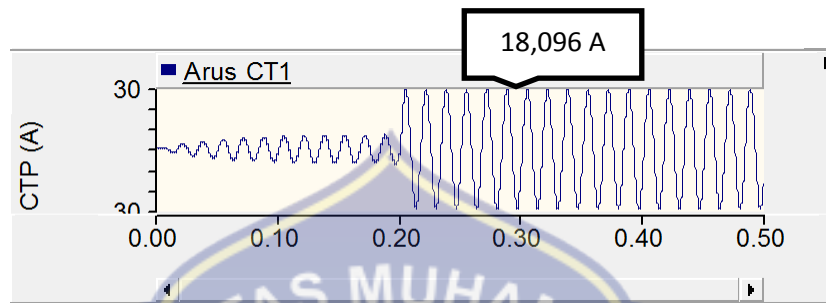
Gangguan divariasikan dengan tiga variasi reaktif gangguan (R_f) dari 2, 10 dan 20 Ohm. Gangguan di sistem terjadi pada detik 0,20. Bentuk gelombang hasil simulasi gangguan dua-fase dengan nilai R_f sebesar 2 Ohm keluaran dari *PSCAD* diperlihatkan pada Gambar 4.12:



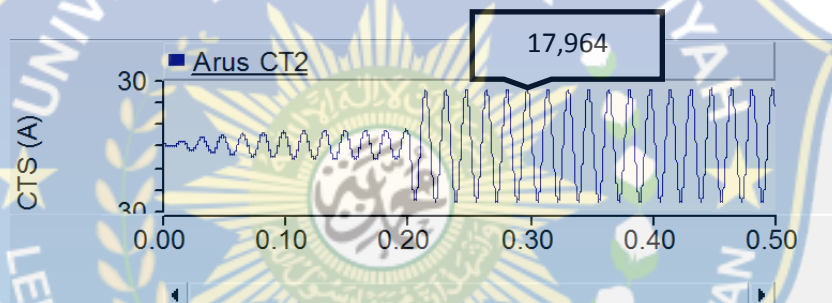
(b)



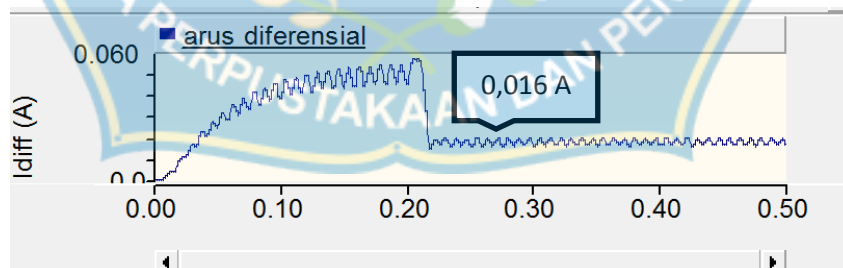
(c)



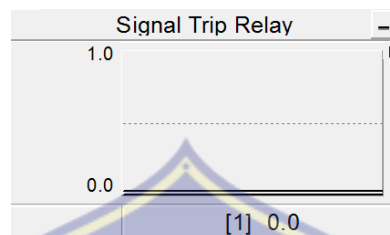
(d)



(e)



(f)



(g)

Gambar 4.12 Gelombang Arus Pada Gangguan Internal AB dengan $R_f = 2$ ohm (a) Arus Primer (b) Arus Sekunder (c) Arus Gangguan (d) arus CT1 (e) Arus CT2 (f) Arus Differensial (g) *Pick Up* Respon Relai

Hasil simulasi keluaran gelombang arus primer dan sekunder transformator dapat dilihat pada Gambar 4.12 (a) dan (b). Dari hasil simulasi dapat dilihat bahwa pada saat terjadi gangguan eksternal terjadi kenaikan arus yang mengalir pada kedua sisi transformator. Pada sisi primer nilai arus yang mengalir sebesar 54,807 kA dan pada sisi sekunder sebesar 5,598 kA. Dan besar arus gangguan yang terjadi ditunjukkan pada Gambar 4.12 (c) yaitu pada fase A sebesar 8,051 kA dan fase B sebesar 6,633 kA.

Gambar 4.12 (d) dan (e) menunjukkan besar arus yang mengalir pada CT1 dan CT2. Besar arus pada CT1 yaitu 18,096 A dan besar arus pada CT2 yaitu 17,964 A. Dari hasil simulasi dapat dilihat bahwa arus yang mengalir pada CT1 dan CT2 identik atau hampir sama sehingga menghasilkan arus differensial yang mendekati angka nol seperti yang ditunjukkan Gambar 4.12 (f), yaitu 0,019 A dan nilai harus maksimum pada saat kondisi normal yaitu 0,058 A. Maka dari data

tersebut dapat dilihat bahwa arus differensia tidak mencapai atau melebihi batas dari *over current limit* pada penyetelan relai sehingga relai tidak memerintahkan untuk trip pada CB, hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.12 (g).

Untuk nilai dari hasil simulasi dengan 3 variasi resistansi gangguan dapat dilihat selengkapnya pada Tabel 4.5 berikut :

Tabel 4.5 Hasil simulasi dan perfoma relai terhadap gangguan eksternal dua fase (AB)

Rf (Ohm)	Arus Transformator (kA)		Arus CT (A)		Arus Gangguan (kA)			Arus Diff (A)	Respon Relai
	Primer	Sekunder	CT1	CT2	Fase-A	Fase-B	Fase-C		
2	54,807	5,598	18,096	17,964	8,051	6,633	0	0,016	Blok
10	53,839	5,375	17,903	17,868	7,350	6,364	0	0,017	Blok
20	52,568	5,267	17,482	17,426	7,049	6,915	0	0,018	Blok

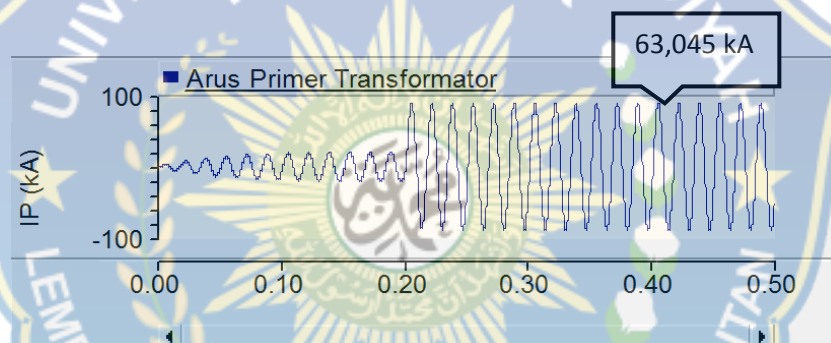
Tabel 4.5 menampilkan kerja dari relai untuk gangguan eksternal dua-fase (AB) dengan tiga variasi resistansi gangguan (R_f) yaitu 2, 10, dan 20 Ohm. Respon relai adalah signal blok untuk ketiga resistansi gangguan yang diberikan, yang berarti bahwa relai memberikan respon yang sangat baik terhadap gangguan yang terjadi diluar dari zona pengamanannya.

