

SKRIPSI

**STUDI ARUS *NEUTRAL GROUNDING RESISTOR* (NGR) DI UNIT
GENERATOR – TRANSFORMATOR UNTUK BERBAGAI GANGGUAN
FASE KE TANAH**



OLEH :

AHMAD TAMANGANRO NUR

AHMAR SURIADI

105 82 1360 14

105 82 1393 14

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR

2019

STUDI ARUS *NEUTRAL GROUNDING RESISTOR* (NGR) DI UNIT
GENERATOR – TRANSFORMATOR UNTUK BERBAGAI GANGGUAN
FASE KE TANAH

Skripsi

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

Jurusan Teknik Elektro

Fakultas Teknik

Oleh :

AHMAD TAMANGANRO NUR

AHMAR SURIADI

105 82 1360 14

105 82 1393 14

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 : **STUDI ARUS NETRAL GROUNDING RESISTOR (NGR) DI UNIT GENERATOR-TRANSFORMATOR UNTUK BERBAGAI GANGGUAN FASE KE TANAH**

Nama : 1. Ahmad Tamanganro Nur
2. Ahmar Suriadi

Stambuk : 1. 10582 1360 14
2. 10582 1393 14

Makassar, 31 Agustus 2019

Telah Diperiksa dan Disetujui
Oleh Dosen Pembimbing;

Pembimbing I

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

Pembimbing II

Andi Faharuddin, S.T.,M.T

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

kripsi atas nama Ahmad Tamanganro Nur dengan nomor induk Mahasiswa 10582 1360 14 dan hmar Suriadi dengan nomor induk Mahasiswa 10582 1393 14, dinyatakan diterima dan disahkan eh Panitia Ujian Tugas Akhir/Skripsi sesuai dengan Surat Keputusan Dekan Fakultas Teknik niversitas Muhammadiyah Makassar Nomor : 0010/SK-Y/20201/091004/2019, sebagai salah atu syarat guna memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro Jurusan eknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar pada hari Sabtu tanggal 24 gustus 2019.

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

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

Penguji

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

b. Sekertaris : Rahmania, S.T.,M.T

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

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

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

Mengetahui :

Pembimbing I

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

Pembimbing II

Andi Faharuddin, S.T.,M.T

Dekan



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

NBM : 855 500

KATA PENGANTAR

Bismillahi rahmani rahim.

Puji syukur kehadirat 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: **“STUDI ARUS *NEUTRAL GROUNDING RESISTOR* (NGR) DI UNIT GENERATOR – TRANSFORMATOR UNTUK BERBAGAI GANGGUAN FASE KE TANAH”**.

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. Dr. Umar Katu, S.T.,M.T. 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 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, 07Agustus 2019

Penulis

Ahmad Tamanganro Nur¹. Ahmar Suriadi²

¹Prodi Teknik Elektro Fakultas Teknik Unismuh Makassar

E_mail :ahmadando253@yahoo.com

²Prodi Teknik Elektro Fakultas Teknik Unismuh Makassar

E_mail :suriadahmar@gmail.com

ABSTRAK

Abstrak; Ahmad Tamanganro Nur dan Ahmar Suriadi, (2019) Kesalahan saluran tunggal ke tanah adalah kesalahan yang paling sering terjadi pada sistem tenaga listrik. Efek gangguan tanah ditentukan dengan menghasilkan pengaturan stasiun dan koneksi transformator. Dalam tulisan ini, kinerja generator dalam gangguan *line-to-ground* tunggal di berbagai *Neutral Grounding Resistor* (NGR) dan konfigurasi transformator dipelajari. Simulasi dilakukan di PSCAD (*Power System Computer Aided Design*) dan hasilnya dianalisis. Perbandingan dengan dampak kesalahan pada berbagai koneksi transformator disajikan. Dampak kesalahan untuk generator dengan NGR juga dianalisis. Pada hasil simulasi ini data arus yang di ukur yaitu trafo Y- Δ , Y-Y dan trafo Y- Δ dua fase. Pada titik gangguan yang memiliki arus yang besar berada di Y- Δ dua fase dan arus terendah dititik gangguan yaitu di Y- Δ satu fase. Pada unit generator-transformer, arus gangguan pada generator netral paling besar pada koneksi transformator berada di Y- Δ satu fase dan pada generator-transformer di Y-Y dan trafo Y- Δ dua fase memiliki arus yang kecil berada di skala pico ($10^{-12} \sim 0$).

Kata Kunci: Gangguan tanah, resistor pentanahan netral, konfigurasi transformator, PSCAD.

Ahmad Tamanganro Nur¹. Ahmar Suriadi²

¹Electrical Engineering Study Program Faculty of Engineering Unismuh Makassar

E_mail:ahmadando253@yahoo.com

²Electrical Engineering Study Program Faculty of Engineering Unismuh Makassar

E_mail: suriadiahmar@gmail.com

ABSTRACT

Abstract; Ahmad Tamanganro Nur and Ahmar Suriadi, (2019) Single channel error to the ground is the most common error in the electric power system. The effect of ground disturbance is determined by generating station settings and transformer connections. In this paper, the performance of the generator in a single line-to-ground fault in various Neutral Grounding Resistors (NGR) and transformer configurations is studied. The simulation was carried out at PSCAD (Power System Computer Aided Design) and the results were analyzed. A comparison with the impact of errors on various transformer connections is presented. The impact of errors for generators with NGR is also analyzed. In the results of this simulation the measured current data are Y- Δ , Y-Y and Y-raf two-phase transformers. At the point of interference which has a large current is at Y- Δ two phases and the lowest current at the disturbance point is at Y- Δ one phase. In the generator-transformer unit, the fault current at the largest neutral generator at the transformer connection is at Y- Δ one phase and at the generator-transformer at YY and the Y-raf two phase transformer has a small current at the pico scale (10-12 ~ 0).

Keywords: Ground faults, neutral grounding resistor, transformer configurations, PSCAD.

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL

HALAMAN JUDUL i

HALAMAN PERSETUJUAN ii

HALAMAN PENGESAHAN iii

KATA PENGANTAR iv

ABSTRAK v

DAFTAR ISI viii

DAFTAR GAMBAR xi

DAFTAR TABEL xiii

DAFTAR LAMPIRANxiv

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. Sistemasi Penulisan 4

BAB II TINJAUAN PUSTAKA 5

A. Pentahanan Titik Netral 5

B. Prinsip Gangguan 21

C. Pengertian Transformator 26

D. Perangkat lunak PSCAD/EMTDC 34

BAB III METODOLOGI PENELITIAN	45
A. Waktu dan tempat penelitian	45
B. Alat dan Bahan	45
C. Langkah Penelitian	46
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	48
A. Pemodelan sistem arus gangguan satu fase ketanah menggunakan software PSCAD	48
B. Hasil Simulasi Transformator Y- Δ	50
C. Hasil Transformator Y – Y	55
D. Gangguan 2 fase ke tanah dengan transformator Y – Δ	60
BAB V PENUTUP	66
A. Kesimpulan	66
DAFTAR PUSTAKA	67



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Diagram koneksi dan sirkuit setara urutan-nol	25
Gambar 2.2 Satu diagram garis untuk simulasi	26
Gambar 2.3 Prinsip Kerja Transformator.....	28
Gambar2.4 Kumparan Transformator	29
Gambar 2.5 Inti Besi	29
Gambar 2.6 Lingkungan Utama PSCAD (Muller, 2005)	37
Gambar 2.7 Title, Menu and Main Tool Bar. PSCAD (Muller, 2005).....	38
Gambar 2.8 Menu File dari Bilah Menu Utama PSCAD (Muller, 2005)	39
Gambar 2.9 Toolbar Buttons PSCAD (Muller, 2005)	39
Gambar 2.10 Jendela Ruang Kerja PSCAD (Muller, 2005)	40
Gambar 2.11 Jendela Keluaran/Output PSCAD (Muller, 2005).....	40
Gambar 2.12 Memuat Proyek PSCAD (Muller, 2005)	41
Gambar 2.13 Membuka Proyek PSCAD (Muller, 2005).....	42
Gambar 2.14 Contoh Sederhana Rangkaian yang Dibuat dalam PSCAD (Muller, 2005).	43
Gambar 2.15 Menu untuk Mencetak Rangkaian dan Grafik PSCAD.....	44
Gambar 3.1 Bagan alur proses Penelitian	46
Gambar 3.2 Bagan Simulasi PSCAD	47
Gambar 4.1 Rangkaian Simulasi PSCAD V 4.2.0 Student version (a) Arus gangguan di titik pertama, (b) Arus gangguan di titik kedua, (c) Arus gangguan di titik ketiga.....	49

Gambar 4.2 Gelombang arus dan gangguan internal satu fase ketanah $R_f = 2 \Omega$;	
(a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c)	
tampilan arus netral trafo	51
Gambar 4.3 Gelombang arus dan gangguan satu fase ketanah $R_f = 2\Omega$; (a)	
tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c) tampilan	
arus netral trafo	52
Gambar 4.4 Gelombang arus dan gangguan satu fase ketanah $R_f = 2\Omega$; (a)	
tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c) tampilan	
arus netral trafo	54
Gambar 4.5 Gelombang arus dan gangguan satu fase ketanah $R_f = 2\Omega$; (a)	
tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c) tampilan	
arus netral trafo	56
Gambar 4.6 Gelombang arus dan gangguan satu fase ketanah $R_f = 2\Omega$; (a)	
tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c) tampilan	
arus netral trafo	57
Gambar 4.7 Gelombang arus dan gangguan satu fase ketanah $R_f = 2\Omega$; (a)	
tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c) tampilan	
arus netral trafo	59
Gambar 4.8 Gelombang arus dan gangguan internal dua fase ketanah $R_f = 2 \Omega$; (a)	
tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c) tampilan	
arus netral trafo	61

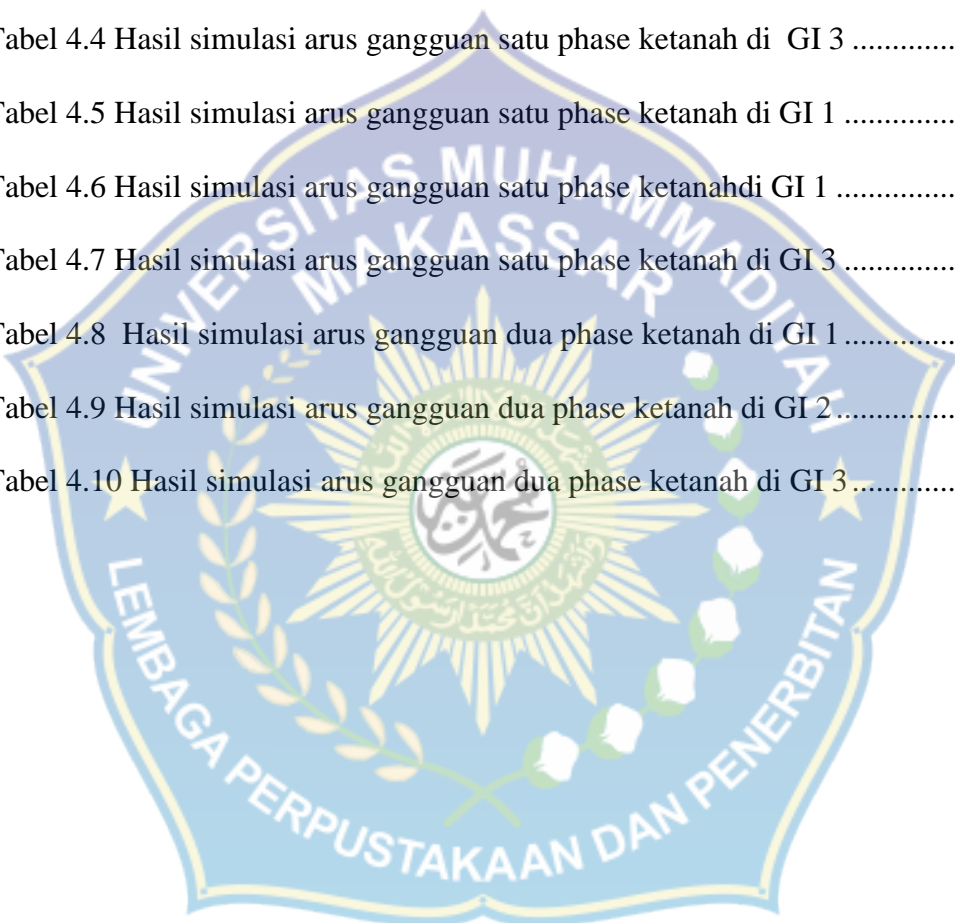
Gambar 4.9 Gelombang arus dan gangguan internal dua fase ketanah $R_f = 2 \Omega$; (a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c) tampilan arus netral trafo 63

Gambar 4.10 Gelombang arus dan gangguan internal dua fase ketanah $R_f = 2 \Omega$; (a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c) tampilan arus netral trafo 65



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Jenis Tanah.....	20
Tabel 4.1 Parameter sistem pengujian	48
Tabel 4.2 Hasil simulasi arus gangguan satu phase ketanah di GI 1	50
Tabel 4.3 Hasil simulasi arus gangguan satu phase ketanahdi GI 2	52
Tabel 4.4 Hasil simulasi arus gangguan satu phase ketanah di GI 3	53
Tabel 4.5 Hasil simulasi arus gangguan satu phase ketanah di GI 1	55
Tabel 4.6 Hasil simulasi arus gangguan satu phase ketanahdi GI 1	57
Tabel 4.7 Hasil simulasi arus gangguan satu phase ketanah di GI 3	58
Tabel 4.8 Hasil simulasi arus gangguan dua phase ketanah di GI 1	60
Tabel 4.9 Hasil simulasi arus gangguan dua phase ketanah di GI 2.....	62
Tabel 4.10 Hasil simulasi arus gangguan dua phase ketanah di GI 3.....	64



DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A Bentuk dan kegunaan komponen yang digunakan

LAMPIRAN B Hasil simulasi



BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Transformator sebagai *step-up* transformator pada pembangkit listrik dapat dikategorikan sebagai konfigurasi generator-transformator unit, konfigurasi generator-transformator unit dengan generator *breaker*, generator *cross-compound* dan generator berbagi transformator unit. Kesalahan tanah pada saluran transmisi atau busbar dapat berdampak pada generator yang dipengaruhi oleh konfigurasi sistem. (ARSultan, dkk. 2012).

Generator adalah komponen penting sistem tenaga. Pengetahuan tentang gangguan tanah pada koneksi belitan transformator sangat penting untuk memilih transformator yang sesuai untuk kebutuhan layanan yang diberikan. Penelitian dan aplikasi pada transformator telah dilakukan selama beberapa dekade. IEEE std. C57.12.70-2000 memberikan panduan dan praktik yang direkomendasikan untuk penandaan terminal dan koneksi untuk distribusi dan transformator daya. IEEE std. C57.105-1978 menyediakan panduan untuk koneksi transformator dalam sistem distribusi tiga fase. IEEE std. 519-1992 dan IEEE std. 142-2007 membahas harmonisa dan landasan sistem yang terkait dengan transformator, masing-masing.

Pengaruh koneksi transformator pada operasi dibahas fokus pada operasi termasuk tegangan isolasi, auto transformer dalam berbagai kondisi operasi tetapi tidak termasuk untuk pembumian. Resistansi yang dimasukkan antara netral dan

arde untuk membatasi nilai arus hubung singkat meningkat sehingga tegangan insulasi dihasilkan dari dasar saluran.

Tegangan yang tidak seimbang akan berkurang jika transformator Yg (*wye grounded*) -Yg terhubung ke generator dan trafo Δ (delta) -Yg terhubung ke beban. Peneliti belitan yang koneksi biasanya di rekomendasikan untuk layanan rencana industri adalah Δ -Y (*wye*) di semua level tegangan. Ada alasan untuk berbagai jenis koneksi belitan transformator untuk memenuhi berbagai kebutuhan seperti untuk menangani beban satu fase, menyederhanakan *ground relay*, menghemat investasi awal dengan memilih sistem isolasi yang tepat, meminimalkan *ferroresonance* dan menghindari masalah harmonik.

Besarnya arus gangguan tanah, terutama pada generator dan transformator ditentukan oleh impedansi belitan generator dan transformator. Pemilihan dan pengaturan perlindungan untuk generator sedikit banyak dipengaruhi oleh metode di mana generator terhubung ke sistem dan oleh pengaturan keseluruhan stasiun pembangkit. Dalam tulisan ini, efek koneksi transformator yaitu YY, Y-Yg, Y- Δ , Yg-Y, Yg-Y, Yg- Δ -, Δ - Y, Δ -Yg dan Δ - Δ transformator terhadap arus gangguan arus ke tanah dalam elemen NGR untuk konfigurasi unit generator-transformator, disajikan. Namun, efek *ferroresonance*, harmonik dan lengkung diabaikan.

B. Rumusan Masalah

1. Berapa nilai arus *Netral Grounding Resistor* (NGR) maksimal jika terjadi gangguan fase ke tanah?

2. Apakah nilai *Netral Grounding Resistor* (NGR) maksimal sesuai dengan standar IEEE?

C. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui nilai maksimal arus NGR jika terjadi gangguan fase ke tanah.
2. Mengetahui nilai maksimum sesuai dengan standar IEEE.

D. Batasan Masalah

Untuk mempermudah penyelesaian masalah yang dibahas pada skripsi ini diperlukan suatu batasan masalah untuk menghindari pembahasan yang terlalu luas. Adapun batasan masalah pada skripsi ini adalah sebagai berikut:

1. Hanya membahas besarnya arus hubung singkat satu *fase* ke tanah pada generator saat putusya kawat pentanahan *Neutral Grounding Resistor* (NGR) sebagai pengaman generator.
2. Tidak membahas masalah koordinasi relai diferensial, SBEF (*Standby Earth Fault*), OCR (*Over Current Relay*) dan GFR (*Ground Fault Relay*).

E. Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penulisan skripsi ini adalah untuk mengetahui cara melindungi generator jika terjadi gangguan hubung singkat satu *fase* ke tanah saat putusya kawat pentanahan *Neutral Grounding Resistor* (NGR).

F. Sistem Penulisan

Secara garis besar penulisan laporan tugas akhir disusun menjadi 5 Bab sebagai berikut:

1. **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.
2. **Bab Kedua**, Bab ini menjelaskan tentang teori-teori pendukung yang berkaitan dengan judul penelitian.
3. **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.
4. **Bab Keempat**, Bab ini menjelaskan tentang hasil dari penelitian, alat dan perhitungan serta pembahasan terkait judul penelitian.
5. **Bab Kelima**, Bab ini merupakan penutup yang berisi tentang kesimpulan dan saran terkait judul penelitian.
6. **Daftar Pustaka**, Berisi tentang daftar sumber referensi penulis dalam memilih teori yang relevan dengan judul penelitian.
7. **Lampiran**, Berisi tentang dokumentasi hasil penelitian serta alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Pentanahan (Pembumian) Titik Netral

Pada saat sistem tenaga listrik masih dalam skala kecil, gangguan hubung singkat ke tanah pada instalasi tenaga listrik tidak merupakan suatu masalah yang besar. Hal ini dikarenakan bila terjadi gangguan hubung singkat fase ke tanah arus gangguan masih relatif kecil (lebih kecil dari 5 *Ampere*), sehingga busur listrik yang timbul pada kontak-kontak antara fase yang terganggu dan tanah masih dapat padam sendiri. Tetapi dengan semakin berkembangnya sistem tenaga listrik baik dalam ukuran jarak (panjang) maupun tegangan, maka bila terjadi gangguan *fase* ke tanah arus gangguan yang timbul akan besar dan busur listrik tidak dapat lagi padam dengan sendirinya. Timbulnya gejala-gejala “busur listrik ke tanah (*arching ground*)” sangat berbahaya karena menimbulkan tegangan lebih *transient* yang dapat merusak peralatan.

Apabila hal diatas dibiarkan, maka kontinuitas penyaluran tenaga listrik akan terhenti, yang berarti dapat menimbulkan kerugian yang cukup besar. Oleh karena itu sistem-sistem tenaga listrik tidak lagi dibuat terapung (*floating*) yang lazim disebut sistem delta, tetapi titik netralnya di tanahkan melalui tahanan, reaktor dan ditanahkan langsung (*solid grounding*). Pentanahan itu umumnya dilakukan dengan menghubungkan netral transformator daya ke tanah.

A.1. Sistem Pentanahan Netral

A.1.1 Pentanahan Titik Netral Tanpa Impedansi (Pentanahan Langsung/*Solid Grounding*)

Sistem pentanahan langsung adalah dimana titik netral sistem dihubungkan langsung dengan tanah, tanpa memasukkan harga suatu. Pada sistem ini bila terjadi gangguan fase ke tanah akan selalu mengakibatkan terganggunya saluran (*line outage*), yaitu gangguan harus di isolir dengan membuka pemutus daya. Salah satu tujuan pentanahan titik netral secara langsung adalah untuk membatasi tegangan dari fase-fase yang tidak terganggu bila terjadi gangguan fase ke tanah.

Keuntungan:

- Tegangan lebih pada fase-fase yang tidak terganggu relatif kecil.
- Kerja pemutus daya untuk melokalisir lokasi gangguan dapat dipermudah, sehingga letak gangguan cepat diketahui.
- Sederhana dan murah dari segi pemasangan.

Kerugian:

- a. setiap gangguan fase ke tanah selalu mengakibatkan terputusnya daya
- b. arus gangguan ke tanah besar, sehingga akan dapat membahayakan makhluk hidup didekatnya dan kerusakan peralatan listrik yang dilaluinya

A.1.2. Pentanahan Titik Netral Melalui Tahanan (*Resistance Grounding*)

Pentanahan titik netral melalui tahanan (*resistance grounding*) dimaksud adalah suatu sistem yang mempunyai titik netral dihubungkan dengan tanah melalui tahanan (resistor), pada umumnya nilai tahanan pentanahan lebih tinggi

dari pada reaktansi sistem pada tempat dimana tahanan itu dipasang. Sebagai akibatnya besar arus gangguan fase ke tanah pertama-tama dibatasi oleh tahanan itu sendiri. Dengan demikian pada tahanan itu akan timbul rugi daya selama terjadi gangguan fase ke tanah. Secara umum harga tahanan yang ditetapkan pada hubung netral adalah:

$$R = \Omega$$

Dimana:

$$R = \text{Tahanan } (\Omega)$$

E_f = Tegangan fase ke netral

I = Arus beban penuh dalam Ampere dari transformator.

Dengan memilih harga tahanan yang tepat, arus gangguan ke tanah dapat dibatasi sehingga harganya hampir sama bila gangguan terjadi disegala tempat didalam sistem bila tidak terdapat titik pentanahan lainnya. Dalam menentukan nilai tahanan pentanahan akan menentukan besarnya arus gangguan tanah. Besarnya tahanan pentanahan pada sistem tenaga listrik (contohnya di PLN P3B Jawa Bali Region Jabar), adalah sebagai berikut Sistem 70 kV sebesar 62Ω dan Sistem 20 kV sebesar 12Ω atau 42Ω .

Jenis pentanahan (resistor) yang dipakai adalah jenis logam (*metallic resistor*) atau jenis cairan (*liquid resistor*). Pentanahan titik netral melalui tahanan (*resistance grounding*) mempunyai keuntungan dan kerugian yaitu:

Keuntungan:

- a. Besar arus gangguan tanah dapat diperkecil.
- b. Bahaya *gradient voltage* lebih kecil karena arus gangguan tanah kecil.

c. Mengurangi kerusakan peralatan listrik akibat arus gangguan yang melaluinya.

Kerugian:

- a. Timbulnya rugi-rugi daya pada tahanan pentanahan selama terjadinya gangguan fase ke tanah.
- b. Karena arus gangguan ke tanah relatif kecil, kepekaan relay pengaman menjadi berkurang dan lokasi gangguan tidak cepat diketahui.

A.1.3. Pentanahan Titik Netral Melalui Kumputan Petersen

Sistem pentanahan dengan kumputan petersen adalah dimana titik netral dihubungkan ke tanah melalui kumputan petersen (*Petersen Coil*). Memerlihatkan *petersen coil* yang terpasang di PT PLN (Persero) P3B Region Jawa Barat, yaitu pada sistem 30 kV Plengan-Lamajan. Pada hakekatnya tujuan dari pentanahan dengan kumputan petersen adalah untuk melindungi sistem dari gangguan hubung singkat fase ke tanah yang sementara sifatnya (*temporary fault*), yaitu dengan membuat arus gangguan yang sekecil-kecilnya dan pemadaman busur api dapat terjadi dengan sendirinya. Kumputan petersen berfungsi untuk memberi arus induksi yang mengkompensir arus gangguan, sehingga arus gangguan itu kecil sekali dan tidak membahayakan peralatan listrik yang dilaluinya. Arus gangguan ke tanah yang mengalir pada sistem sedemikian kecilnya sehingga tidak langsung mengerjakan *relay* gangguan tanah untuk membuka pemutusnya (PMT) dari bagian yang terganggu. Dengan demikian kontinuitas penyaluran tenaga listrik tetap berlangsung untuk beberapa waktu

lamanya walaupun sistem dalam keadaan gangguan hubung singkat satu fase ke tanah, yang berarti pula dapat memperpanjang umur dari pemutus tenaga (PMT).

Sebaliknya sistem pentanahan dengan kumparan Petersen ini mempunyai kelemahan, yaitu sulit melokalisir gangguan satu fase ke tanah yang bersifat permanen dan biasanya memakan waktu yang lama. Gangguan hubung singkat yang permanen itu dapat mengganggu bagian sistem yang lainnya. Oleh karena itu hubung singkat tersebut tetap harus dilokalisir dengan menggunakan relai hubung singkat ke tanah (*Ground fault relay*).

Pentanahan titik netral melalui kumparan Petersen mempunyai keuntungan dan kerugian yaitu:

Keuntungan:

- a. Arus gangguan dapat dibuat kecil sehingga tidak berbahaya bagi makhluk hidup.
- b. Kerusakan peralatan sistem dimana arus gangguan mengalir dapat dihindari.
- c. Sistem dapat terus beroperasi meskipun terjadi gangguan fase ke tanah.
- d. Gejala busur api dapat dihilangkan.

Kerugian:

- a. *Relay* gangguan tanah (*ground fault relay*) sukar dilaksanakan karena arus gangguantanah relatif kecil.
- b. Tidak dapat menghilangkan gangguan fase ke tanah yang menetap (permanen) pada sistem. Operasi kumparan Petersen harus selalu diawasi karena bila ada θ perubahan pada sistem, kumparan Petersen harus disetel (*tuning*) kembali.

A.2. Faktor Pentanahan

Besar impedansi pentanahan tersebut sangat dipengaruhi oleh banyak faktor baik faktor internal atau eksternal. Adapun dimaksud dengan faktor internal meliputi:

1. Dimensi konduktor pentanahan (diameter atau panjangnya). Untuk pemilihan konduktor yang akan dipasang untuk pentanahan ini adalah dengan memilih kabel jenis BC dengan luas penampang 16 mm.
2. *Resistivitas relative* tanah. Tanah yang bagus untuk pembuatan pentanahan atau *grounding* adalah dengan memilih tanah yang basah atau lembab, karena kandungan airnya cukup banyak dan dapat langsung menetralsisir ketika ada gangguan yang terjadi pada sistem instalasi.
3. Konfigurasi sistem pentanahan. Sistem pentanahan yang baik haruslah dengan adanya perencanaan yang baik pula harus adanya pengaturan, dalam hal ini perencanaan pentanahan yang akan dibuat adalah dengan mencari nilai tahanan mencapai 0,3 ohm untuk syarat tahanan pentanahan pada tegangan tinggi serta dengan kedalaman elektroda yang di tanam adalah 6 meter dan 6 buah elektroda yang akan ditanam.

A.3. Karakteristik Sistem Pentanahan

Karakteristik sistem pentanahan yang efektif dapat terjadi dengan memperhatikan antara lain:

- a) Terencana dengan baik, semua koneksi yang terdapat pada sistem harus merupakan koneksi yang sudah direncanakan sebelumnya dengan kaidah-kaidah tertentu. Verifikasi secara visual dapat dilakukan.
- b) Verifikasi secara visual dapat dilakukan.
- c) Menghindarkan gangguan yang terjadi pada arus listrik dari perangkat.
- d) Semua komponen netal harus ditahan/diikat oleh sistem pentanahan dengan tujuan untuk meminimalkan arus listrik melalui material yang bersifat konduktif pada potensial listrik yang sama.

A.4. Syarat Sistem Pentanahan

Syarat sistem pentanahan yang efektif dapat terjadi dengan memperhatikan antara lain:

- a) Membuat jalur *impedansi* rendah ke tanah untuk pengaman personil dan peralatan dengan menggunakan rangkaian yang efektif.
- b) Dapat melawan dan menyebarkan gangguan berulang dan arus akibat surya hubung.
- c) Menggunakan bahan tahan korosi terhadap berbagai kondisi kimiawi tanah, untuk memastikan kontinuitas penampilan sepanjang umur peralatan yang dilindungi.
- d) Menggunakan sistem mekanik yang kuat namun mudah dalam perawatan dan perbaikan bila terjadi kerusakan.

A.5. Tujuan Pentanahan Titik Netral Sistem

Adapun tujuan pentanahan titik netral sistem adalah sebagai berikut:

- a) Menghilangkan gejala-gejala busur api pada suatu sistem.
- b) Membatasi tegangan-tegangan pada fase yang tidak terganggu (pada fase yang sehat).
- c) Meningkatkan keandalan (*reability*) pelayanan dalam penyaluran tenaga listrik.
- d) Mengurangi/membatasi tegangan lebih transient yang disebabkan oleh penyalaan bunga api yang berulang-ulang (*restrike ground fault*).
- e) Memudahkan dalam menentukan sistem proteksi serta memudahkan dalam menentukan lokasi gangguan.

A.6. Metode Pentanahan

Ada beberapa metode pentanahan yang berbeda dalam sistem tenaga listrik. Mentanahkan sistem atau sumber (generator atau trafo) dapat dengan menggunakan metode-metode seperti *Low-Resistance Grounding* (LRG) dan *High-Resistance Grounding* (HRG)

A.6.1. *Low-Resistance Grounding* (LRG)

Netral generator dihubungkan ke tanah melalui resistor yang berfungsi membatasi arus gangguan tanah yang besarnya beberapa ratus *ampere* (200 A-600 A). Arus gangguan ini sangat besar dan dapat merusak stator, tetapi pada saat yang sama dapat memungkinkan menghasilkan arus yang sensitif dan selektif

untuk membuat sistem proteksi bekerja. Saat ini LRG jarang digunakan dalam generator berkapasitas besar karena terdapat resiko yang tinggi yaitu resiko terbakarnya besi stator. LRG juga tidak digunakan pada generator paralel. Namun, metode LRG adalah metode yang paling umum digunakan dalam sistem tegangan menengah pada industri.

A.6.2. High-Resistance Grounding (HRG)

Hambatan yang besar dihubungkan antara titik netral generator dan tanah (*ground*). Terkadang resistor kecil terhubung pada lilitan sekunder dari trafo satu fase (trafo distribusi atau trafo netral pentanahan). Metode ini membatasi arus gangguan sebesar 5 A hingga 10 A, dan kemudian tidak ada bahaya dan kerusakan akibat gangguan tanah yang terjadi.

A.7. Transformator Pentanahan

Bila pada suatu sistem tenaga listrik tidak terdapat titik netral, sedangkan sistem itu harus di tanahkan, maka sistem itu dapat ditanahkan dengan menambahkan “Transformator Pentanahan” (*grounding transformer*). Transformator pentanahan itu dapat terdiri dari transformator Zig-zag atau transformator bintang-segitiga (Y- Δ). Trafo pentanahan yang paling umum digunakan adalah transformator zig-zag tanpa belitan sekunder.

A.8. Penetapan Sistem Pentanahan di Indonesia

A.8.1. Sistem 150 KV

Pentanahan netral sistem 150 KV beserta pengamannya ditetapkan sebagai berikut:

1. Pentanahan netral untuk sistem ini adalah pentanahan efektif. Penambahan *reaktansi* pada netral sistem ini dimungkinkan selama persyaratan pentanahan efektif dipenuhi ($X_0/X_1 \leq 3$).
2. Pengaman sistem dilaksanakan dengan pemutus cepat dan penutup cepat.

A.8.2. Sistem 66 KV

Pentanahan netral sistem ini beserta pengamannya ditetapkan sebagai berikut:

- a. Pentanahan netral untuk sistem ini adalah pentanahan dengan tahanan.
- b. Pengamanan sistem dilaksanakan dengan pemutus cepat dan penutup cepat.

A.8.3. Sistem 20 KV

Pentanahan netral sistem 20 KV beserta pengamannya ditetapkan sebagai berikut:

- a) Bagi saluran udara maupun saluran dalam tanah di pakai pemutus dengan relay arus lebih untuk gangguan hubung singkat fase ke fase dan *relay* tanah untuk gangguan hubung singkat fase ke tanah. Pada gardu distribusi dipasang penunjuk gangguan.

- b) Bagi saluran udara dipakai pula penutup cepat atau lambat, sedang bagi saluran dalam tanah tidak dipakai penutup kembali.

Selanjutnya berdasarkan SPLN 26:1980 telah ditetapkan besar tahanan pentanahan sebagai berikut:

- a) Tahanan rendah 12 ohm dan arus gangguan tanah maksimum 1000 ampere dipakai pada jaringan kabel tanah.
- b) Tahanan rendah 40 ohm dan arus gangguan maksimum 300 ampere dipakai pada jaringan saluran udara dan campuran saluran udara dengan kabel tanah.
- c) Tahanan tinggi 500 ohm dan arus gangguan maksimum 25 ampere dipakai pada saluran udara.