Pada saat terjadi gangguan eksternal dua-fase (AB) untuk R_f 2 Ohm besar arus differensial adalah 0,016 A, R_f 10 Ohm besar arus differensial adalah 0,017 A, dan R_f 20 Ohm besar arus differensial adalah 0,018 A. Sementara nilai arus setting untuk relai adalah 0,058 A. Jadi arus differensial yang terjadi untuk gangguan eksternal dua-fase(AB) dengan resistansi gangguan 2, 10, dan 20 Ohm

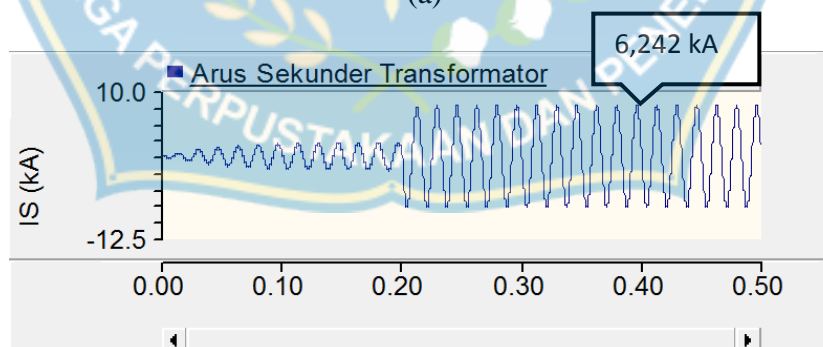
tidak mencapai atau melewati batas maksimum arus differensial atau arus setting pada relai sehingga relai mengirimkan signal untuk blok.

c. Gangguan tiga-fasa (ABC)

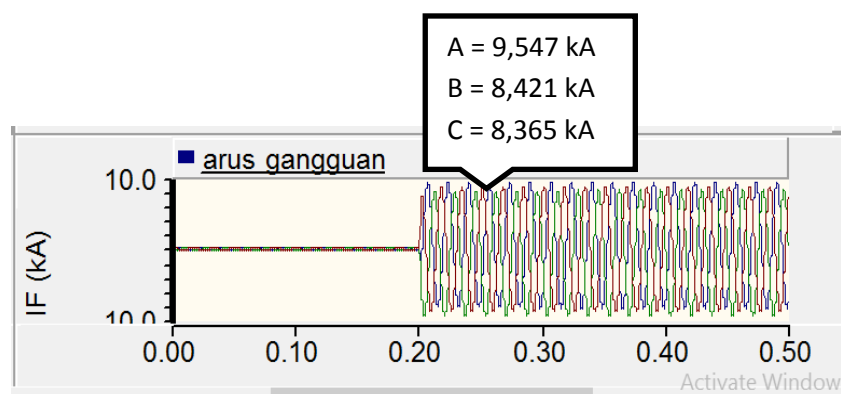
Gangguan divariasikan dengan tiga variasi reaktif gangguan (R_f) dari 2, 10 dan 20 Ohm. Gangguan di sistem terjadi pada detik 0,20. Bentuk gelombang hasil simulasi gangguan dua-fase dengan nilai R_f sebesar 2 Ohm keluaran dari PSCAD dapat dilihat pada Gambar 4.13 :



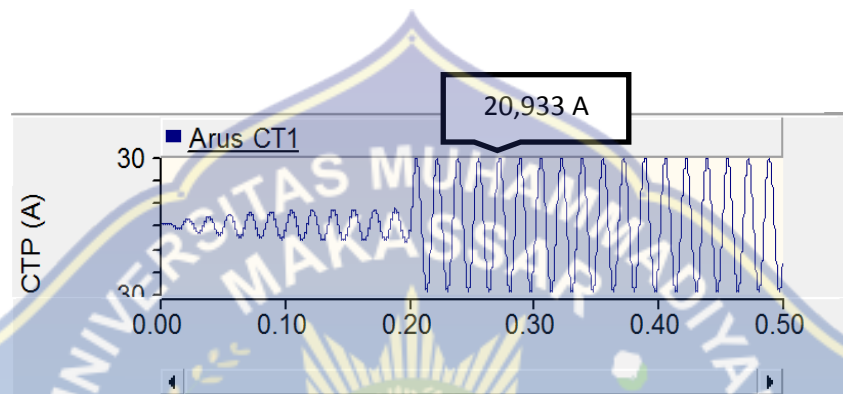
(a)



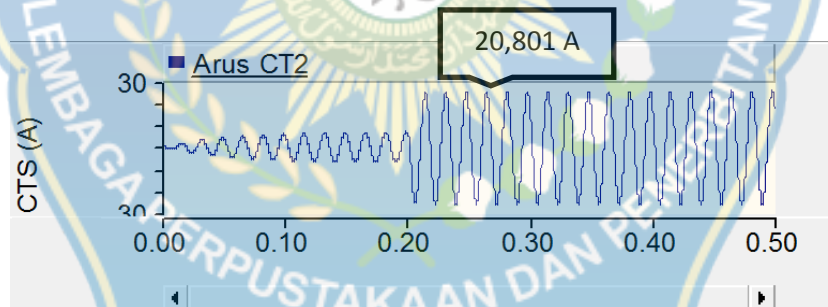
(b)



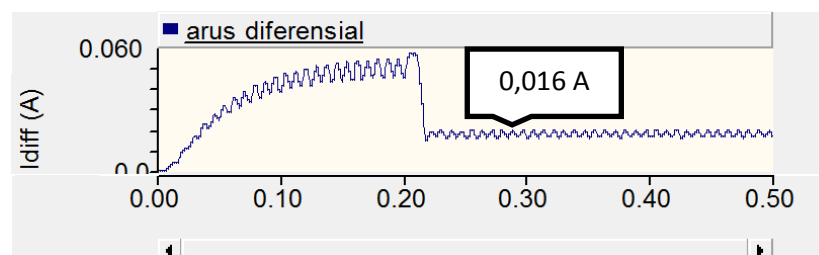
(c)



(d)



(e)



(f)



(g)

Gambar 4.13 Gelombang Arus Pada Gangguan Internal AB dengan $R_f = 2$ ohm (a) Arus Primer (b) Arus Sekunder (c) Arus Gangguan (d) arus CT1 (e) Arus CT2 (f) Arus Differensial (g) *Pick Up* Respon Relai

Hasil simulasi keluaran gelombang arus primer dan sekunder transformator dapat dilihat pada Gambar 4.13 (a) dan (b). Dari hasil simulasi dapat dilihat bahwa pada saat terjadi gangguan eksternal terjadi kenaikan arus yang mengalir pada kedua sisi transformator. Pada sisi primer nilai arus yang mengalir sebesar 63,045 kA dan pada sisi sekunder sebesar 6,242 kA. Dan besar arus gangguan yang terjadi ditunjukkan pada Gambar 4.13 (c) yaitu pada fase A sebesar 9,547 kA, fase B sebesar 8,421 kA dan fase C sebesar 8,365 kA.

Gambar 4.13 (d) dan (e) menunjukkan besar arus yang mengalir pada CT1 dan CT2. Besar arus pada CT1 yaitu 20,933 A dan besar arus pada CT2 yaitu 20,801 A. Dari hasil simulasi dapat dilihat bahwa arus yang mengalir pada CT1

dan CT2 identik atau hampir sama sehingga menghasilkan arus differensial yang mendekati angka 0 seperti yang ditunjukkan Gambar 4.13 (f), yaitu 0,016 A dan nilai harus maksimum pada saat kondisi normal yaitu 0,058 A. Maka dari data tersebut dapat dilihat bahwa arus differensia tidak mencapai atau melebihi batas dari *over current limit* pada penyetelan relai sehingga relai tidak memerintahkan untuk trip pada CB, hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.13 (g).

Untuk nilai dari hasil simulasi dengan 3 variasi resistansi gangguan dapat dilihat selengkapnya pada Tabel 4.6 berikut :

Tabel 4.6 Hasil simulasi dan perfoma relai terhadap gangguan eksternal tiga-fase (ABC)

Rf (Ohm)	Arus Transformator (kA)		Arus CT (A)		Arus Gangguan (kA)			Arus Diff (A)	Respon Relai
	Primer	Sekunder	CT1	CT2	Fase- A	Fase- B	Fase- C		
2	63,045	6,242	20,933	20,801	9,547	8,421	8,365	0,016	Blok
10	62,042	6,186	20,679	20,591	9,377	6,964	3,528	0,016	Blok
20	61,210	6,099	20,308	20,259	9,076	8,117	8,121	0,016	Blok

Tabel 4.5 menampilkan kerja dari relai untuk gangguan eksternal tiga-fase (ABC) dengan tiga variasi resistansi gangguan (R_f) yaitu 2, 10, dan 20 Ohm. Respon relai adalah signal blok untuk ketiga resistansi gangguan yang diberikan, yang berarti bahwa relai memberikan respon yang sangat baik terhadap gangguan yang terjadi diluar dari zona pengamanannya.