A.9. Pentanahan/Pembumian Peralatan

A.9.1. Pengertian Pentanahan Peralatan

Pentanahan peralatan adalah pentanahan bagian dari peralatan yang pada kerja normal tidak dilalui arus. Bila terjadi hubung singkat suatu penghantar dengan suatu peralatan, maka akan terjadi beda potensial (tegangan), yang dimaksud peralatan disini adalah bagian-bagian yang bersifat konduktif yang pada keadaan normal tidak bertegangan seperti bodi trafo, bodi PMT, bodi PMS, bodi motor listrik, dudukan baterai dan sebagainya. Bila seseorang berdiri ditanah dan memegang peralatan yang bertegangan, maka akan ada arus yang mengalir melalui tubuh orang tersebut yang dapat membahayakan. Untuk menghindari hal ini maka peralatan tersebut perlu ditanahkan.

Pentanahan peralatan merupakan hal yang sangat penting dan perlu diperhatikan, baik pada pembangunan Gardu Induk, Pusat-pusat listrik, Industri-industri bahkan rumah tinggal juga perlu dilengkapi dengan sistem pentanahan ini. Tujuan pentanahan peralatan dapat dipormulasikan sebagai berikut:

1. Untuk mencegah terjadinya tegangan kejut listrik yang berbahaya bagi manusia dalam daerah itu.
2. Untuk memungkinkan timbulnya arus tertentu baik besarnya maupun lamanya dalam keadaan gangguan tanah tanpa menimbulkan kebakaran atau ledakan pada bangunan atau isinya.
3. Untuk memperbaiki penampilan (*performance*) dari system.

A.9.2. Tahanan Pentanahan

Besarnya tahanan pada kontak/hubung antara masa (*body*) dengan tanah.

Faktor-faktor yang mempengaruhi besarnya pentanahan:

1. Tahanan jenis tanah.
2. Panjang jenis elektroda pentanahan.
3. Luas penampang elektroda pentanahan.

Harga pentanahan makin kecil makin baik. Untuk perlindungan personil dan peralatan perlu diusahakan tahanan pentanahan lebih kecil dari 1 Ohm. Hal ini tidak praktis untuk dilaksanakan dalam suatu sistem distribusi, saluran transmisi, ataupun dalam *substations* distribusi. Beberapa peralatan/standar yang telah disepakati adalah bahwa saluran transmisi, *substations* harus direncanakan sedemikian rupa, sehingga tahanan pentanahan tidak melebihi harga satu ohm, Dalam Gardu-gardu Induk distribusi, harga tahanan maksimum yang

diperbolehkan adalah 5 ohm. Demikian juga halnya pada menara transmisi, untuk menghindari lompatan karena naiknya tegangan/potensial pada waktu terjadi sambaran petir maka tahanan kaki menara perlu dibuat sekecil mungkin (di Amerika kurang dari 10 Ohm). Untuk memahami mengapa tahanan pentanahan harus rendah, dapat digunakan hukum Ohm yaitu:

$$E = I \times R \text{ volt}$$

Dimana:

E = tegangan (*volt*)

I = Arus (*ampere*)

R = Tahanan (*ohm*)

Sebagai contoh terdapat tegangan sumber 415 volt (240 volt terhadap tanah) dengan tahanan 4 ohm. Ada masalah/*trouble* atau gangguan, sehingga kabel dari sumber yang mencatu motor listrik menyentuh badan motor. Hal ini berarti kabel tersebut menghubungkan ke sistem pentanahan yang mempunyai tahanan 20 ohm ke tanah. Menurut hukum ohm akan ada arus mengalir sebesar 10 amper melewati badan motor.

Apabila seseorang menyentuh badan motor, maka dia akan menerima tegangan sebesar 200 volt (20 ohm x 10 samper). Hal ini dapat berakibat fatal, tergantung pada tahanan orang tersebut yang bervariasi dengan tegangan yang disentuhnya.

A.9.3. Exposur Tegangan (*Voltage Exposure*)

Jika ada kontak yang tidak disengaja antara bagian-bagian yang dilalui arus dengan kerangka metal dari kerangka peralatan, kerangka metal itu menjadi bertegangan yang sama dengan tegangan peralatan. Untuk mencegah terjadinya tegangan kejut yang berbahaya kerangka peralatan metal peralatan tersebut harus dihubungkan ke tanah melalui impedansi yang rendah. Impedansi pentanahan itu harus sedemikian kecilnya sehingga tegangan IZ yang timbul pada kerangka peralatan harus cukup kecil dan tidak berbahaya. *International Electrotechnical Commission* (IEC) mengusulkan besar tegangan sentuh yang sebagai fungsi dari lama gangguan seperti pada tabel dibawah ini. Tabel ini biasanya digunakan untuk sistem tegangan konsumen. Jadi misalnya untuk sistem pentanahan pengaman (PUIL Fasel 324). Jika terjadi kegagalan isolasi pada peralatan, maka besar arus gangguan I_f dari titik gangguan ke badan peralatan tersebut, dan dari badan peralatan ke tanah melalui tahanan pentanahan.

A.9.4. Pengaruh Besar Tahanan Terhadap Sistem Tenaga Listrik

1. Makin besar tahanan tanah, tegangan sentuh makin besar.
2. Makin besar tahanan tanah pada tiang transmisi, makin besar tegangan puncak tiang.
3. Makin besar tahanan tanah pada tiang tranmisi, makin banyak jumlah Isolator yang harus dipasang (jumlah isolator makin panjang).
4. Tahanan tanah mempengaruhi penampilan saluran (*line Performance*).

A.9.5. Pengaruh Tahanan Pentanahan Yang Kecil Pada Sistem

1. Mengurangi tegangan pada puncak tiang
2. Mengurangi tegangan pada kawat penghantar
3. Mengurangi tegangan pada isolator
4. Mengurangi gangguan sampai beberapa gawang
5. Mengurangi waktu berlangsungnya tegangan merusak (*Break Down voltage*).

A.9.6. Macam-Macam Elektroda Pentanahan

Pada dasarnya terdapat tiga macam elektroda pentanahan yaitu:

1. Elektroda Pita, berupa pita atau kawat berpenampang bulat yang ditanam di dalam tanah umumnya penanamannya tidak terlalu dalam. (0,5 - 1 meter) dan caranya ada bermacam-macam.
2. Elektroda Batang, berupa batang yang ditanam tegak lurus dalam tanah.
3. Elektroda pelat, berupa pelat yang ditanam tegak lurus dalam tanah.

A.10. Tahanan Jenis Tanah

Harga tahanan jenis selalu bervariasi sesuai dengan keadaan pada saat pengukuran. Makin tinggi suhu makin tinggi tahanan jenisnya. Sebaliknya makin lembab tanah itu makin rendah tahanan jenisnya. Secara umum harga-harga tahanan jenis ini diperlihatkan pada tabel berikut ini:

Tabel 2.1 Jenis Tanah

Jenis Tanah	Tahanan Jenis Tanah (Ω / ohm)
Tanah rawa	30
Tanah liat dan tanah ladang	100
Pasir basah	200
Kerikil Basah	500
Pasir dan kerikil kering	1000
Tanah berbatu	3000

Sering dicoba untuk merubah komposisi kimia tanah dengan memberikan garam pada tanah dekat elektroda pentanahan dengan maksud untuk mendapatkan tahanan jenis tanah yang rendah. Cara ini hanya baik untuk sementara sebab proses penggaraman harus dilakukan secara priodik, sedikitnya enam bulan sekali. Dengan memberi air atau membasahi tanah juga dapat mengubah tahanan jenis tanah.

A.11. Pengukuran Tahanan Pentanahan

Pengukuran tahanan pentanahan bertujuan untuk menentukan tahanan antara besi atau plat tembaga yang ditanam dalam tanah yang digunakan untuk melindungi peralatan listrik terhadap gangguan petir dan hubung singkat. Dengan demikian pelat tersebut harus ditanam hingga mendapatkan tahanan terhadap tanah sekitar yang sekecil-kecilnya. Untuk mengukur tahanan pentanahan digunakan alat ukur *megger* tanah (*Earth Resistance Tester*).

B. Prinsip Gangguan

B.1. Tanah Arus

Menurut AR Sultan dkk (2012) Sebagian besar gangguan listrik melibatkan tanah. Bahkan kesalahan yang dimulai dari fase ke fase menyebar dengan cepat ke semua rumah logam, saluran, atau baki yang berdekatan yang menyediakan jalur balik ke titik pentanahan sistem. Sistem yang tidak dibumikan juga mengalami gangguan tanah dan membutuhkan perhatian yang hati-hati terhadap deteksi tanah dan proteksi *ground-fault*. Sensitivitas pelindung gangguan-tanah relatif tidak tergantung pada nilai arus beban kontinu dan oleh karena itu, memiliki pengaturan pengambilan yang lebih rendah daripada perangkat pelindung fase. Arus *ground-fault* tidak ditransfer melalui transformator daya sistem yang terhubung Δ -Y atau Δ - Δ , perlindungan *ground-fault* untuk setiap level tegangan sistem tidak tergantung pada perlindungan di level tegangan lainnya. Konfigurasi ini memungkinkan *relay* yang lebih cepat kemudian dapat dilakukan oleh perangkat pelindung fase yang membutuhkan koordinasi menggunakan nilai *pickup* dan penundaan waktu meluas dari beban ke generator sumber dan sering mengakibatkan penundaan waktu yang cukup lama di beberapa titik dalam sistem, memperbaiki kesalahan tanah yang tidak segera terdeteksi dan dibersihkan dapat merusak.

Sistem yang tidak dikelilingi tidak memiliki koneksi yang disengaja untuk dihidupkan kecuali melalui perangkat indikasi potensial atau pengukuran potensial atau melalui perangkat pelindung lonjakan arus. Sementara sebuah

sistem disebut tanpa-lapisan, sebenarnya digabungkan untuk digiling melalui kapasitansi yang didistribusikan dari belitan fase dan konduktornya. Sistem pentanahan dengan sengaja dibumikan dengan menyambungkan netral ditanahkan atau satu konduktor yang akan baik secara *solid* atau melalui impedansi pembatas arus. Berbagai tingkat pentanahan digunakan mulai dari impedansi padat ke impedansi tinggi, biasanya hambatan.

Setiap jenis landasan memiliki kelebihan dan kekurangan, dan tidak ada satu metode yang diterima secara umum. Faktor-faktor yang memengaruhi pilihan untuk memasukkan tingkat tegangan sistem tenaga, kemungkinan tegangan berlebih transien, jenis peralatan pada sistem, diperlukan kesinambungan layanan, kaliber dan pelatihan personel operasi dan pemeliharaan, metode yang digunakan pada sistem yang ada, ketersediaan titik landasan yang nyaman, biaya peralatan, keselamatan dan tingkat kerusakan kerusakan yang dapat ditoleransi .

B.2 Neutral Grounding Resistors (NGR)

Grounding dapat dikategorikan ke dalam dua kategori umum: *grounding solid* dan *grounding impedansi*. Penumbumian impedansi dapat dibagi lagi menjadi beberapa subkategori: pentanahan reaktansi, pentanahan resistansi, dan pentanahan penetralisiran gangguan-tanah. Untuk penumbumian generator, metode pentanahan dominan adalah pentanahan resistansi (39,4%), diikuti dengan pentanahan *solid* (25,7%) kemudian pentanahan reaktor netral (17,3%).

Menurut *IEEE Std 142™ -2007, Resistance grounded* ditanahkan melalui impedansi, elemen utamanya adalah resistansi. Metode pentanahan ini dapat dibagi

menjadi *High-Resistance Grounded* (HRG) dan *Low-Resistance Grounded* (LRG). HRG adalah sistem *ground-resistance* yang dirancang untuk membatasi arus gangguan tanah ke nilai yang dapat dibiarkan mengalir untuk periode waktu yang lama, sementara masih memenuhi kriteria $R_0 < X_{co}$, sehingga tegangan transien dari gangguan tanah berkurang. Arus gangguan-tanah biasanya terbatas pada kurang dari 10 A, yang mengakibatkan kerusakan terbatas bahkan selama gangguan yang berkepanjangan. Kemudian LRG adalah sistem *ground-resistance* yang memungkinkan arus *ground-fault* yang lebih tinggi mengalir untuk memperoleh arus yang cukup untuk operasi *relay* selektif. Biasanya memenuhi kriteria R_0 / X_0 kurang dari atau sama dengan 2. Arus *ground-fault* biasanya antara 100 A dan 1000 A.

B.3. Konfigurasi Transformator

Gulungan primer dan sekunder dapat dihubungkan di salah satu wye (Y), konfigurasi delta (Δ) atau *wye-grounded* (Y_g). Ini menghasilkan sembilan kemungkinan kombinasi koneksi adalah YY, Y- Y_g , Y- Δ , Y_g -Y, Y_g -Y, Y_g - Δ -, Δ -Y, Δ - Y_g dan Δ - Δ . Impedansi urutan-nol terlihat melihat ke dalam transformator tergantung pada konfigurasi belitan. Impedansi urutan-nol dari belitan Δ tidak terbatas, sedangkan impedansi urutan-nol dari belitan terhubung-Y adalah seri gabungan dari impedansi urutan-nol dari transformator dan impedansi dari setiap perangkat pentanahan netral yang mungkin ada. Dengan demikian, lilitan Y yang tidak dilingkari akan menghadirkan impedansi urutan nol yang tak terbatas karena tidak adanya koneksi pentanahan netral muncul

sebagai rangkaian terbuka secara seri dengan impedans urutan-nol dari belitan transformator itu sendiri.

Rangkaian ekuivalen untuk impedansi urutan nol tergantung pada koneksi belitan dan juga pada apakah netral ditanahkan atau tidak. Gambar 2.1 menunjukkan koneksi diagram dari beberapa konfigurasi transformator dan rangkaian ekuivalen urutan nol.

Dalam koneksi Yg-Yg, karena kedua netral ditanahkan, ada jalur untuk arus urutan nol mengalir di primer dan sekunder. Dalam koneksi Yg-Y, jumlah arus fase sekunder adalah nol karena netral sekunder terisolasi. Untuk koneksi Yg- Δ , arus primer dapat mengalir karena ada arus sirkulasi urutan nol di jalur balik sekunder dan arde yang terhubung untuk primer yang terhubung-Y. Dalam Y- Δ , arus deret nol tidak dapat mengalir dan sirkuit ekuivalennya mencerminkan impedansi tak terbatas karena netral diisolasi.

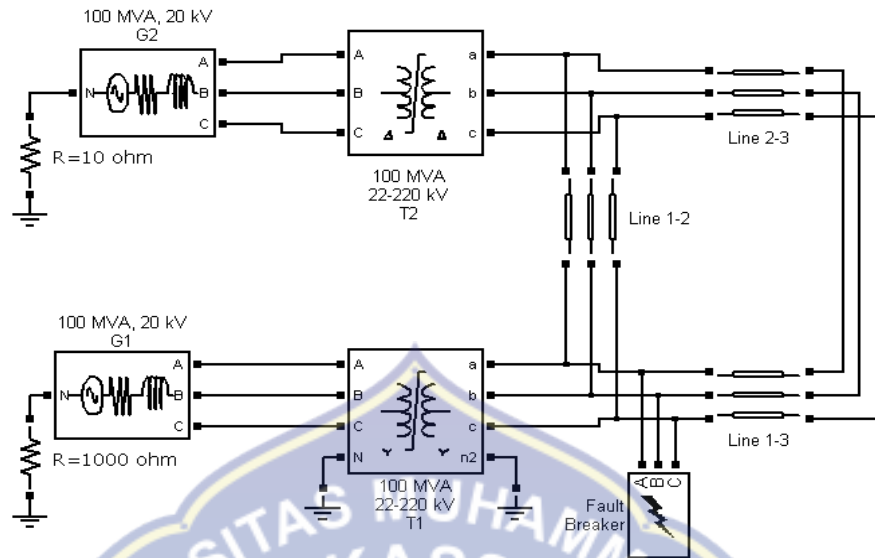
Komponen urutan nol dari arus dapat mengalir melalui transformator terhubung Yg-Yg jika ada jalur netral di kedua sisi transformator. Contoh ditunjukkan pada Gambar 2.1 Di mana transformator terhubung Δ -Yg, T1, memasok daya ke transformator terhubung Yg-Yg, T2. Kesalahan pada sisi beban T2 menghasilkan arus urutan nol, yang mengalir pada belitan primer dan sekunder transformator itu. Arus urutan nol diizinkan untuk mengalir di primer T2 karena jalur ada di transformator terhubung Δ -Yg T1. Melepaskan setiap netral transformator, pada T1 atau T2, akan mencegah aliran arus urutan-nol pada kedua transformator, kecuali jika diizinkan oleh *magnetisasi reactansi*. Tergantung pada

koneksi ke transformator, penggunaan transformator Yg-Yg dapat menghasilkan sistem tunggal, atau sisi bebannya mungkin merupakan sistem turunan terpisah.

Simbol Diagram Sambungan Sirkuit urutan-nol



Gambar 2.1 Diagram koneksi dan sirkuit setara urutan-nol



Gambar 2.2 Satu diagram garis untuk simulasi

C. Transformator

Transformator atau lebih dikenal dengan nama “transformer” atau “trafo” sejatinya adalah suatu peralatan listrik yang mengubah daya listrik AC pada satu level tegangan yang satu ke level tegangan berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik tanpa merubah frekuensinya. Transformator biasa digunakan untuk mentransformasikan tegangan (menaikkan atau menurunkan tegangan AC). Selain itu, transformator juga dapat digunakan untuk sampling tegangan, sampling arus, dan juga mentransformasi impedansi. Transformator terdiri dari dua atau lebih kumparan yang membungkus inti besi feromagnetik. Kumparan-kumparan tersebut biasanya satu sama lain tidak dihubungkan secara langsung. Kumparan yang satu dihubungkan dengan sumber listrik AC (kumparan primer) dan kumparan yang lain mensuplai listrik ke beban (kumparan sekunder). Bila terdapat lebih dari dua kumparan maka kumparan tersebut akan disebut sebagai kumparan tersier, kuarter, dst. (Aslimeri, dkk, 2008)

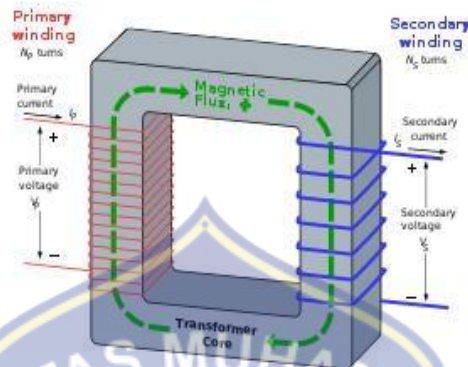
Transformator bekerja berdasarkan prinsip elektromagnetik. Ketika kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, perubahan arus listrik pada kumparan primer menimbulkan perubahan medan magnet. Medan magnet yang berubah diperkuat oleh adanya inti besi. Inti besi berfungsi untuk mempermudah jalan *fluks* yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan, sehingga *fluks* magnet yang ditimbulkan akan mengalir ke kumparan sekunder, sehingga pada ujung-ujung kumparan sekunder akan timbul ggl induksi. Efek ini dinamakan induktansi timbal-balik (*mutuallinductance*). Bila pada rangkaian sekunder ditutup (rangkaiannya beban) maka akan mengalir arus pada kumparan sekunder. Jika efisiensi sempurna (100%), semua daya pada lilitan primer akan dilimpahkan ke lilitan sekunder.

C.1 Prinsip Kerja Transformator

Transformator merupakan suatu alat listrik statis yang dipergunakan untuk memindahkan daya dari satu rangkaian ke rangkaian lain, dengan mengubah tegangan, tanpa mengubah frekuensi. Dalam bentuknya yang paling sederhana transformator terdiri atas dua kumparan dan satu induktansi mutual. Kumparan primer adalah yang menerima daya, dan kumparan sekunder tersambung pada beban. Kedua kumparan dibelit pada suatu inti yang terdiri atas material magnetik berlaminasi.²

Transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Tegangan masukan bolak-balik yang membentangi primer menimbulkan *fluks* magnet yang idealnya semua bersambung dengan lilitan sekunder. *Fluks* bolak-

balik ini menginduksikan GGL dalam lilitan sekunder. Jika efisiensi sempurna, semua daya pada lilitan primer akan dilimpahkan kelilitan sekunder.



Gambar 2.3 Prinsip Kerja Transformator

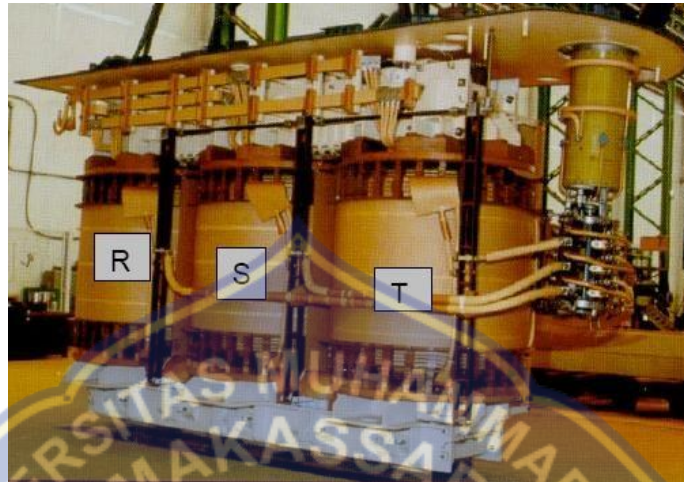
C.2. Komponen Transformator

Komponen transformator terdiri dari dua bagian, yaitu peralatan utama dan peralatan bantu. Peralatan utama transformator terdiri dari:

C.2.1. Kumputan Trafo

Kumputan trafo terdiri dari beberapa lilitan kawat tembaga yang dilapisi dengan bahan isolasi (karton, pertinax, dll) untuk mengisolasi baik terhadap inti besi maupun kumputan lain. Untuk trafo dengan daya besar lilitan dimasukkan dalam minyak trafo sebagai media pendingin. Banyaknya lilitan akan menentukan besar tegangan dan arus yang ada pada sisi sekunder. Kadang kala transformator memiliki kumputan tertier. Kumputan tertier diperlukan untuk memperoleh tegangan tertier atau untuk kebutuhan lain. Untuk kedua keperluan tersebut, kumputan tertier selalu dihubungkan delta. Kumputan tertier sering juga untuk

dipergunakan penyambungan peralatan bantu seperti kondensator *synchrone*, kapasitor *shunt* dan *reactor shunt*.



Gambar2.4 Kumparan Transformator

C.2.2. Inti Besi

Dibuat dari lempengan-lempengan feromagnetik tipis yang berguna untuk memper mudah jalan *fluksi* yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Inti besi ini juga diberi isolasi untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh arus eddy“EddyCurrent”.



Gambar 2.5 Inti Besi

C.2.3. Minyak Trafo

Berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi. Minyak trafo mempunyai sifat media pemindah panas (disirkulasi) dan mempunyai daya tegangan tembus tinggi. Pada power transformator, terutama yang berkapasitas besar, kumparan-kumparan dan inti besi transformator direndam dalam minyak trafo. Syarat suatu cairan bisa dijadikan sebagaiminyak trafo adalah sebagai berikut:

1. Ketahanan isolasi harus tinggi ($>10\text{kV/mm}$).
2. Berat jenis harus kecil, sehingga partikel-partikel *inert* di dalam minyak dapat mengendap dengan cepat.
3. Viskositas yang rendah agar lebih mudah bersirkulasi dan kemampuan pendinginan menjadi lebih baik.
4. Titik nyala yang tinggi, tidak mudah menguap yang dapat membahayakan.
5. Tidak merusak bahan isolasi padat.
6. Sifat kimia yang stabil.

C.2.3. Bushing

Sebuah konduktor (porselin) yang menghubungkan kumparan transformator dengan jaringan luar. *Bushing* diselubungi dengan suatu isolator dan berfungsi sebagai konduktor tersebut dengan tangki transformator. Selain itu juga *bushing* juga berfungsi sebagai pengaman hubung singkat antara kawat yang bertegangan dengan tangki trafo.

C.2.4. Tangki dan Konservator

Pada umumnya bagian-bagian dari trafo yang terendam minyak trafo ditempatkan di dalam tangki baja. Tangki trafo-trafo distribusi umumnya dilengkapi dengan sirip-sirip pendingin (*cooling fin*) yang berfungsi memperluas permukaan dinding tangki, sehingga penyaluran panas minyak pada saat konveksi menjadi semakin baik dan efektif untuk menampung pemuaiannya minyak trafo, tangki dilengkapi dengan konservator.

C.3 Transmisi Daya Listrik Jarak Jauh

Pembangkit listrik biasanya dibangun jauh dari permukiman penduduk. Proses pengiriman daya listrik kepada pelanggan listrik (konsumen) yang jaraknya jauh disebut transmisi daya listrik jarak jauh. Untuk menyalurkan energi listrik ke konsumen yang jauh, tegangan yang dihasilkan generator pembangkit listrik perlu dinaikkan mencapai ratusan ribu volt. Untuk itu, diperlukan trafo *step up*. Tegangan tinggi ditransmisikan melalui kabel jaringan listrik yang panjang menuju konsumen. Sebelum masuk kerumah-rumah penduduk tegangan diturunkan menggunakan trafo *step down* hingga menghasilkan 220 Volt. Transmisi daya listrik jarak jauh dapat dilakukan dengan menggunakan tegangan besar dan arus yang kecil. Dengan cara itu akan diperoleh beberapa keuntungan, yaitu energi yang hilang dalam perjalanan dapat dikurangi dan kawat penghantar yang diperlukan dapat lebih kecil serta harganya lebih murah.

C.4. Pemeliharaan Gardu Trafo Tiang (GTT)

Tenaga Listrik merupakan suatu kebutuhan pokok bagi masyarakat saat ini, oleh karena itu tenaga listrik harus dapat tersedia secara terus-menerus dengan mutu dan keadaan yang tinggi, untuk dapat tercapainya hal tersebut salah satu usaha adalah dengan tetap terpeliharanya instalasi sistem tenaga listrik di sisi pembangkitan, penyaluran dan distribusinya. Sebagaimana peralatan pada umumnya, peralatan yang operasi dalam instalasi tenaga listrik perlu dipelihara, hal ini bertujuan untuk mempertahankan unjuk kerja peralatan tersebut, terpeliharanya instalasi tenaga listrik dengan baik dapat mempertahankan mutu dan kendala penyaluran tenaga listrik.

Gardu Trafo Tiang (GTT) adalah salah satu komponen instalasi tenaga listrik yang terpasang di jaringan distribusi berfungsi sebagai trafo daya penurun tegangan dari tegangan menengah ke tegangan rendah, dan selanjutnya tegangan rendah tersebut disalurkan ke konsumen. Mengingat fungsi dan harga dari trafo tersebut cukup mahal bila dibandingkan dengan peralatan distribusi lainnya, maka pemeliharaan preventif yang dilakukan secara intensif, dengan kriteria pemeliharaan yang jelas untuk setiap komponen GTT dan ditangani oleh tenaga yang terampil dengan peralatan yang memadai agar pemeliharaan tersebut berjalan dengan efektif. (Suhadi, dkk, 2008)

C.4.1. Komponen Utama Gardu Trafo Tiang (GTT)

Secara umum komponen utama Gardu Trafo Tiang (GTT) adalah sebagai berikut:

1. **Transformator:** berfungsi sebagai trafo daya merubah tegangan menengah (20 kV) menjadi tegangan rendah (380/200) Volt.
2. **Fuse Cut Out (FCO):** sebagai pengaman penyulang, bila terjadi gangguan di gardu (trafo) dan melokalisir gangguan di trafo agar peralatan tersebut tidak rusak. FCO di pasang pada sisi tegangan menengah (20 kV).
3. **Arrester:** sebagai pengaman trafo terhadap tegangan lebih yang disebabkan oleh sambaran petir dan *switching* (SPLN se.002/PST/73).
4. **NH Fuse:** sebagai pengaman trafo terhadap arus lebih yang terpasang disisi tegangan rendah (220 Volt), untuk melindungi trafo terhadap gangguan arus lebih yang disebabkan karena hubung singkat di jaringan tegangan rendah maupun karena beban lebih.
5. **Grounding Arrester:** untuk menyelurkan arus ke tanah yang disebabkan oleh tegangan lebih karena sambaran petir dan *switching*.
6. **Grounding Trafo:** untuk menghindari terjadi tegangan lebih pada fase yang sehat bila terjadi gangguan satu fase ke tanah maupun yang disebutkan oleh beban tidak seimbang.

C.5. Simbol Transformator

1. Transformator *step up* yaitu transformator yang mengubah tegangan bolak-balik rendah menjadi tinggi, transformator ini mempunyai jumlah lilitan kumparan sekunder lebih banyak daripada jumlah lilitan primer ($N_s > N_p$).

2. Transformator *step down* yaitu transformator yang mengubah tegangan bolak-balik tinggi menjadi rendah, transformator ini mempunyai jumlah lilitan kumparan primer lebih banyak daripada jumlah lilitan sekunder ($N_p > N_s$).

Pada transformator (trafo) besarnya tegangan yang dikeluarkan oleh kumparan sekunder adalah:

1. Sebanding dengan banyaknya lilitan sekunder ($V_s \sim N_s$).
2. Sebanding dengan besarnya tegangan primer ($V_s \sim V_p$).
3. Berbanding terbalik dengan banyaknya lilitan primer,

$$\left(V_s \sim \frac{1}{N_p} \right)$$

Sehingga dapat dituliskan:

$$V_s = \frac{N_s}{N_p} \times V_p$$

D. Perangkat Lunak PSCAD/EMTDC

PSCAD adalah antar muka pengguna grafis yang kuat dan fleksibel untuk mesin solusi *EMTDC* yang terkenal di dunia. *PSCAD* memungkinkan pengguna untuk membuat skematis sirkuit, 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 filosofi dasar 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. mendukung model yang ditulis dalam bahasa FORTRAN/C (Wilson, P.L.).

D.1. Studi Tipikal *PSCAD/EMTDC*

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*:

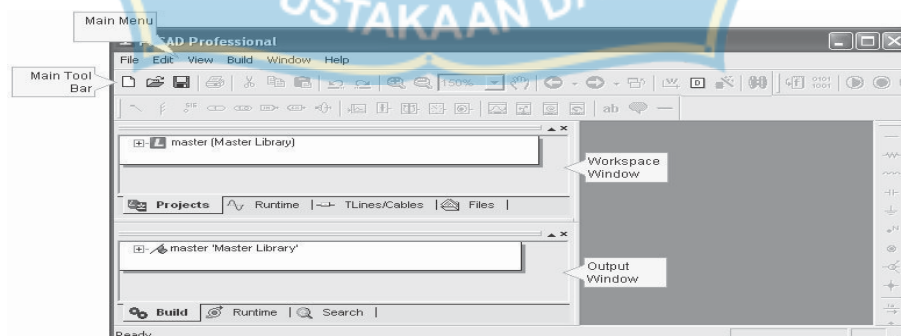
- a. Studi kontijensi jaringan AC yang terdiri dari mesin berputar, *exciters*, *governor*, turbin, *transformer*, jalur transmisi, kabel, dan muatan.
- b. Relai koordinasi.
- c. Efek saturasi trafo.
- d. Koordinasi isolasi transformator, pemutus dan penangkap.
- e. Pengujian *impuls transformer*.
- 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) Corp Entergi*. 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).

D.2. Mengenal dan Menjalankan *PSCAD*

Untuk memulai *PSCAD*, pergi ke *Start - Program - PSCAD* di menu mulai *windows*, dan pilih edisi *PSCAD* mana saja yang anda lisensinya. Ini akan membuka lingkungan utama *PSCAD*, seperti yang ditunjukkan di bawah ini (Muller, 2005).



Gambar 2.6 Lingkungan Utama *PSCAD* (Muller, 2005)

Anda harus melihat daftar item dibagian atas lingkungan (File, Edit, dll.). Barang-barang ini adalah bagian dari Menu Utama. Tombol-tombol langsung di bawah menu utama adalah bagian dari *Toolbar* Utama (Muller, 2005).

D.2.1. Title, Menu and Main Tool Bar.

Gambar di bawah ini menunjukkan Judul *PSCAD V4* dan Bilah Menu



Gambar 2.7 Title, Menu and Main Tool Bar. PSCAD (Muller, 2005)

D.2.2. Title Bar and Active Project

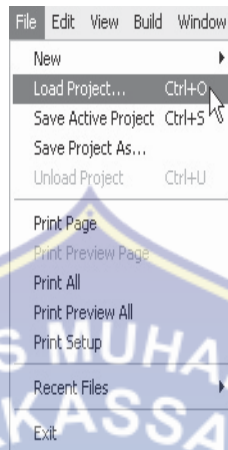
Bagian paling atas dari jendela yang menampilkan *PSCAD [Edition]* disebut Bilah Judul, bar judul juga akan mencakup halaman Proyek yang saat ini sedang dilihat di Editor Desain, setelah Proyek dibuka. (Muller, 2005).

D.2.3. Menu Bar and Menu Items

Area di bawah *Title Bar*, yang terdiri dari item menu dan tombol menu, disebut Menu Utama. Semua item menu utama adalah menu *drop-down*, jadi ketika Anda klik kiri dengan penunjuk mouse Anda di atas salah satu menu ini, Anda akan melihat daftar yang muncul di bawahnya (Muller, 2005).

Untuk memilih item dari daftar ini, pertama-tama pindahkan penunjuk ke item itu (item menjadi terangkat) lalu klik tombol kiri mouse. Menu berikut

menunjukkan cara memuat proyek menggunakan menu File dari bilah Menu Utama (Muller, 2005).



Gambar 2.8 Menu File dari Bilah Menu Utama PSCAD (Muller, 2005)

D.2.4. *Toolbar Buttons*

Deretan tombol langsung di bawah bilah Menu Utama terdiri dari bilah Alat Utama.

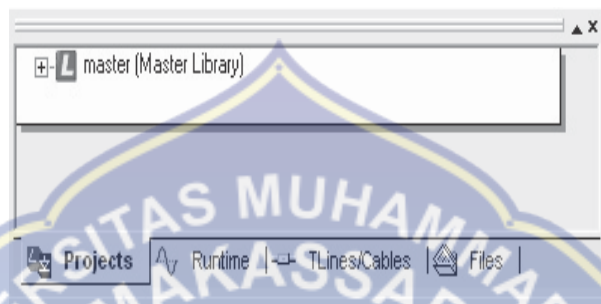


Gambar 2.9 *Toolbar Buttons* PSCAD (Muller, 2005)

Sementara item menu adalah proses dua tahap, *toolbar* menawarkan alternatif satu-klik. Tombol bilah alat utama memulai tindakan segera setelah anda mengkliknya dan karena itu akan lebih mudah digunakan. Untuk alasan ini, operasi yang paling sering digunakan memiliki tombol *toolbar* yang setara (Muller, 2005).