Pada saat terjadi gangguan eksternal tiga-fase (ABC) untuk R_f 2 Ohm besar arus differensial adalah 0,016 A, R_f 10 Ohm besar arus differensial adalah 0,016 A, dan R_f 20 Ohm besar arus differensial adalah 0,016 A. Sementara nilai arus

setting untuk relai adalah 0,058 A. Jadi arus differensial yang terjadi untuk gangguan eksternal tiga-fase(ABC) dengan resistansi gangguan 2, 10, dan 20 Ohm tidak mencapai atau melewati batas maksimum arus differensial atau arus setting pada relai sehingga relai mengirimkan signal untuk blok.



BAB V

PENUTUP

A. KESIMPULAN

Dari hasil simulasi dan pembahasan maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Model telah berhasil direalisasikan dengan komponen-komponen seperti komponen sumber 3 fase, Multimeter, *line* transmisi, *Current Transformator*(CT), *FFT*, *Sum/Diffjunction*, kanal *output*, *Polar rectangular coordinate converter*, *Over current detection blok* dan gangguan 3 fase. Dari komponen tersebut di buatlah 3 bentuk modul proteksi transformator menggunakan Relai Differensial yaitu; model keadaan normal, gangguan *internal* dan gangguan *eksternal*.
2. Pada saat gangguan terjadi di zona proteksi, yaitu zona internal relai differensial memberikan signal trip. Pada saat gangguan terjadi di luar zona proteksi, yaitu zona eksternal relai differensial tidak memberikan signal trip. Relay differensial dapat dikatakan selektif, karena bekerja sesuai dengan tugasnya, yaitu mendeteksi gangguan pada zona proteksi.

B. SARAN

Dikarenakan keterbatasan versi PSCAD/EMTDC yang digunakan dalam penelitian ini, maka diharapkan untuk pemodelan Relai Diferensial yang lebih

komplit seperti pembuatan rangkaian lengkap dengan *circuit breaker* sebaiknya menggunakan versi PSCAD/EMTDC yang lebih tinggi (*full version*) karena versi PSCAD/EMTDC yang digunakan pada penelitian ini hanya terbatas 15 komponen.



DAFTAR PUSTAKA

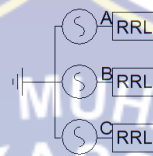
- Baharuddin dan Ridwan Kurniawan. 2012. *Setting Relai Differensial Pada Transformator Daya 150/20 KV Di Gardu Induk Menez*. Prosiding SNPPTI, 2086-2156. Retrieved from <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=http://digilib.mercubuana.ac.id/manager/t!%40file>
- Firdaus, Hari dan Azriyenni Azhari Zakri. 2018. *Pemodelan Relai Diferensial Pada Transormator Daya 25 MVA Menggunakan Anvis*. Jom FTEKNIK. Volume 5, 1 Januari – Juni 2018
- Harrison. 1996. *The Essence Of Electric Power Systems*.
- Mason, C. Rulles. 1979. *The Art and Science of Protective Relaying*.
- Muller, Craig. P. Eng. *On the use of PSCAD (Power Sistem Computers Aided Design)*, Research Centre ,Winnipeg,Manitoba, Canada.
- Kadir, Abdul. 1989. *Transformator*. Jakarta : Gramedia
- Panjaitan, Bonar. 2012. *Praktik-praktik Proteksi Sistem Tenaga Listrik*. Yogyakarta : Andi Yogyakarta
- Stevenson. W. D. Jr. 1990. *Analisis Sistem Tenaga Listrik, Edisi Keempat* . Penerbit Erlangga : Jakarta
- Sultan. A.R, Mustafa. M.W.,Saini M, 2012. *Ground Fault Currents in Unit Generator Transformer Various NGR and Transformer Configuration*. Symposium on Industrial Electronics and Aplication.1-6
- Syukriyadin, Syahrizal, dan Cut Rizky Nakhrisya. 2011. *Analisis Proteksi Relay Differensial Terhadap Gangguan Internal dan Eksternal Transformator Menggunakan PSCAD/EMTDC*. Jurnal Rekayasa ElektriKa. Vol. 9, No.3, April 2011
- Taqiyyuddin Muhammad Alawiy, 2006. *Proteksi Sistem Tenaga Listrik Seri Relay Elektromagnetis*, Universitas Islam Malang.
- Vishwakarma D. N., Ram Badri, 1995. *Power Sisyem Protection And Swicgear*, Tata McGraw-Hill, New Delhi.



LAMPIRAN A

Komponen-komponen yang digunakan dalam pemodelan rangkaian simulasi gangguan pada PSCAD, antara lain:

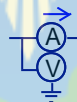
1. *Tree-Phase Voltage Shource Model 2*



Gambar A.1 Bentuk kompenen Sumber Tiga-Fasa

Theree-Phase voltage source model 2 adalah komponen yang memberikan input tegangan (kV), frekuensi (Hz) dan tipe impedansi yang diinginkan.

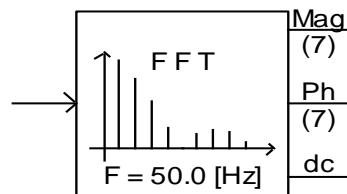
2. **Multimeter**



Gambar A.2 Bentuk komponen multimeter

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

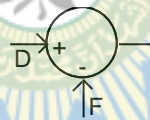
3. *On-Line Frekuensi Scanner*



Gambar A.3 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 dan Θ) dimana nilai I adalah magnitudo dan Θ adalah sudut fase.

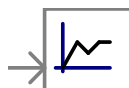
4. *Summing/difference Junction*



Gambar A.4 Bentuk komponen/Diffjunction

Summing/Diffrence Junction adalah sebuah komponen yang dapat menjumlahkan atau mengurangi nilai yang di inginkan.

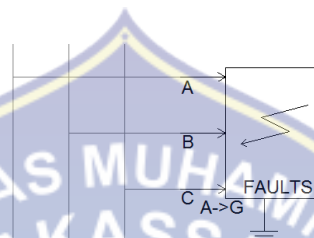
5. *Output Chanel*



Gambar A.5 bentuk komponen Output Channel

Output Channel adalah suatu komponen yang berfungsi keluaran sinyal dari sebuah simulasi, keluaran yang berupa kurva atau grafik, polimeter ,meter, dan laian-lain.

6. *Three-Phase Fault*



Gambar A.6 Bentuk komponen gangguan jaringan tiga fasa

Komponen ini digunakan untuk menghasilkan kesalahan pada sirkuit AC tiga fasa. Tersedia kesalahan *line-to-line* serta *line-to-neutral* dan nama variabel saat ini kesalahan dapat ditentukan dalam setiap fase dan diminimalkan melalui saluran output jika diinginkan.

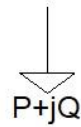
7. *Time Fault Logic*



Gambar A.7 Bentuk komponen Fault Logic

Timed Fault Logic adalah komponen yang berfungsi untuk pengaturan waktu gangguan. Waktu yang di ataur berupa saat mulai gnagguan (apply fault),dan lama waktu terjadi gangguan (Duration fault)

8. *Fixed Load*



Gambar A.8 bentuk komponen Fixed Load

Komponen ini memodelkan karakteristik beban sebagai fungsi dari besarnya tegangan dan frekuensi, di mana beban nyata dan daya reaktif kami dipertimbangkan secara terpisah.