D.2.5. *Workspace and Output Windows*

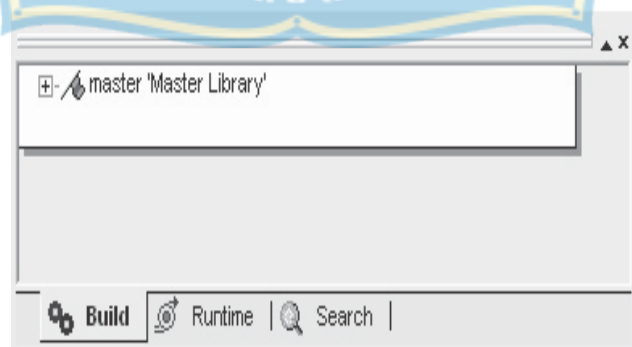
Jika Anda melihat sudut kiri atas lingkungan *PSCAD*, anda akan melihat jendela yang lebih kecil yang disebut sebagai jendela Ruang Kerja. Jika tidak terlihat, buka bilah menu utama dan klik *View - Workspace* (Muller, 2005).



Gambar 2.10 Jendela Ruang Kerja *PSCAD* (Muller, 2005)

Ruang Kerja memberi Anda pandangan menyeluruh tentang pustaka dan/atau proyek kasus apa pun yang dimuat. Anda dapat menggunakannya untuk memilih komponen dan melakukan banyak kegiatan lainnya (Muller, 2005).

Tepat di bawah jendela *Workspace* atau Ruang Kerja, Anda akan melihat jendela lain yang disebut sebagai jendela *Output*. Jika jendela *Output* tidak terlihat, klik pada *View -Output* (Muller, 2005).



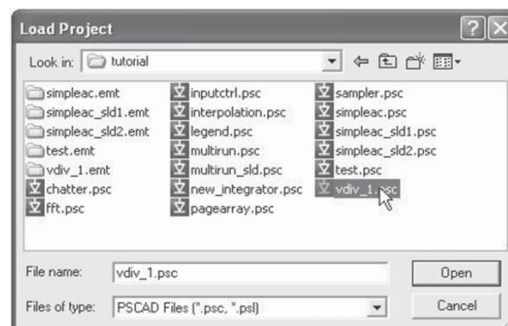
Gambar 2.11 Jendela Keluaran/*Output PSCAD* (Muller, 2005)

Semua status, peringatan, dan pesan kesalahan yang terlibat dalam prosedur *Build* dan *Runtime* akan dicatat dalam jendela ini, jadi merupakan ide yang baik untuk menjaga jendela ini tetap terbuka dan terlihat setiap saat (Mulle, 2005).

Kedua jendela *Workspace* dan *Output* didasarkan pada struktur jenis pohon, di mana cabang dapat diperluas dan dicituk sesuka hati (Muller, 2005).

D.2.6. Loading a Case Project

Kami akan mulai dengan contoh kasus yang paling sederhana untuk tutorial ini. Latihan ini akan membantu kami memastikan bahwa *PSCAD* dan kompiler Fortran yang digunakan dipasang dengan benar. Untuk memuat Proyek Kasus yang ada, klik pada File dari bilah Menu Utama dan pilih Muat Proyek. Anda juga dapat menekan **Ctrl + O** atau klik tombol Muat di Bilah Alat Utama atau *Main Tool Bar*. Anda akan melihat dialog *Load Project* muncul di layar Anda. Secara *default*, jenis file yang dipilih adalah 'File *PSCAD* (*.psc, .psl)' di bagian bawah dialog. Dengan jenis file yang dipilih, Anda hanya akan melihat file Proyek *PSCAD* yang memiliki ekstensi dan direktori '*.psc' atau '* .psl'. Ekstensi file terdiri untuk *pscad case* atau pustaka *PSCAD* (Muller, 2005).



Gambar 2.12 Memuat Proyek *PSCAD* (Muller, 2005)

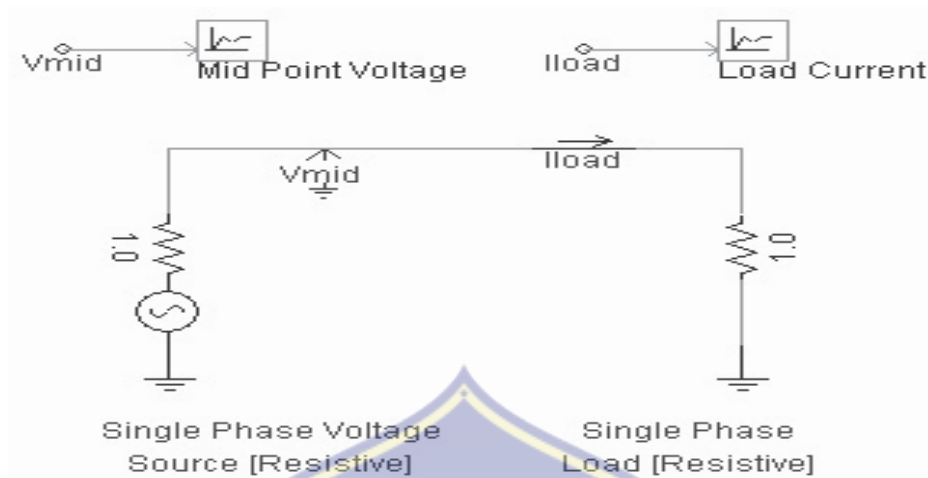
Arahkan ke direktori ‘tutorial’ di dalam direktori instalasi *PSCAD* Anda (yaitu C:\ProgramFiles\PSCAD4xx\examples\tutorial). Klik pada file ‘vdiv_1.psc’ dan kemudian klik tombol Open untuk memuat Proyek Kasus ini ke *PSCAD*(Muller, 2005).

Jendela Ruang Kerja sekarang akan mendaftarkan proyek kedua yang berjudul ‘vdiv_1 (Pembagi Tegangan Fase Tunggal) langsung di bawah Daftar Perpustakaan Utama. Klik dua kali pada judul Proyek (atau klik kanan dan pilih Buka) di jendela *Workspace* untuk membuka dan melihat halaman utama Proyek di jendela *Sirkuit Editor Desain* (Muller, 2005).



Gambar 2.13 Membuka Proyek PSCAD (Muller, 2005).

Anda harus melihat sirkuit pembagi tegangan yang dirakit seperti ditunjukkan di bawah ini, yang terletak di sudut kiri atas halaman utama proyek yang baru saja Anda buka. Petak terletak langsung di sebelah kanan sirkuit (Muller, 2005).



Gambar 2.14 Contoh Sederhana Rangkaian yang Dibuat dalam PSCAD (Muller, 2005).

Sirkuit ini terdiri dari sumber tegangan resistif fase tunggal yang terhubung ke beban resistif. Karena besarnya resistansi sumber (1Ω) dan resistansi beban sama, tegangan (Muller, 2005).

Diterminal beban setengah dari tegangan di belakang resistansi sumber. Tegangan ini diukur menggunakan voltmeter yang disebut 'Vmid' yang terhubung ke simpul antara sumber dan beban. Arus di sirkuit harus:

$$I_{\text{load}} = \frac{E}{R_s + R_L}$$

(Muller, 2005).

Plot dan grafik akan berisi nilai-nilai tegangan pada titik tengah sirkuit, dan arus yang mengalir melalui rangkaian saat proyek dijalankan (Muller, 2005).

D.2.7. *Printing the Circuit*

Untuk mencetak rangkaian bersama dengan grafik yang baru saja Anda simulasikan, klik tombol kanan mouse di latar belakang halaman rangkaian utama dan pilih item *Print Page* atau item *Print Preview Page* (Muller, 2005).



Gambar 2.15 Menu untuk Mencetak Rangkaian dan Grafik PSCAD

Ini harus memunculkan dialog *Print* atau *Print Preview Viewer*. Isi dialog *Print* tergantung pada apa yang Anda cetak - klik tombol OK untuk melanjutkan. *Print Preview Page* memungkinkan Anda untuk melihat halaman Anda sebelum mencetak (Muller, 2005).

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode untuk menganalisis kinerja berbagai resistor pentanahan netral dan koneksi transformator selama gangguan *line-to-ground* (SLG) tunggal, diagram garis tunggal untuk simulasi model seperti yang diilustrasikan dalam Gambar 4.1.

A. Waktu dan Tempat Penelitian

Waktu : April hingga Mei 2019

Tempat : PLTU Jenepono

B. Alat dan Bahan

1. Alat

Adapun alat yang digunakan pada penelitian ini adalah:

a. Laptop ASUS i3 X455LF dengan spesifikasi:

Prosesor : Intel ® Celeron ® N4000

Prosesor Grafis : Intel HD Graphics

Memori RAM : 4 GB DDR3.

Memori Harddisk : 500 GB.

Sistem Operasi : Windows10 Pro 64-bit.

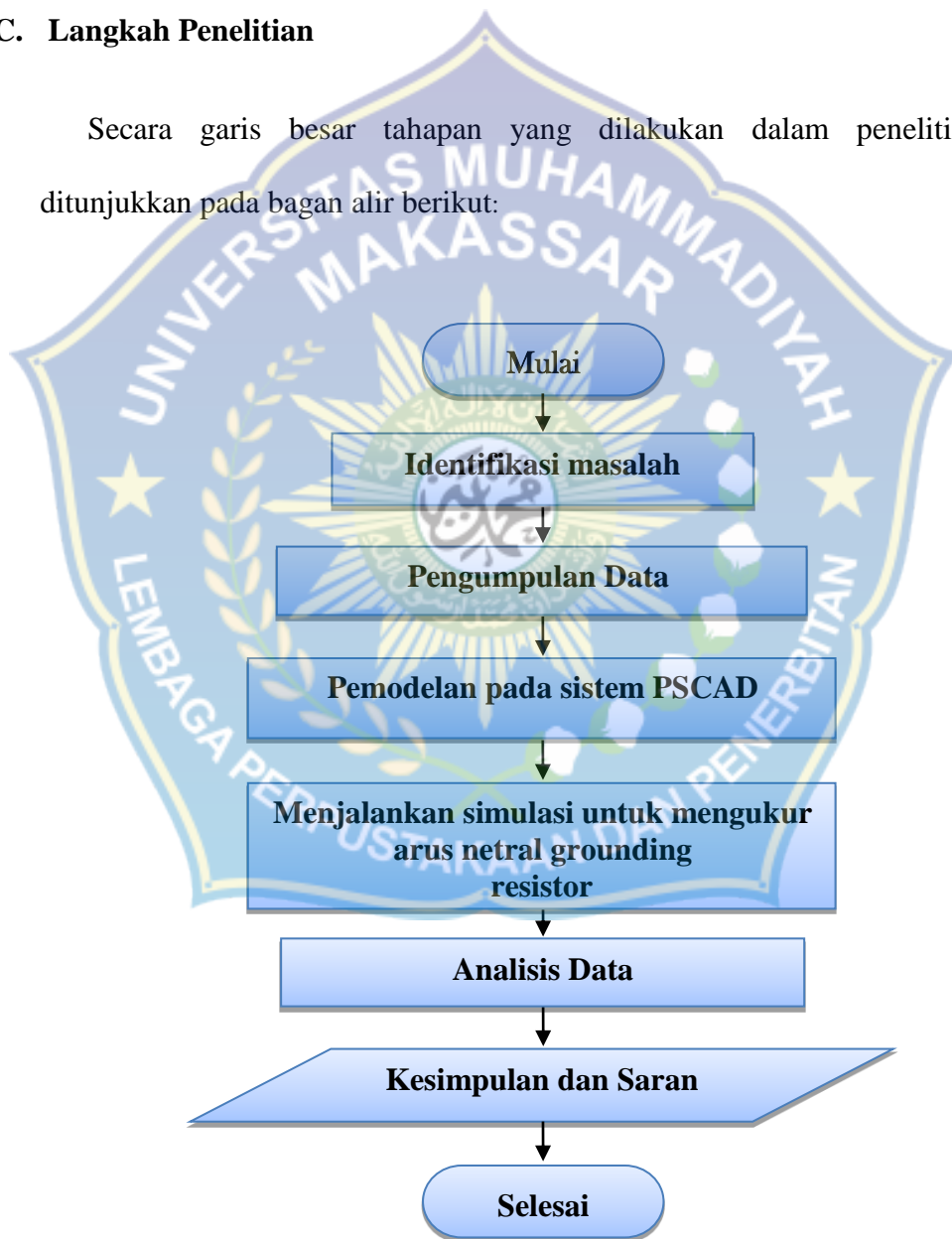
b. Perangkat Lunak *Power System Computer Aided Design (PSCAD) Student version.*

2. Bahan

Adapun bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah buku serta jurnal yang terlampir pada daftar pustaka. Data generator dan data trafo dari PLTU Punagaya, serta data sistem / jaringan dari asumsi.

C. Langkah Penelitian

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



Gambar 3.1 Bagan alur proses penelitian



Gambar 3.2 Bagan Simulasi PSCAD

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pemodelan Sistem arus Gangguan satu Fase Ke tanah menggunakan *Software PSCAD*

Menganalisis kinerja dari resistor pentanahan netral dan koneksi transformator selama gangguan *line-to-ground* (SLG) tunggal, diagram segaris untuk simulasi model seperti yang diilustrasikan dalam Gambar 4.1 Berikut ini adalah parameter sistem untuk pengujian model:

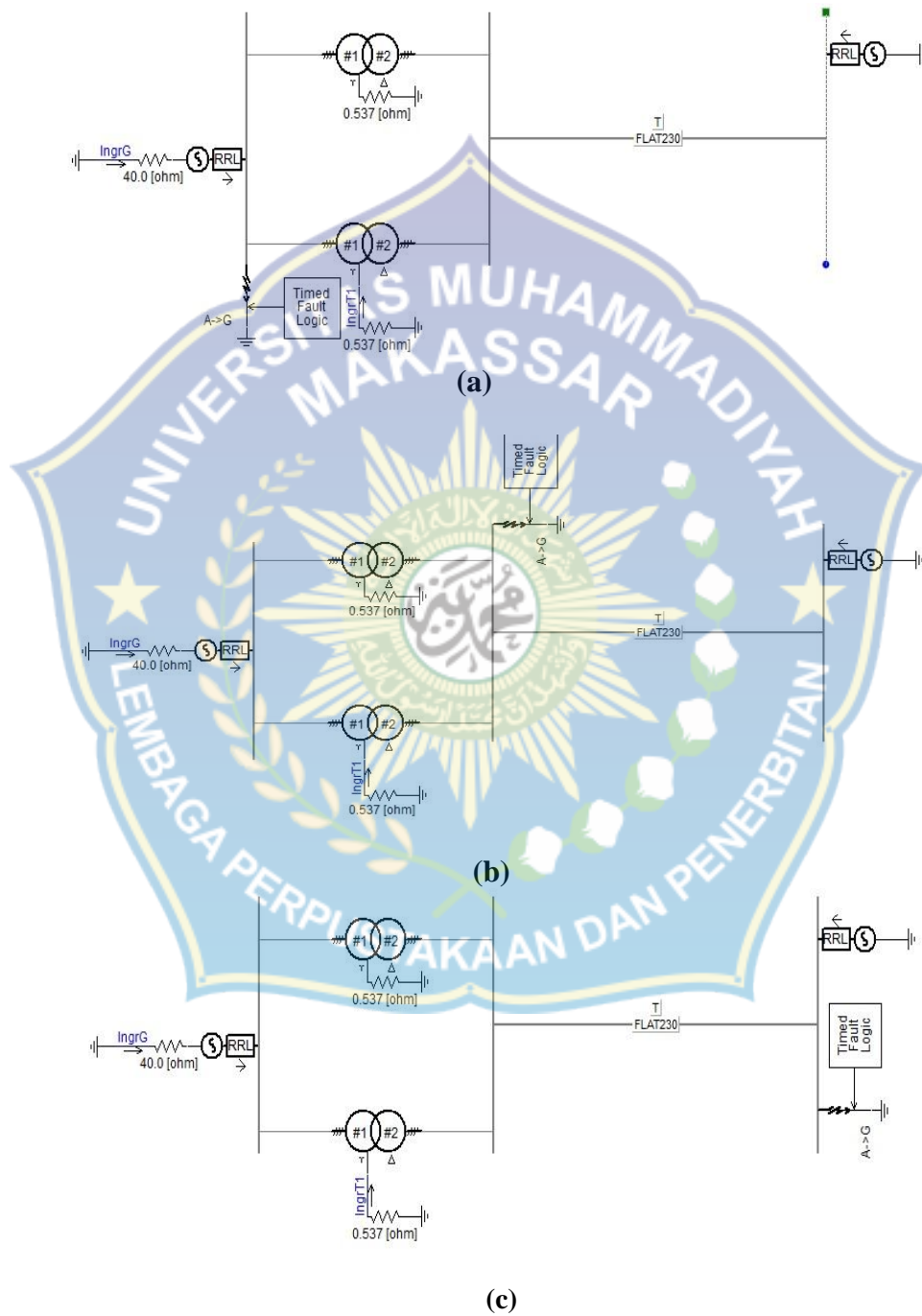
Tabel 4.1 Parameter sistem pengujian

Nama	Nilai
GI PLTU Punagaya	161,177 MVA
Frekuensi	50 Hz
Trafo 1 = Trafo 2	150 MVA ; 13,8 / 220 kv
Saluran Transmisi	220 kv
Panjang Saluran Transmisi	12.25 Km
Resistor Generator	40 (Ω)
Resistor Trafo	0,537 (Ω)

Parameter yang disesuaikan adalah sebagai berikut:

- Jenis koneksi transformator untuk membumikan resistansi pentanahan. Jenis-jenis koneksi transformator adalah Y- Δ , dan simulasi Y-Y dan Y- Δ dua fase.
- Nilai resistansi gangguan saat menghitung arus untuk gangguan *line-to-ground* generator adalah 40 ohm. Nilai umum dari gangguan yang digunakan adalah 1 hingga 2, 10, 20, 30, dan 40 Ω .