9. *Signal Name*

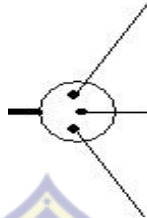
SignalName

Gambar A.9 Bentuk komponen Signal Name

Label Data dapat digunakan untuk menetapkan nama sinyal ke Kawat yang membawa sinyal data. Jika **Nama Sinyal Data** input cocok dengan nama sinyal data lain dalam Modul Halaman yang sama (atau halaman utama), kedua sinyal ini dianggap terhubung bersama.

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

10. Three Phase to SLD Electrical Wire Converter (Split Single Line to 3 Phases)



Gambar A.10 Bentuk komponen Slip Single Line to 3 Phase

Komponen ini dapat digunakan untuk membagi sinyal listrik 3-fase (yaitu dalam tampilan garis tunggal) menjadi tiga sinyal listrik satu-fase yang terpisah. Tentu saja, itu juga dapat digunakan untuk melakukan kebalikannya, yaitu menggabungkan tiga sinyal listrik fase tunggal yang terpisah menjadi sinyal listrik 3 fase (single-line).

11. Marges Data Signal Into an Array

Gambar A.11 bentuk komponen Marges Data Signal Into an Array

Komponen ini menggabungkan hingga 12 sinyal skalar individu ke dalam array satu dimensi (data vektor).

Semua sinyal yang terhubung ke terminal input dikonversi ke tipe output yang dipilih. Nilai input INTEGER dikonversi ke tipe REAL dan nilai input

REAL dikonversi ke integer terdekat menggunakan fungsi Fortran NINT. Konversi input LOGICAL ke tipe REAL atau INTEGER tidak dilakukan secara otomatis. Jika input dari tipe yang berbeda, gunakan komponen Konversi Jenis untuk mengonversikannya terlebih dahulu dengan tipe yang diperlukan, dan kemudian menggabungkannya.

12. Datatape



Gambar A.12 bentuk komponen Datatape

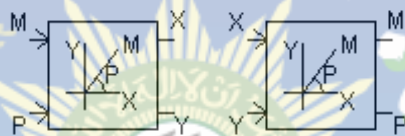
Kabel adalah garis grafis yang digunakan untuk menghubungkan Mesin Virtual komponen bersama-sama pada kanvas Sirkuit PSCAD. Sebuah kawat dapat membawa sinyal listrik, dalam hal ini bertindak untuk menghubungkan node secara elektrik. Kawat juga dapat digunakan sebagai jalur sinyal data, di mana koneksi antara dua titik data memaksa titik yang terhubung sama satu sama lain. Kabel dapat ditambahkan secara manual ke kanvas seperti yang dijelaskan dalam Menambahkan Komponen ke Proyek dan Menghubungkan Komponen Bersama, atau ditarik menggunakan Mode Kawat.

Kawat adalah 'komponen yang dapat diregangkan', yaitu panjangnya dapat diubah agar sesuai dengan penggunaan yang diperlukan. Kabel dapat dihubungkan bersama dengan memastikan bahwa titik akhir dari salah satu kabel yang bergabung menyentuh bagian mana pun dari kabel lainnya. Kabel dapat

dilintasi (atau tumpang tindih) tanpa koneksi, selama titik akhir maupun simpul tidak menyentuh Kawat lainnya. Kabel juga dapat terdiri dari beberapa segmen ortogonal, di mana seluruh kawat dapat dimanipulasi secara keseluruhan.

Baik sinyal listrik dan data yang dibawa oleh kawat bisa multi-dimensi, yaitu sinyal dapat dilewatkan sebagai array (vektor). PSCAD akan secara otomatis mendeteksi jenis sinyal apa yang akan dilewatkan, serta dimensi titik-titik di mana Kawat terhubung.

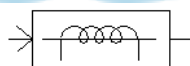
13. *Polar/rectangular coordinat converter*



Gambar A.13 Bentuk komponen konverter polar-rektanguler dan rektanguler-polar

Komponen ini berfungsi untuk mengkonversi nilai polar ke nilai rektanguler dan sebaliknya.

14. *Current Transformer*

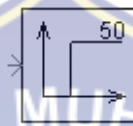


Gambar A.14 Bentuk komponen CT

Komponen ini memodelkan transformator arus yang didasarkan pada teori jiles-atherthon histeresis remenance ferromagnetik. Efek saturasi, histeresis remenance, dan pembentukan minor loop dimodelkan berdasarkan fisika material

magnetik. Arus primer terukur (dalam kA) adalah input ke model dan output adalah arus sekunder (dalam A) melalui relai.

15. Over Current Detector



Gambar A.15 Gambar komponen detektor arus lebih

Komponen ini secara terus-menerus memeriksa apakah sinyal input melebihi batas yang ditentukan saat ini atau tidak. Ini dapat dikonfigurasi untuk memproses sinyal input sebelum cheks diterapkan: jika input yang diproses melebihi ambang batas untuk waktu tunda yang ditentukan, komponen akan menghasilkan output 1 (jika tidak 0).