Simulasi yang akan dilakukan pada tiga titik arus gangguan dan melakukan pengaturan nilai yang berbeda pada *grounding* arus gangguan. Berikut gambar rangkaian yang digunakan di bawah ini yaitu:



Gambar 4.1 Rangkaian Simulasi PSCAD V 4.2.0 Student version (a) Arus gangguan di GI 1, (b) Arus gangguan di GI 2, (c) Arus gangguan di GI 3

B. Hasil simulasi transformator Y- Δ

B.1. Arus Gangguan di GI 1

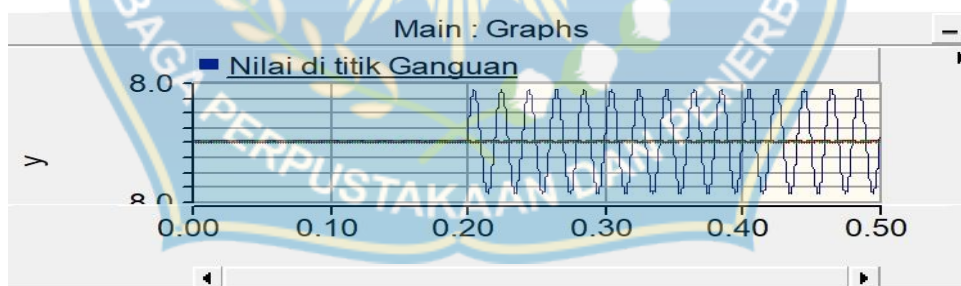
Dari hasil simulasi pada arus gangguan di GI 1 yang diukur adalah titik gangguan, arus yang mengalir pada generator, arus yang mengalir pada trafo dengan nilai NGR 40 ohm dan menggunakan resistansi pentanahan pada gangguan yaitu 2, 10, 20, 30 dan 40 Ω dapat dilihat sebagai berikut :

Tabel 4.2 Hasil simulasi arus gangguan satu fase ke tanah di GI 1

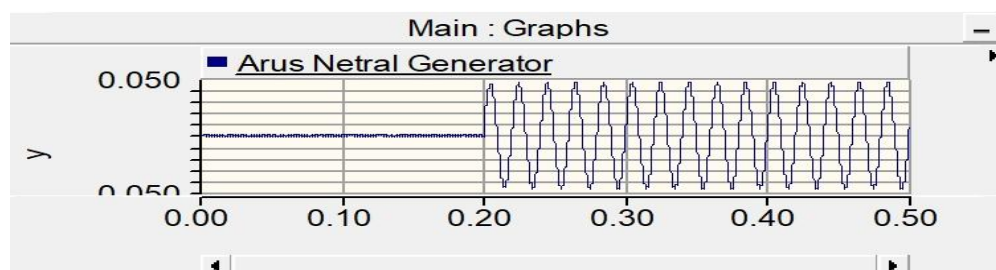
No.	Nilai Resistansi (Ω)	Arus di Titik Gangguan (kA)	Arus NGR Generator (kA)	Arus NGR Trafo (kA)
1	2	4,936	0,033	2,452
2	10	1,085	0.007	0.542
3	20	1.091	0.347	0.542
4	30	0,366	0.024	0.184
5	40	0,277	0.018	0.138

Berikut bentuk gelombang dari hasil simulasi dari berbagai resistansi gangguan :

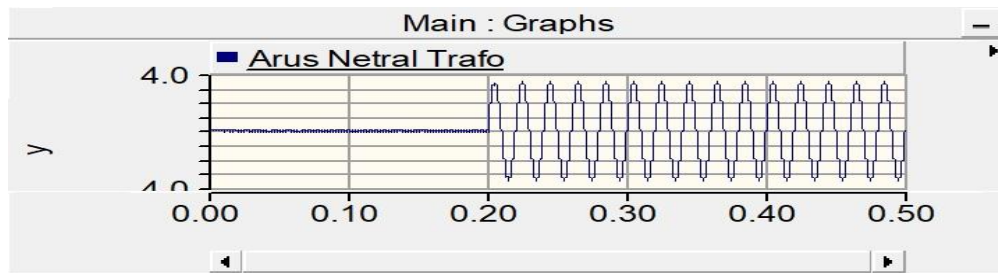
- Gangguan terjadi pada resistansi 2 Ω



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.2 Gelombang arus dan gangguan satu fase ke tanah $R_f = 2 \Omega$; (a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c) tampilan arus netral trafo.

Hasil simulasi arus gangguan di GI 1 yang ditampilkan pada grafik diatas A, B dan C pada Gambar 4.2 yang mana sumbu Y adalah Nilai arus dan sumbu X adalah waktu yg digunakan (detik). Dimana terlihat pada penggunaan resistansi 2 ohm terdapat nilai di titik gangguan sebesar 4,936 kA, nilai pada arus netral generator yaitu 0,033 kA dan nilai arus netral trafo yaitu 2,452 dan pada resistansi 10 ohm memiliki penurunan arus gangguan yang cukup besar dengan nilai 1,085 kA. Pada arus netral generator memili arus yang lebih kecil dari pada arus trafo.

B.2. Arus Gangguan di GI 2

Dari hasil simulasi pada arus gangguan di GI 2 yang diukur adalah titik gangguan, arus yang mengalir pada NGR generator, arus yang mengalir pada trafo dengan nilai NGR 40 ohm dan menggunakan resistansipentanahan pada gangguan yaitu 2, 10, 20, 30 dan 40 Ω dapat dilihat sebagai berikut :

Tabel 4.3 Hasil simulasi arus gangguan satu fase ke tanah di GI 2

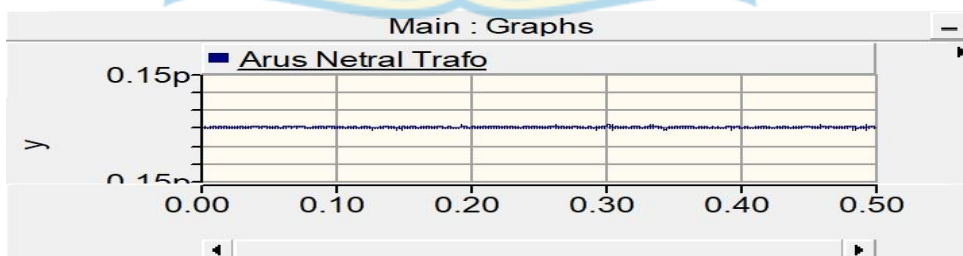
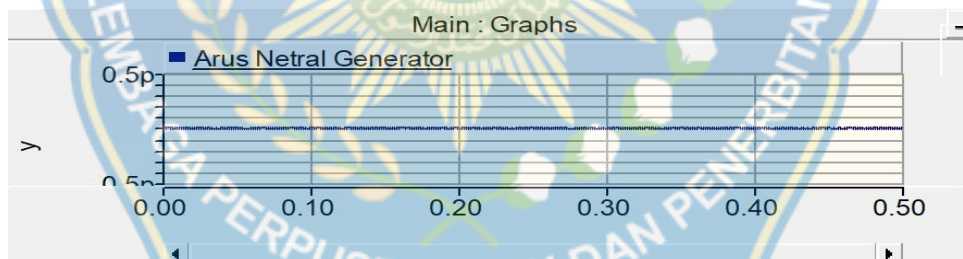
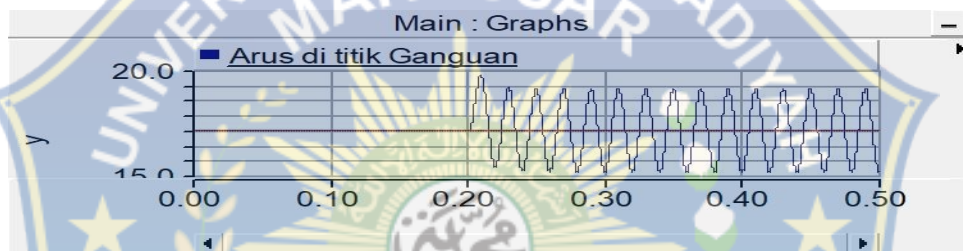
No.	Nilai Resistansi (Ω)	Arus di Titik Gangguan (kA)	Arus NGR Generator (kA)	Arus NGR Trafo (kA)
1	2	12,873	0	0
2	10	6,706	0	0
3	20	4.321	0	0
4	30	3,081	0	0
5	40	2,404	0	0

Keterangan :

- Nilai arus yang mengalir pada generator dan trafo $10^{-12} \sim 0$

Berikut salah satu bentuk gelombang dari hasil simulasi dari berbagai resistansi gangguan :

a. Gangguan terjadi pada resistansi 2Ω



(c)

Gambar 4.3 Gelombang arus dan gangguan internal satu fase ke tanah $R_f = 2 \Omega$; (a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c) tampilan arus netral trafo

Hasil simulasi arus gangguan di GI 2 yang ditampilkan pada grafik A, B dan C pada Gambar 4.3 yang mana sumbu Y adalah nilai arus dan sumbu X adalah waktu yang digunakan (detik). Terlihat pada penggunaan resistansi 2 ohm di titik gangguan. Pada arus tertinggi pada gelombang maka diambil nilai RMS dengan cara nilai arus tertinggi diambil kemudian di bagi $\sqrt{2}$ sehingga menghasilkan nilai arus sebesar 12,873 kA. Sedangkan untuk nilai pada generator terhitung sangat kecil berada pada satuan pico (10^{-12}) atau sama dengan nol.

B.3. Arus Gangguan di GI 3

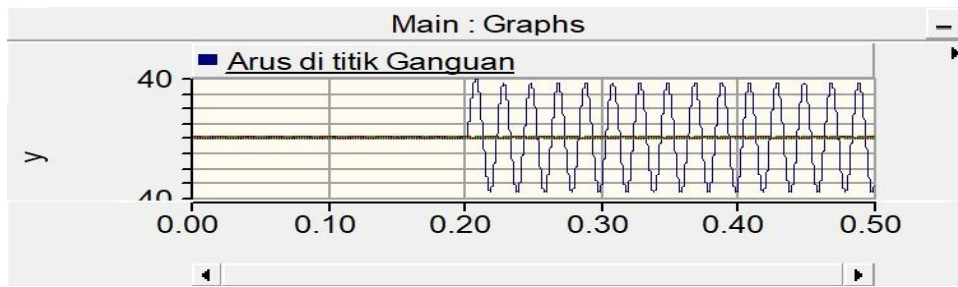
Dari hasil simulasi pada arus gangguan di GI 3 yang diukur adalah titik gangguan, arus yang mengalir pada generator, arus yang mengalir pada trafo dengan nilai NGR 40 ohm dan menggunakan resistansi pentanahan pada gangguan yaitu 2, 10, 20, 30 dan 40 Ω dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 4.4 Hasil simulasi arus gangguan satu fase ke tanah di GI 3

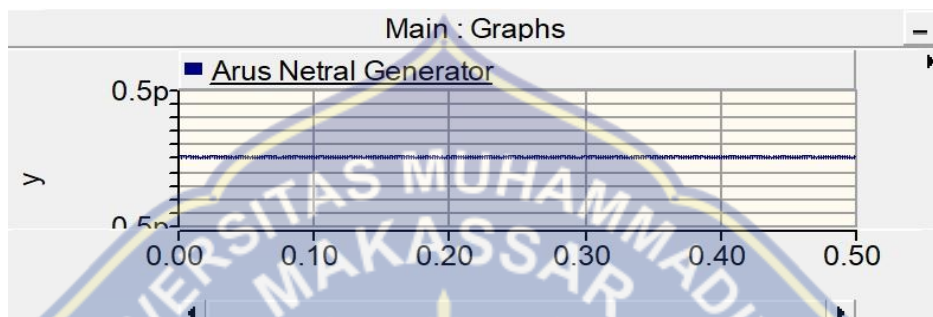
No.	Nilai Resistansi (Ω)	Arus di Titik Gangguan (kA)	Arus NGR Generator (kA)	Arus NGR Trafo (kA)
1	2	27,824	0	0
2	10	8,569	0	0
3	20	4,468	0	0
4	30	3,019	0	0
5	40	2,267	0	0

Berikut bentuk gelombang dari hasil simulasi dari berbagai resistansi gangguan :

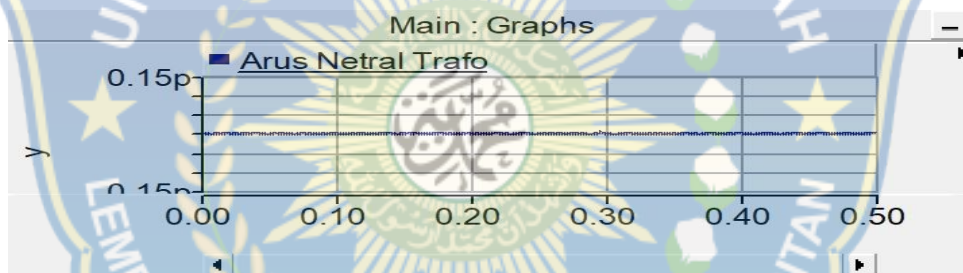
- a. Gangguan terjadi pada resistansi 2 Ω



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.4 Gelombang arus dan gangguan satu fase ke tanah $R_f = 2\Omega$; (a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c) tampilan arus netral trafo.

Hasil simulasi arus gangguan di GI 3 yang ditampilkan pada grafik A, B dan C pada Gambar 4.4 yang mana sumbu Y adalah nilai arus dan sumbu X adalah waktu yang digunakan (detik). Keluaran gelombang di GI 3 ini memiliki arus gangguan yang lebih besar dari pada titik gangguan lainnya seperti pada GI 3 ini pada pentanahan gangguan 2 ohm dengan nilai arus 27,824 kA pada arus titik

gangguan. Sedangkan untuk nilai pada generator terhitung sangat kecil berada pada satuan pico (10^{-12}) atau sama dengan nol.

C. Hasil Simulasi Transformator Y-Y

C.1. Arus Gangguan di GI 1

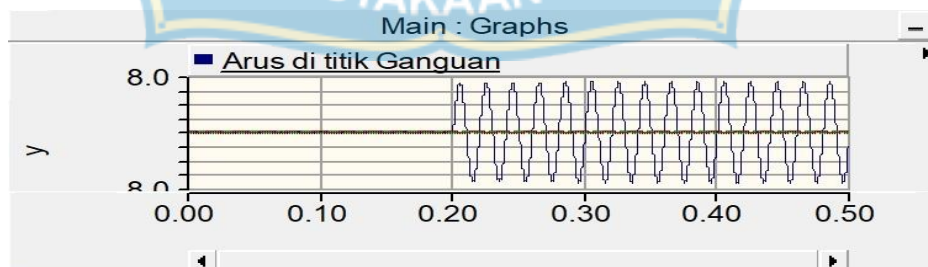
Dari hasil simulasi pada arus gangguan di GI 1 yang diukur adalah titik gangguan, arus yang mengalir pada generator, arus yang mengalir pada trafo dengan nilai NGR 40 ohm dan menggunakan resistansi pentanahan pada gangguan yaitu 2, 10, 20, 30 dan 40 Ω dapat dilihat sebagai berikut :

Tabel 4.5 Hasil simulasi arus gangguan satu fase ke tanah di GI 1

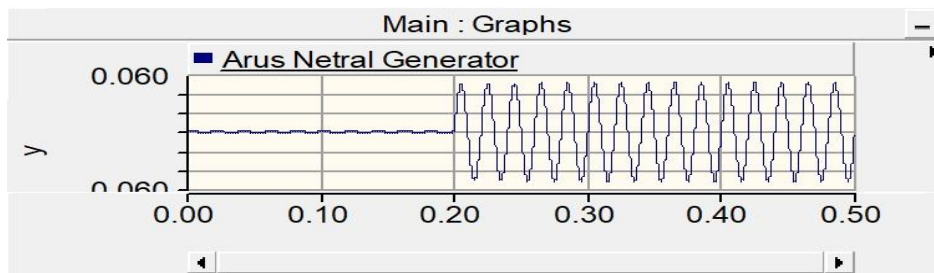
No.	Nilai Resistansi(Ω)	Arus di Titik Gangguan (kA)	Arus NGR Generator (kA)	Arus NGR Trafo (kA)
1	2	6.958	0.046	3.460
2	10	1.536	0.010	0.765
3	20	0.778	0.003	0.299
4	30	0.521	0.003	0.259
5	40	0.343	0.002	0.195

Berikut bentuk gelombang dari hasil simulasi dari berbagai resistansi gangguan :

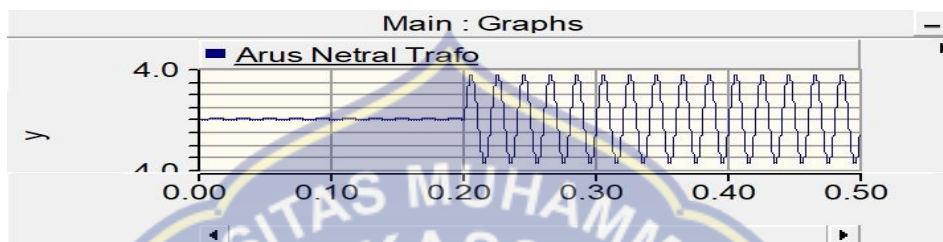
a. Gangguan terjadi pada resistansi 2 Ω



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.5 Gelombang arus dan gangguan satu fase ke tanah $R_f = 2\Omega$; (a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c) tampilan arus netral trafo.

Hasil simulasi arus gangguan di GI 1 pada transformator Y-Y yang ditampilkan pada grafik A, B dan C pada Gambar 4.5 yang mana sumbu Y adalah nilai arus dan sumbu X adalah waktu yg digunakan (detik). Arus gangguan di GI 1 memiliki arus yang besar pada penggunaan resistansi 2 ohm dengan nilai 6.958 kA dan pada resistansi 10 ohm memiliki penurunan arus gangguan yang cukup kecil dengan nilai 1.536 kA. Pada arus netral generator memiliki arus yang lebih kecil dari pada arus netral trafo.

C.2. Arus Gangguan di GI 2

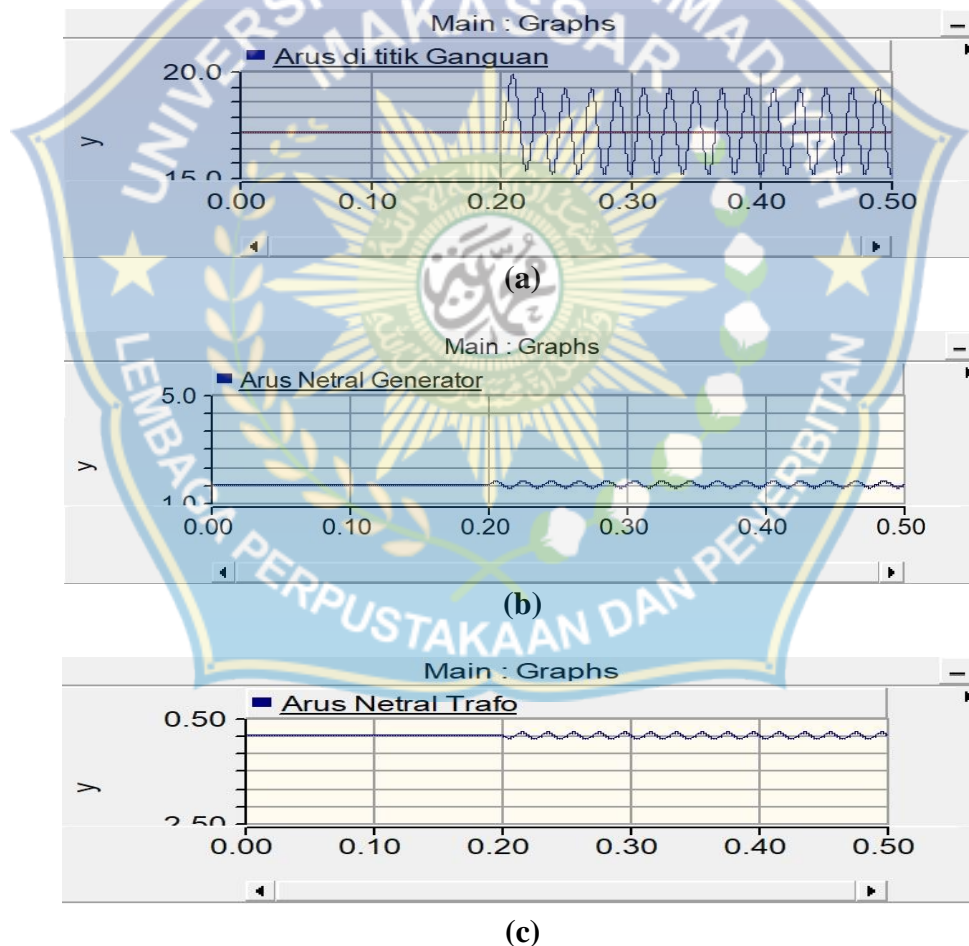
Dari hasil simulasi pada arus gangguan di GI 1 yang diukur adalah titik gangguan, arus yang mengalir pada generator, arus yang mengalir pada trafo dengan nilai NGR 40 ohm dan menggunakan resistansi pentanahan pada gangguan yaitu 2, 10, 20, 30 dan 40 Ω dapat dilihat sebagai berikut :

Tabel 4.6 Hasil simulasi arus gangguan satu fase ke tanah di GI 2

No.	Nilai Resistansi (Ω)	Arus di Titik Gangguan (kA)	Arus NGR Generator (kA)	Arus NGR Trafo (kA)
1	2	13,080	0,120	0,041
2	10	5,000	0,059	0,027
3	20	3,120	0,038	0,19
4	30	2,238	0,027	0,014
5	40	1,948	0,021	0,010

Berikut bentuk gelombang dari hasil simulasi dari berbagai resistansi gangguan :

1. Gangguan terjadi pada resistansi 2Ω



Gambar 4.6 Gelombang arus dan gangguan satu fase ke tanah $R_f = 2\Omega$; (a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c) tampilan arus netral trafo

Hasil simulasi arus gangguan di GI 2 pada transformator Y-Y yang ditampilkan pada grafik A, B dan C pada Gambar 4.6 yang mana sumbu Y adalah nilai arus dan sumbu X adalah waktu yg digunakan (detik). Arus gangguan di GI 2 memiliki arus yang besar pada penggunaan resistansi 2 ohm dengan nilai 13,080 kA dan pada resistansi 10 ohm memiliki penurunan arus gangguan yang cukup kecil dengan nilai 5,000 kA. Pada arus netral generator memiliki arus yang lebih kecil dari pada arus netral trafo.

C.3. Arus Gangguan di GI 3

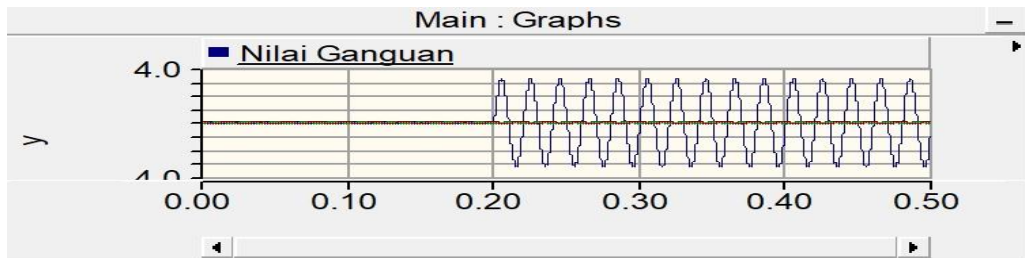
Dari hasil simulasi pada arus gangguan di GI 3 yang diukur adalah titik gangguan, arus yang mengalir pada NGR generator, arus yang mengalir pada trafo dengan nilai NGR 40 ohm dan menggunakan resistansi pentanahan pada gangguan yaitu 2, 10, 20, 30 dan 40 Ω dapat dilihat sebagai berikut :

Tabel 4.7 Hasil simulasi arus gangguan satu fase ke tanah di GI 3

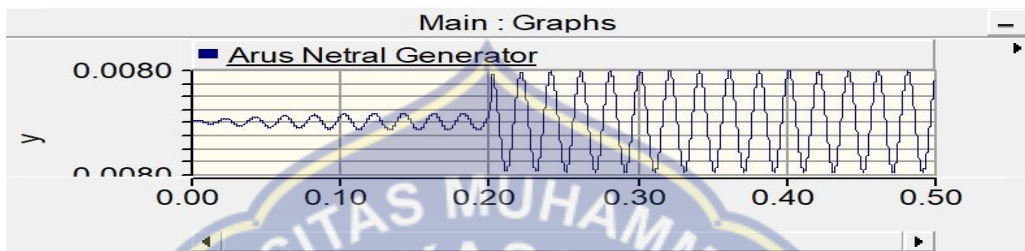
No.	Nilai Resistansi(Ω)	Arus di Titik Gangguan (kA)	ArusNGR Generator (kA)	Arus NGR Trafo (kA)
1	2	19,964	0,371	0,180
2	10	6,114	0,012	0,006
3	20	3,180	0,006	0,003
4	30	2,158	0,004	0,002
5	40	1,624	0,003	0,001

Berikut bentuk gelombang dari hasil simulasi dari berbagai resistansi gangguan :

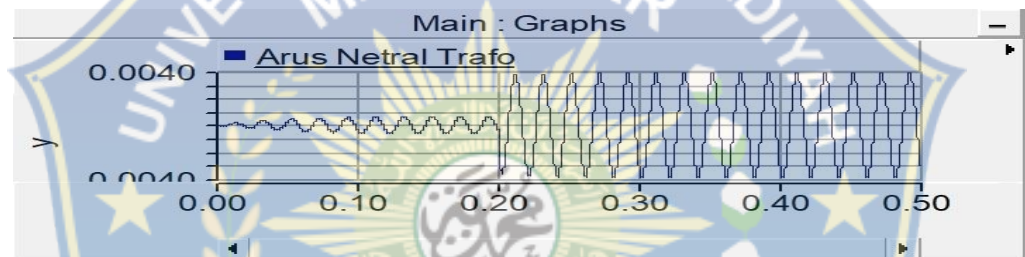
- a. Gangguan terjadi pada resistansi 2 Ω



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.7 Gelombang arus dan gangguan satu fase ke tanah $R_f = 2\Omega$; (a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c) tampilan arus netral trafo.

Hasil simulasi arus gangguan di GI 3 pada transformator Y-Y yang ditampilkan pada grafik A, B dan C pada Gambar 4.7 yang mana sumbu Y adalah nilai arus dan sumbu X adalah waktu yg digunakan (detik). Arus gangguan di GI 3 memiliki arus yang besar pada penggunaan resistansi 2 ohm dengan nilai 19,964 kA dan pada resistansi 10 ohm memiliki penurunan arus gangguan yang cukup kecil dengan nilai 6,114kA. Pada arus netral generator memiliki arus yang lebih kecil dari pada arus netral trafo.

D. Gangguan 2 Fase ke Tanah Dengan Transformator Y - Δ

D.1. Arus Gangguan di GI 1

Dari hasil simulasi pada arus gangguan di GI 1 yang diukur adalah titik gangguan, arus yang mengalir pada generator, arus yang mengalir pada trafo dengan nilai NGR 40 ohm dan menggunakan resistansi pentanahan pada gangguan yaitu 2, 10, 20, 30 dan 40 Ω dapat dilihat sebagai berikut :

Tabel 4.8 Hasil simulasi arus gangguan dua fase ke tanah di GI 1

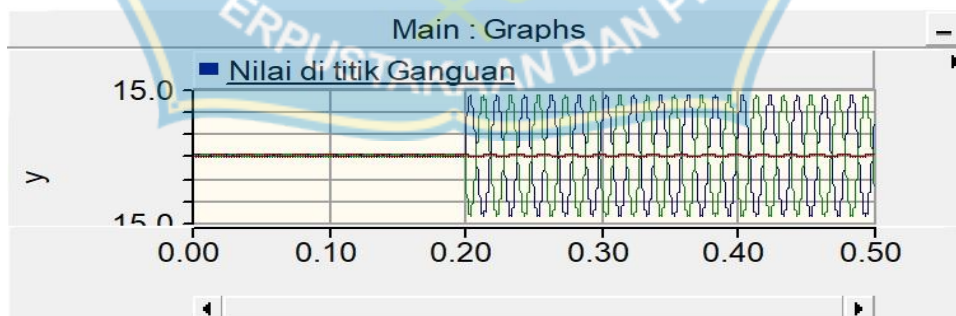
No.	Nilai Resistansi (Ω)	Arus di Titik Gangguan (kA)	Arus NGR Generator (kA)	Arus NGR Trafo (kA)
1	2	9,569	0	0
2	10	1,915	0	0
3	20	0,969	0	0
4	30	0,646	0	0
5	40	0,478	0	0

Keterangan :

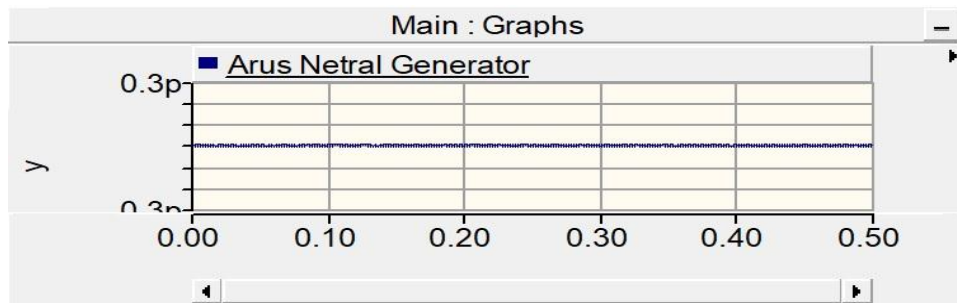
- Nilai arus yang mengalir pada generator dan trafo $10^{-12} \sim 0$

Berikut salah satu bentuk gelombang dari hasil simulasi dari berbagai resistansi gangguan :

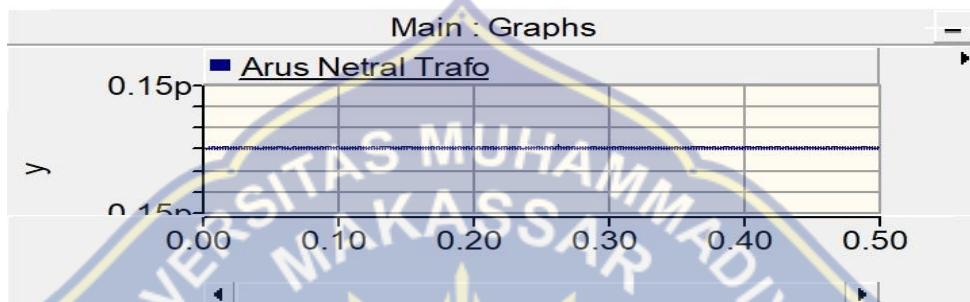
b. Gangguan terjadi pada resistansi 2 Ω



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.8 Gelombang arus dan gangguan internal dua fase ke tanah $R_f = 2 \Omega$; (a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c) tampilan arus netral trafo

Hasil simulasi arus gangguan di GI 1 pada trafo dua fase yang ditampilkan pada grafik A, B dan C pada Gambar 4.8 yang mana sumbu Y adalah nilai arus dan sumbu X adalah waktu yang digunakan (detik). Arus gangguan di GI 1 dengan pentanahan gangguan 2 ohm memiliki arus di titik gangguan sebesar 9,569 kA dan pada arus generator dan trafo memiliki arus yang sangat kecil berada pada satuan pico (10^{-12}) atau sama dengan nol. Pada penggunaan pentanahan yang lebih besar maka arusnya akan mengecil seperti pada penggunaan pentanahan gangguan 40 ohm menghasilkan arus 0,478 kA.