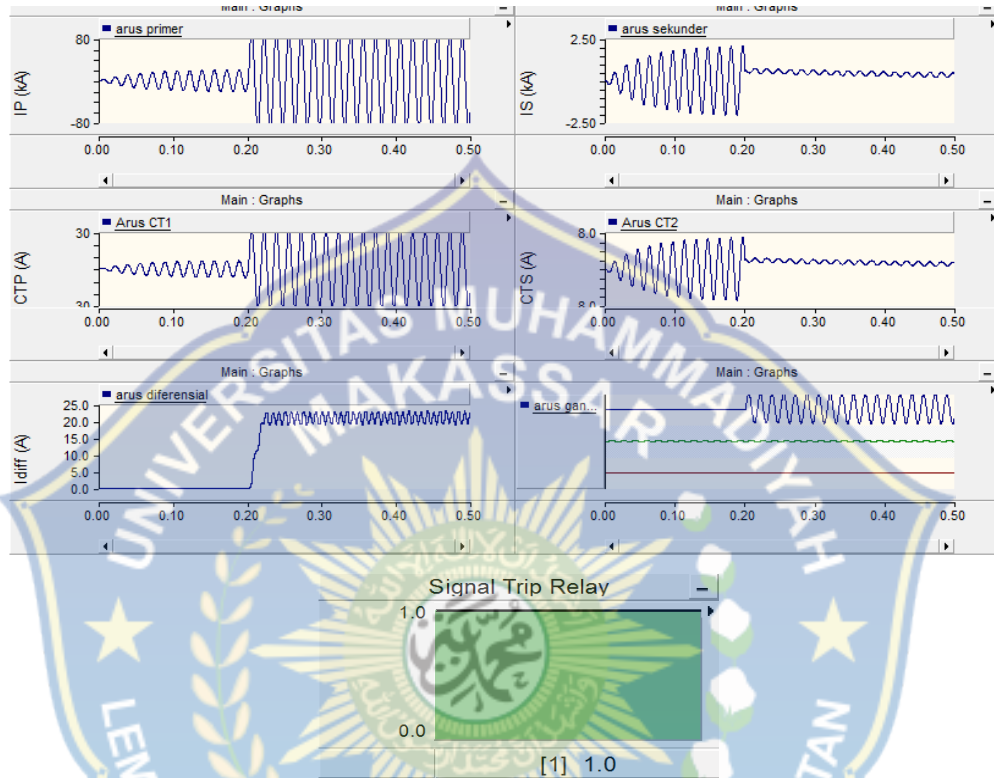
LAMPIRAN B

GRAFIK KELUARAN SIMULASI

UNTUK GANGGUAN INTERNAL DAN EKSTERNAL

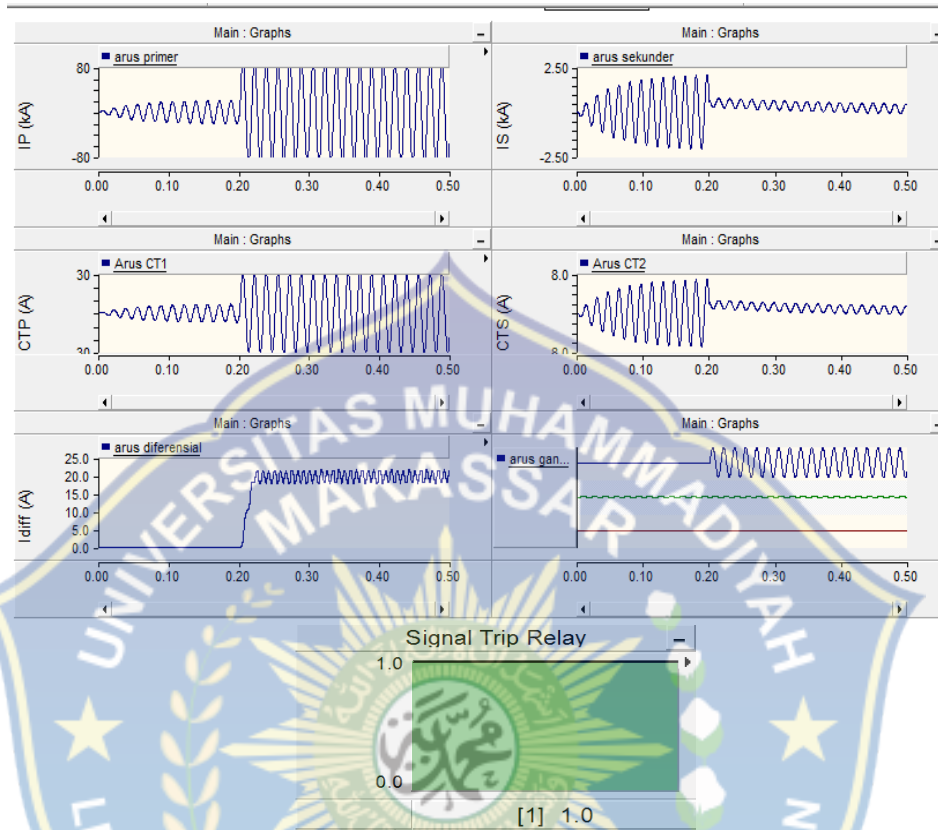
Lampiran B.1 Gangguan Internal Satu Fasa Ke Tanah

➤ Resistansi gangguan 10 Ohm



Gambar B1.1 Gelombang Arus Pada Gangguan Internal A-G dengan $R_f = 10$ ohm

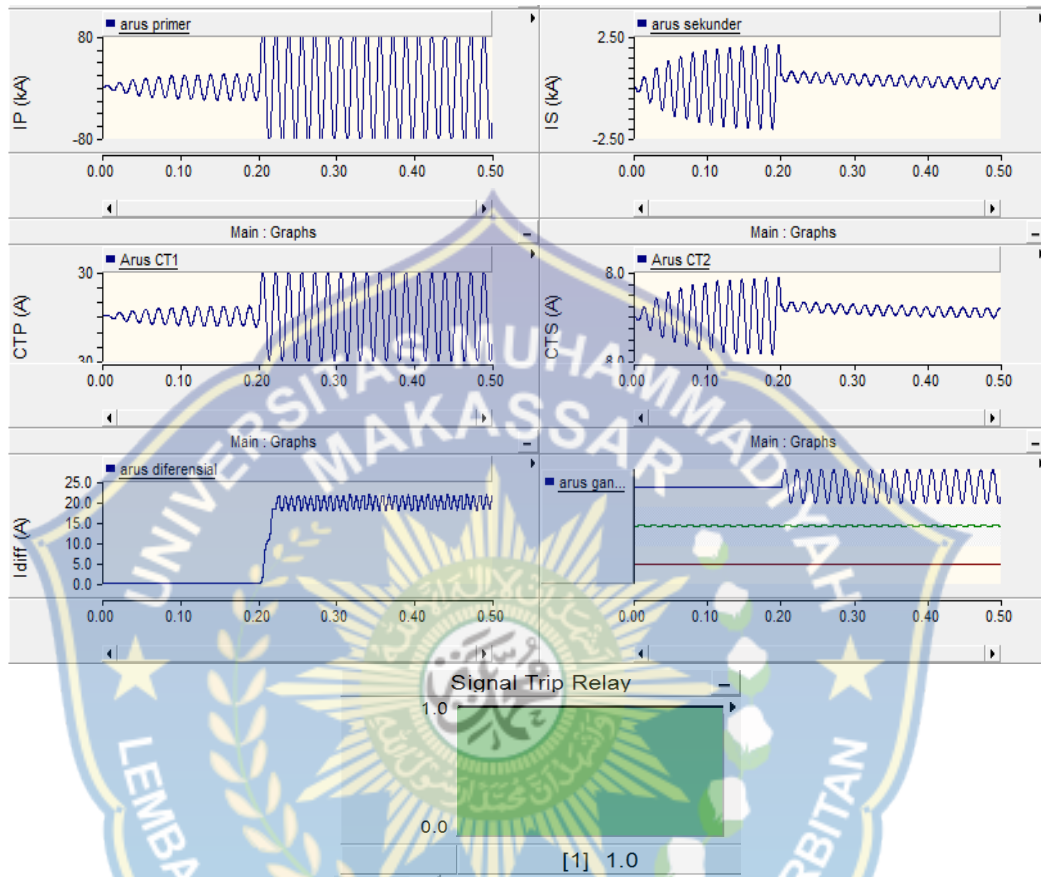
➤ **Resistansi gangguan 20 Ohm**



Gambar B1.2 Gelombang Arus Pada Gangguan Internal A-G dengan $R_f = 20$ ohm

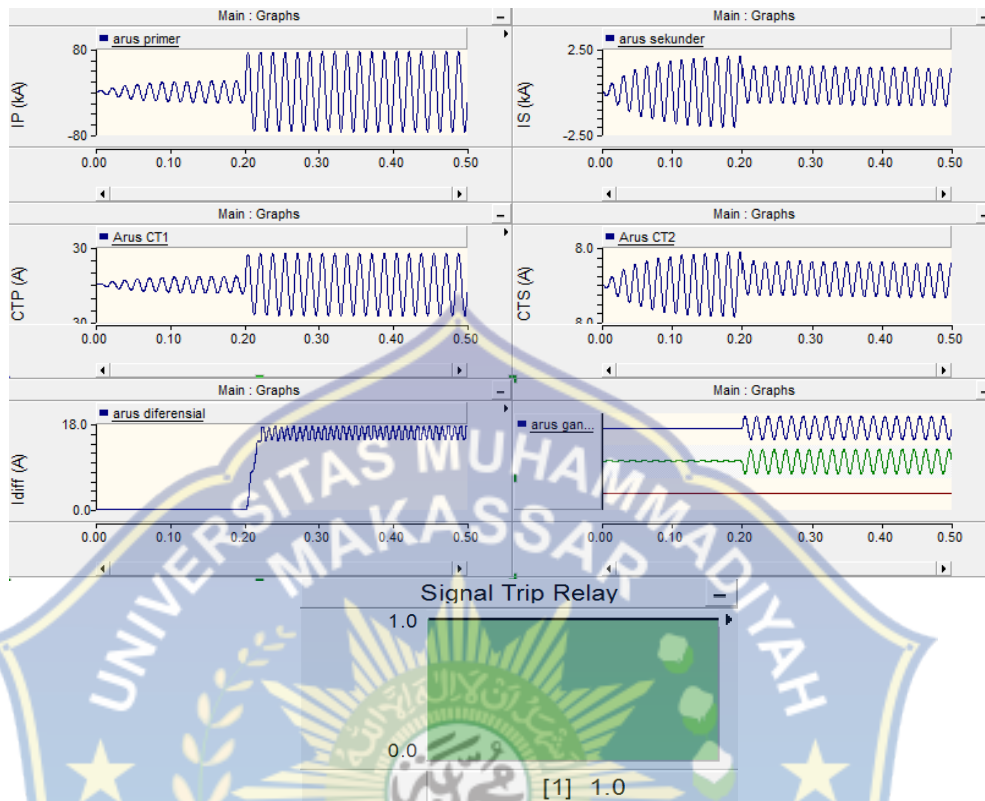
Lampiran B2 Gangguan Internal Dua-Fase (AB)

➤ Resistansi gangguan 10 Ohm



Gambar B2.1 Gelombang Arus Pada Gangguan Internal AB dengan $R_f = 10$ ohm

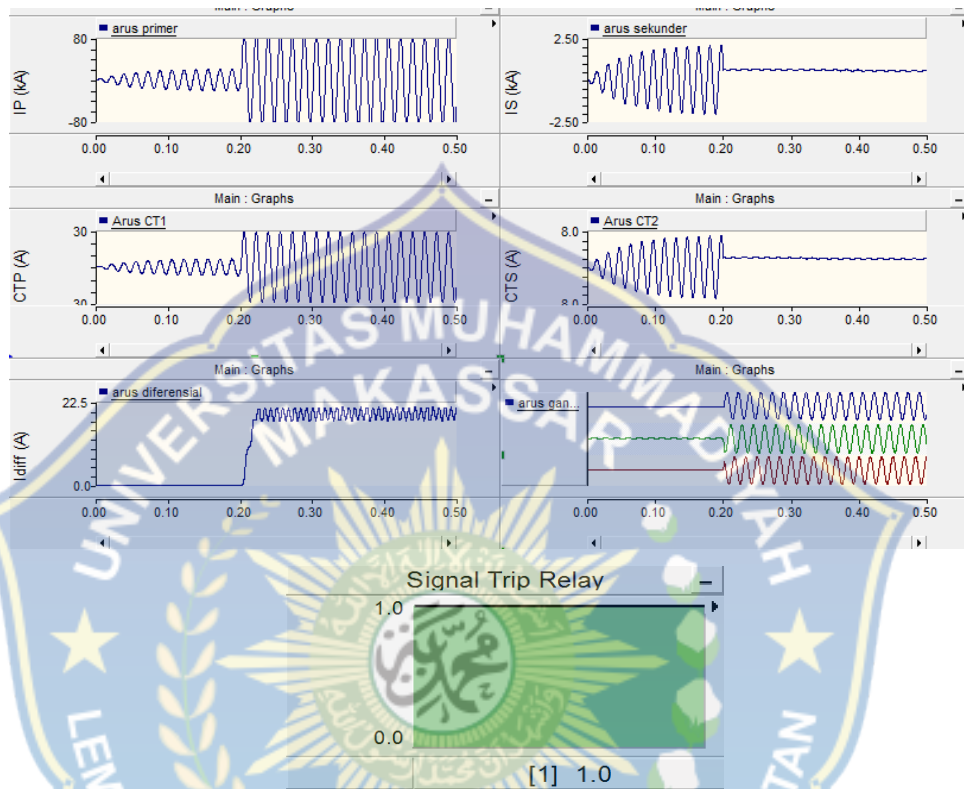
➤ **Resistansi gangguan 20 Ohm**



Gambar B2.2 Gelombang Arus Pada Gangguan Internal AB dengan $R_f = 20$ ohm

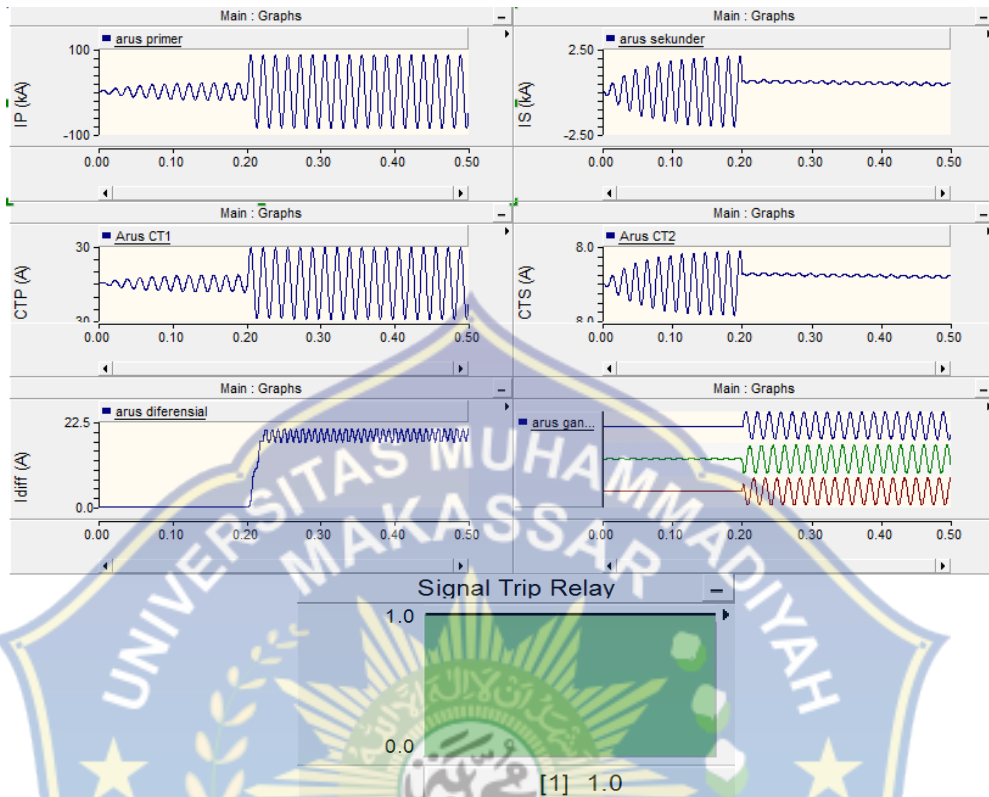
Lampiran B3 Gangguan Internal Tiga-Fase (ABC)

➤ Resistansi gangguan 10 Ohm



Gambar B3.1 Gelombang Arus Pada Gangguan Internal ABC dengan $R_f = 10$ ohm

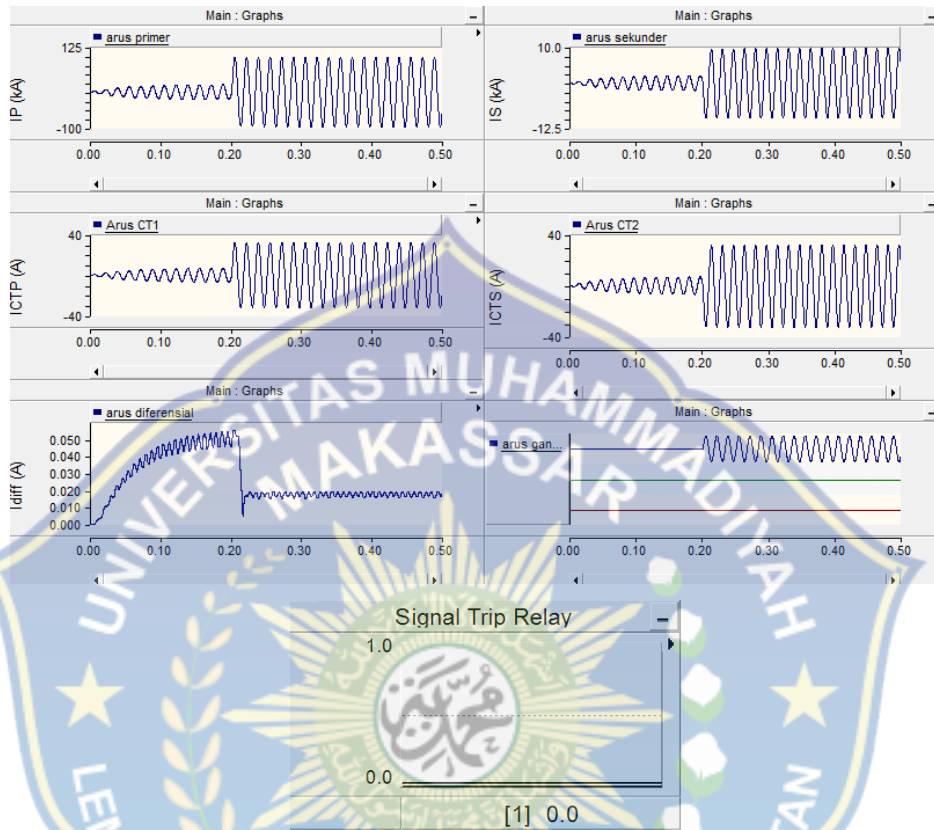
➤ **Resistansi gangguan 10 Ohm**



Gambar B3.2 Gelombang Arus Pada Gangguan Internal ABC dengan $R_f = 10$ ohm

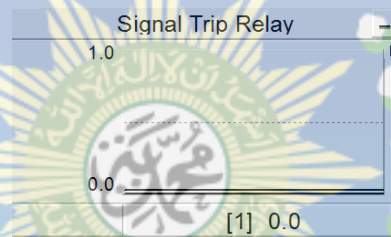
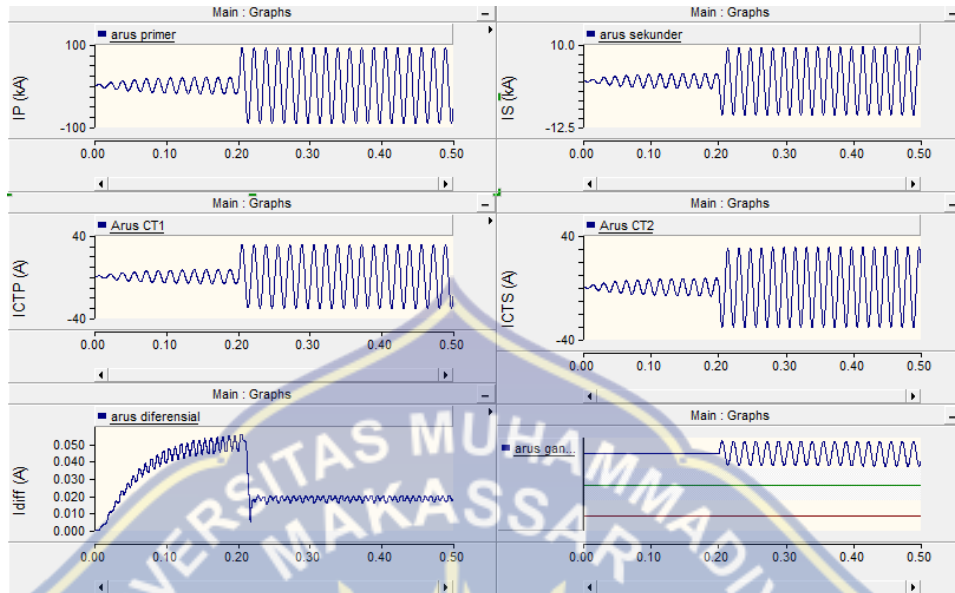
Lampiran B4 Gangguan External A-G

➤ Resistansi gangguan 10 Ohm



Gambar B4.1 Gelombang Arus Pada Gangguan Eksternal A-G dengan $R_f = 10$ ohm

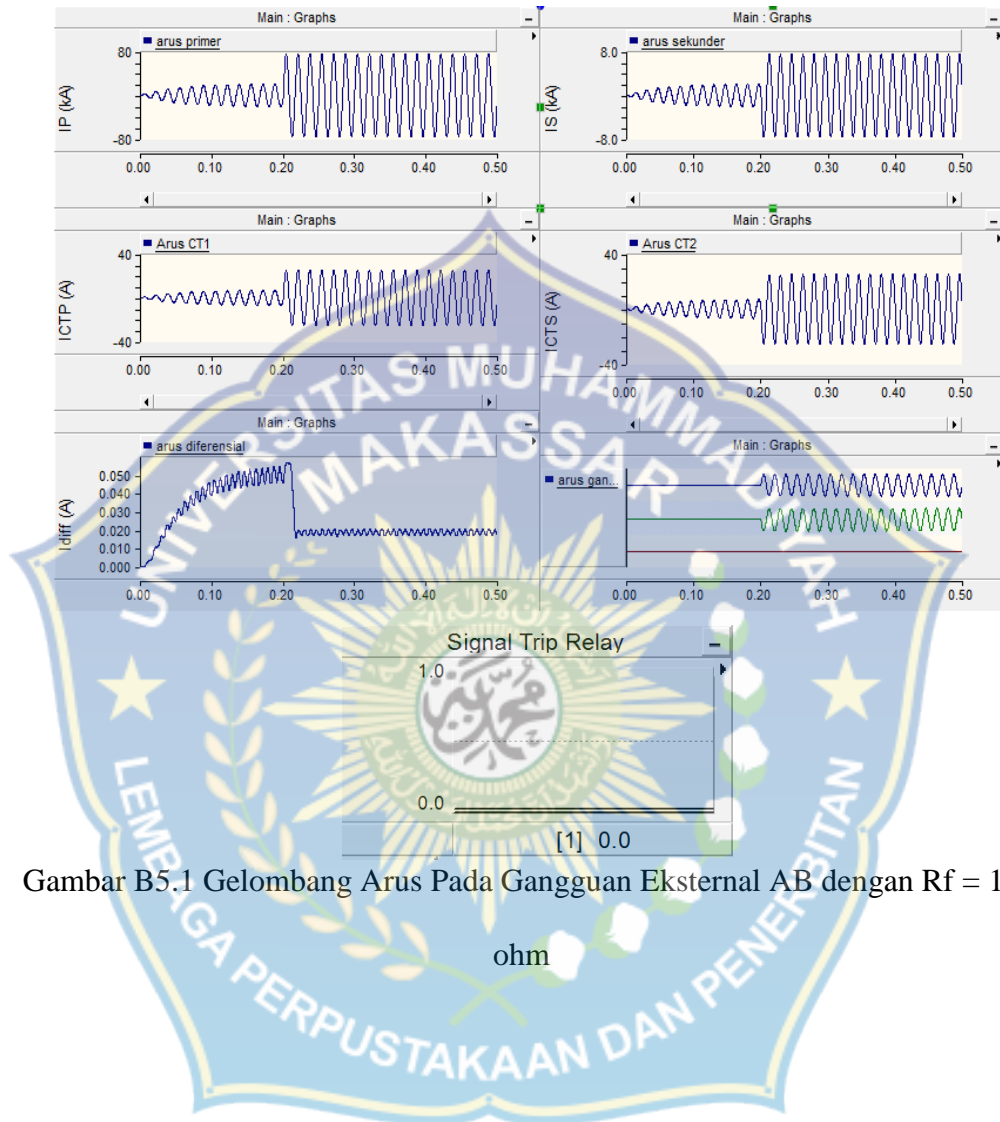
➤ **Resistansi gangguan 20 Ohm**



Gambar B4.2 Gelombang Arus Pada Gangguan Eksternal A-G dengan $R_f = 20$ ohm

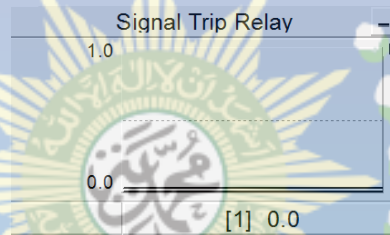
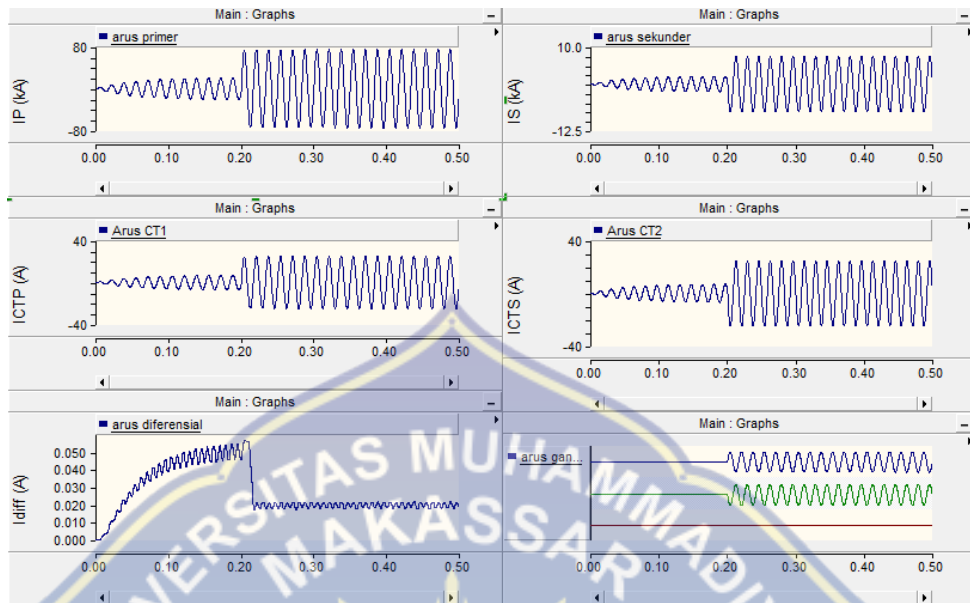
Lampiran B5 Gangguan External AB

➤ Resistansi gangguan 10 Ohm



Gambar B5.1 Gelombang Arus Pada Gangguan Eksternal AB dengan $R_f = 10$ ohm

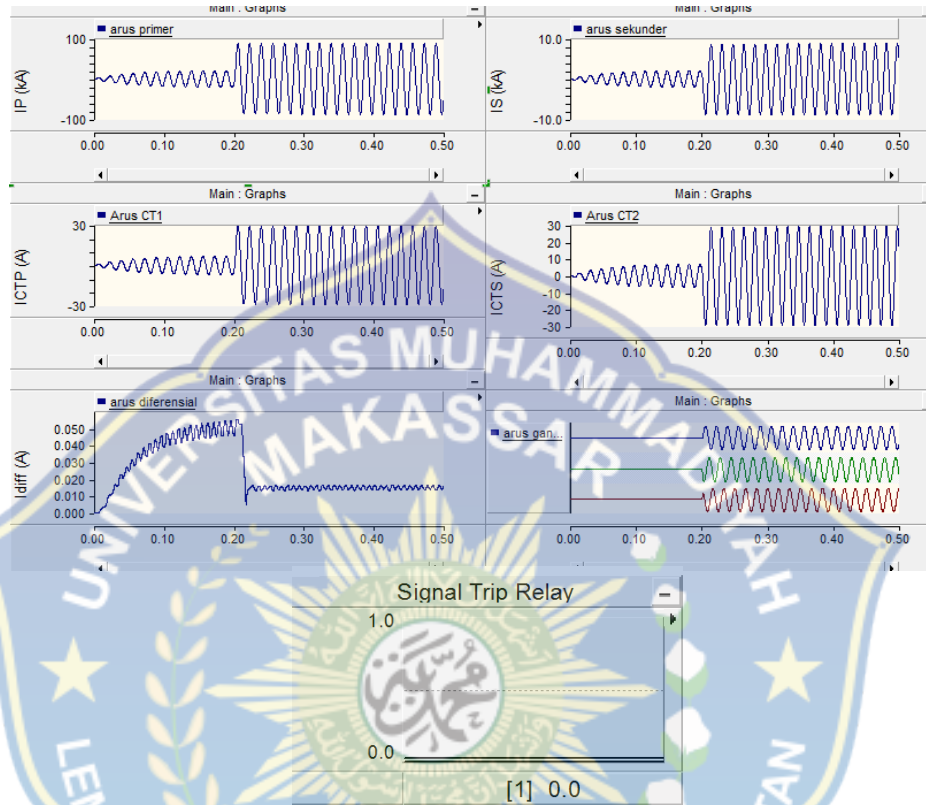
➤ **Resistansi gangguan 20 Ohm**



Gambar B5.2 Gelombang Arus Pada Gangguan Eksternal AB dengan $R_f = 20$ ohm

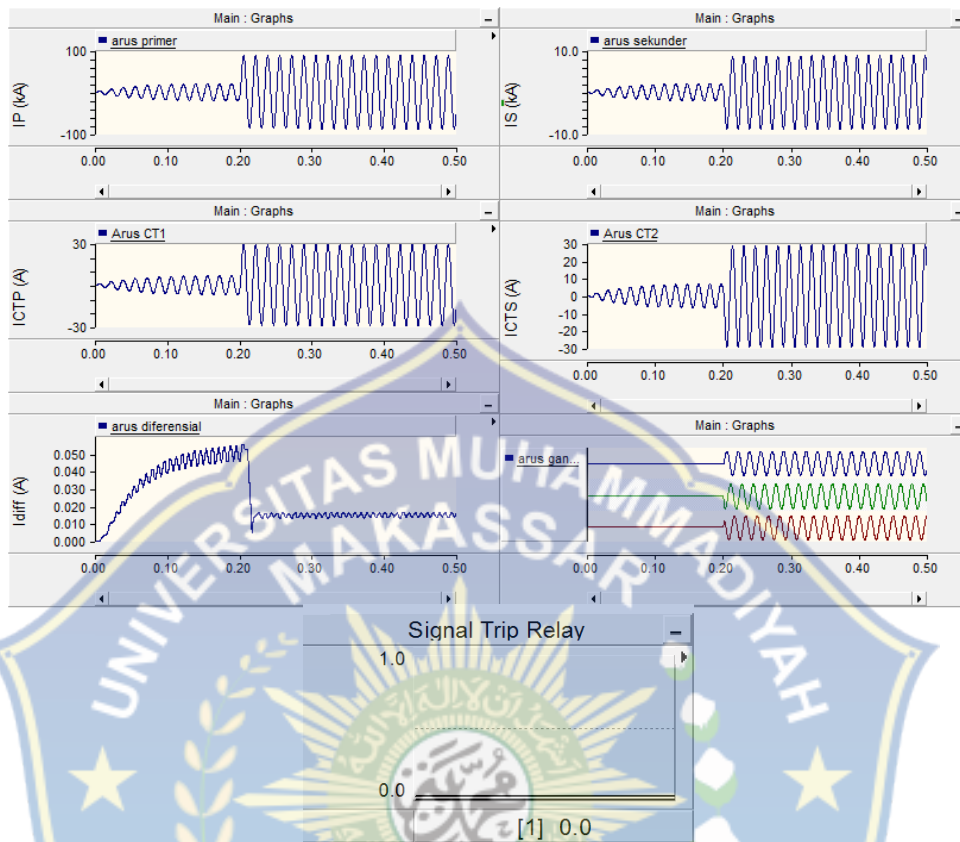
Lampiran B6 Gangguan External ABC

➤ Resistansi gangguan 10 Ohm



Gambar B6.1 Gelombang Arus Pada Gangguan Eksternal ABC dengan $R_f = 10$ ohm

➤ **Resistansi gangguan 20 Ohm**



Gambar B6.1 Gelombang Arus Pada Gangguan Eksternal ABC dengan $R_f = 20$ ohm