D.2. Arus Gangguan di GI 2

Dari hasil simulasi pada arus gangguan di GI 2 yang diukur adalah titik gangguan, arus yang mengalir pada generator, arus yang mengalir pada trafo

dengan nilai NGR 40 ohm dan menggunakan resistansi pentanahan pada gangguan yaitu 2, 10, 20, 30 dan 40 Ω dapat dilihat sebagai berikut :

Tabel 4.9 Hasil simulasi arus gangguan dua fase ke tanah di GI 2

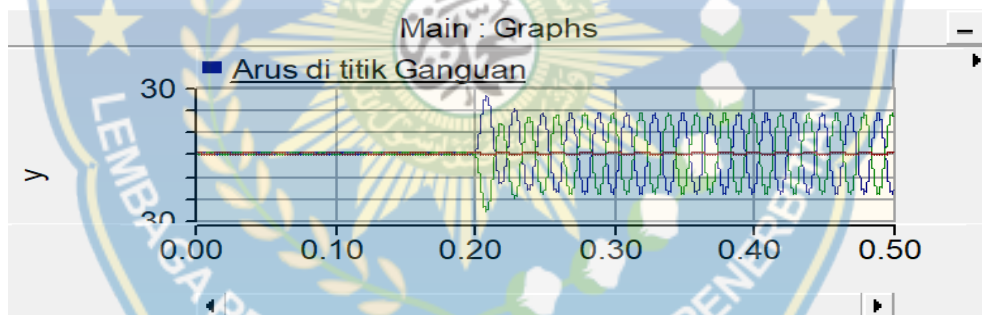
No.	Nilai Resistansi (Ω)	Arus di Titik Gangguan (kA)	Arus NGR Generator (kA)	Arus NGR Trafo (kA)
1	2	18,075	0	0
2	10	10,445	0	0
3	20	7,018	0	0
4	30	5,208	0	0
5	40	4,094	0	0

Keterangan :

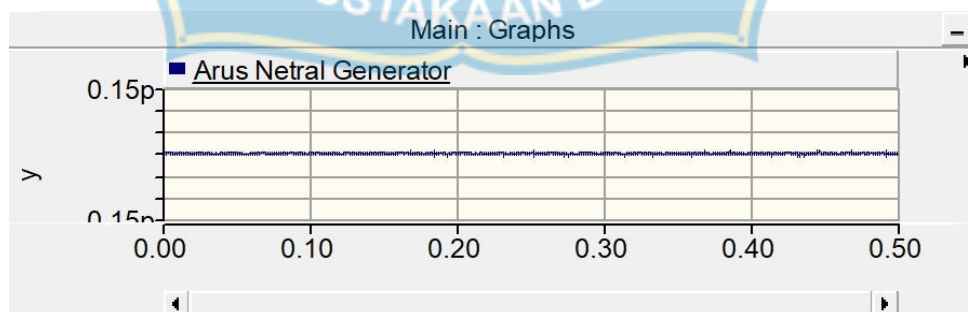
- Nilai arus yang mengalir pada generator dan trafo $10^{-12} \sim 0$

Berikut salah satu bentuk gelombang dari hasil simulasi dari berbagai resistansi gangguan :

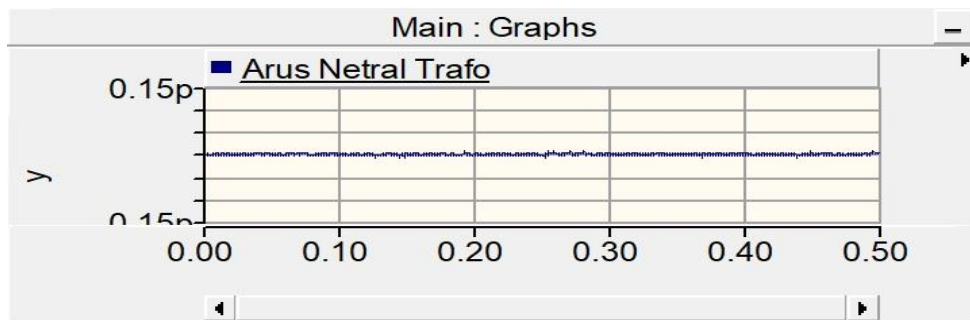
a. Gangguan terjadi pada resistansi 2 Ω



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.9 Gelombang arus dan gangguan internal dua fase ke tanah $R_f = 2 \Omega$; (a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c) tampilan arus netral trafo

Hasil simulasi arus gangguan di GI 2 pada trafo 2 fase yang ditampilkan pada grafik A, B dan C pada Gambar 4.9 yang mana sumbu Y adalah nilai arus dan sumbu X adalah waktu yang digunakan (detik). Arus gangguan GI 2, pada penggunaan pentanahan gangguan 2 ohm terlihat memiliki arus puncak sebesar 18,075 kA di pertama dan selanjutnya mengalami penurunan yang normal. Pada pentanahan gangguan yang lebih semua arus terlihat normal.

D.3. Arus Gangguan di GI 3

Dari hasil simulasi pada arus gangguan di GI 3 yang diukur adalah titik gangguan, arus yang mengalir pada generator, arus yang mengalir pada trafo dengan nilai NGR 40 ohm dan menggunakan resistansi pentanahan pada gangguan yaitu 2, 10, 20, 30 dan 40 Ω dapat dilihat sebagai berikut :

Tabel 4.10 Hasil simulasi arus gangguan dua fase ke tanah di GI 3

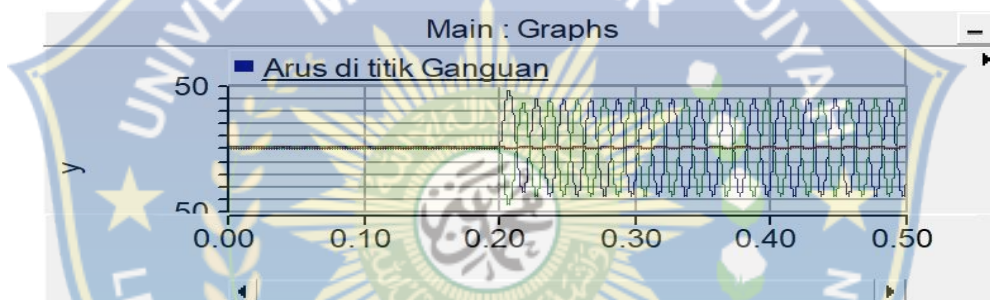
No.	Nilai Resistansi (Ω)	Arus di Titik Gangguan(kA)	Arus NGR Generator (kA)	Arus NGR Trafo (kA)
1	2	31,692	0	0
2	10	13,240	0	0
3	20	7,308	0	0
4	30	5,106	0	0
5	40	3,878	0	0

Keterangan :

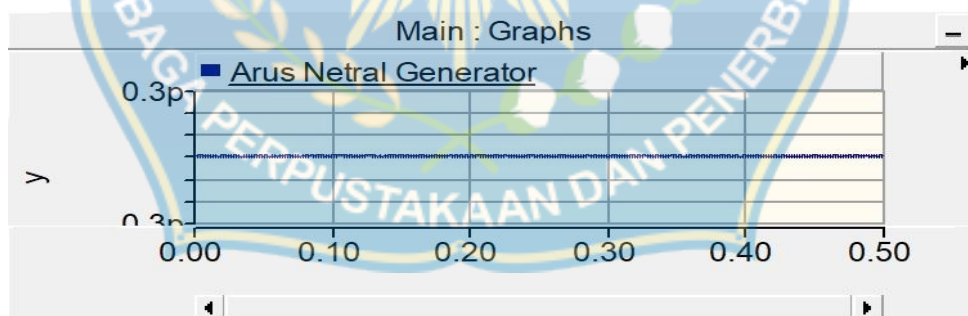
- Nilai arus yang mengalir pada generator dan trafo $10^{-12} \sim 0$

Berikut salah satu bentuk gelombang dari hasil simulasi dari berbagai resistansi gangguan :

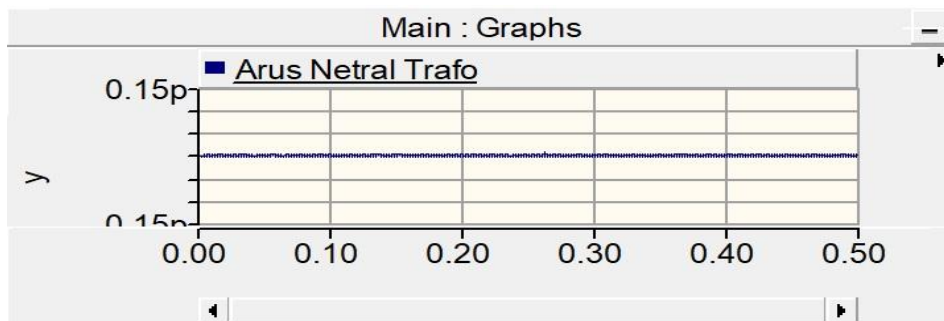
a. Gangguan terjadi pada resistansi 2Ω



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.10 Gelombang arus dan gangguan internal dua fase ke tanah $R_f = 2 \Omega$; (a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c) tampilan arus netral trafo

Hasil simulasi arus gangguan di GI 1 pada trafo dua fase yang ditampilkan pada grafik A, B dan C pada Gambar 4.8 yang mana sumbu Y adalah nilai arus dan sumbu X adalah waktu yg digunakan (detik). Arus gangguan GI 3 dengan pentanahan gangguan sebesar 2 ohm terlihat memiliki loncatan arus di detik pertama sebesar 31,692 kA dan pada detik berikutnya mengalami penurunan yang normal. Pada penggunaan pentanahan gangguan yang lebih besar memiliki arus yang normal.

BAB V

PENUTUP

A. Simpulan

Gangguan tanah pada saluran transmisi akan mempengaruhi arus yang mengalir dalam elemen *Neutral Grounding Resistor* (NGR). Pada hasil simulasi ini data arus yang diukur yaitu trafo Y- Δ , Y-Y dan trafo Y- Δ dua fase. Pada titik gangguan yang memiliki arus yang besar berada di Y- Δ dua fase dan arus terendah di titik gangguan yaitu di Y- Δ satu fase. Pada unit generator-transformator, arus gangguan pada generator netral paling besar pada koneksi transformator berada di Y- Δ satu fase dan pada generator-transformer di Y-Y dan trafo Y- Δ dua fase memiliki arus yang kecil berada di skala pico ($10^{-12} \sim 0$).

Besarnya arus gangguan tanah dipengaruhi oleh metode pembumian netral. Jika dibumikan melalui pentanahan *Low Resistance Grounding* (LRG), arus gangguan besar, tetapi untuk pentanahan *High Resistance Grounding* (HRG) akibatnya arus gangguan sangat rendah. Menurut IEEE Std 142-2007, arus gangguan tanah untuk HRG terbatas pada kurang dari 10 A dan biasanya antara 100 A dan 1000 A untuk LRG, itu adalah untuk model simulasi NGR 500 ohm termasuk pembumian HRG dan kurang dari NGR 10 ohm dapat dikategorikan sebagai LRG.

DAFTAR PUSTAKA

Suhadi, dkk, 2008, *Teknik Distribusi Tenaga Listrik*, Jilid 3, Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.

Aslimeri, dkk, 2008, *Teknik Transmisi Tenaga Listrik*, Jilid 1, Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.

IEEE Guide for Generator Ground Protection, IEEE Std C37.101-1993.

Asma Meddeb. 2016. *Fault analysis and control of grounding power*. *International Journal of Signal and Imaging Systems Engineering*. 9, Nos :1-9.

A.R. Sultan, dkk, 2012. *Ground Fault Currents in Unit Generator-Transformerat Various NGR and Transformer Configurations*. *IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications*. 1- 6.

Kosjenka Capuder Bikic et al. 2017. *Transferred Voltages due to Single Phase Earth Fault on Power Transformers*. 4th International Colloquium "Transformer Research and Asset Management". 1-7.

<https://media.neliti.com/media/publications/211291-evaluasi-penerapan-metode-pentanahan-net.pdf/>. Diakses pada tanggal (10 Februari)

<https://industri3601.wordpress.com/transformator-dan-sistem-distribusi-daya/>.

Diakses pada tanggal (10 Februari)

Stevenson. W. D. Jr. 1990. Analisis Sistem Tenaga Listrik, Edisi Keempat. Penerbit Erlangga: Jakarta.

<http://teaiman.blogspot.com/2010/09/sistem-pentanahan-pembumian-titik.html>

LAMPIRAN A BENTUK DAN KEGUNAAN KOMPONEN YANG DIGUNAKAN LAMPIRAN A

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

A.1. Satu-Phase *Voltage Source Model 1*



Gambar A.1 Bentuk komponen Sumber Satu Fase

Three-Phase voltage source model 1 adalah komponen yang memberikan input tegangan (kV), frekuensi (Hz) dan tipe impedansi yang diinginkan.

A.2. *Output Channel*



Gambar A.2 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 lain-lain.

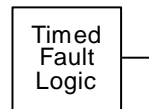
A.3. *Three fase and two fase Fault*



Gamabar A.3 Bentuk komponen *Three-Phase Fault*

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

A.4. *Timed Fault Logic*



Gambar A.4 bentuk komponen *Fault Logic*

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

A.5. BUS



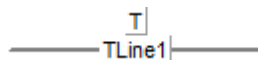
BUS1

Gambar A.5 bentuk komponen BUS

Bus mirip dengan komponen Kawat, di mana mereka dapat digunakan untuk bergabung dengan komponen lain bersama-sama dalam gambar rangkaian. Namun, bus harus digunakan terutama untuk mewakili satu titik bus listrik (yaitu sebuah simpul), yang dengannya banyak objek dapat dihubungkan.

Bus adalah 'komponen yang dapat diregangkan', yang panjangnya dapat diubah agar sesuai dengan penggunaan yang diperlukan. Diagram berikut menunjukkan bagaimana bus dapat digunakan.

A.6. *Transmission lines*



Gambar A.6 bentuk komponen *transmission lines*

Transmission lines adalah komponen yang berfungsi sebagai saluran transmisi, yang dapat diatur panjang saluran yang diinginkan dan frekuensi steady state yang diinginkan.

A.7. Three-Fase and two winding Transformer



Gambar A.7 Three-fasee and two winding Transformer

Komponen ini memodelkan transformator 3 fase 2 belitan dan didasarkan pedekatan pemodelan klasik.

A.8. Resistor



Gambar A.8 Resistor

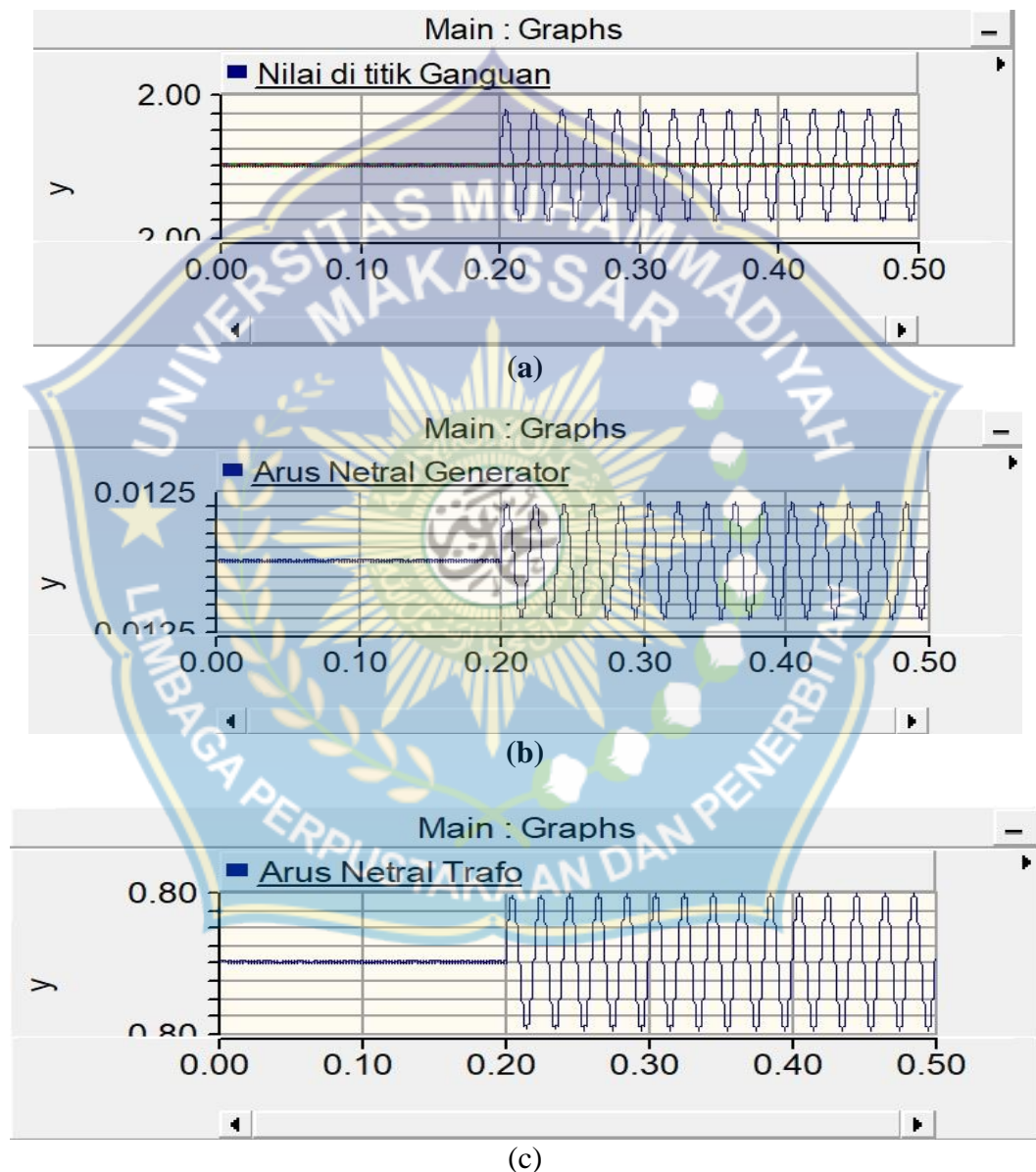
Resistor sebagai pengatur dalam membatasi jumlah arus yang mengalir dalam suatu rangkaian. Dengan adanya resistor menyebabkan arus listrik dapat disalurkan sesuai dengan kebutuhan.

LAMPIRAN B HASIL SIMULASI

B.1. Hasil Simulasi Transformator Y- Δ

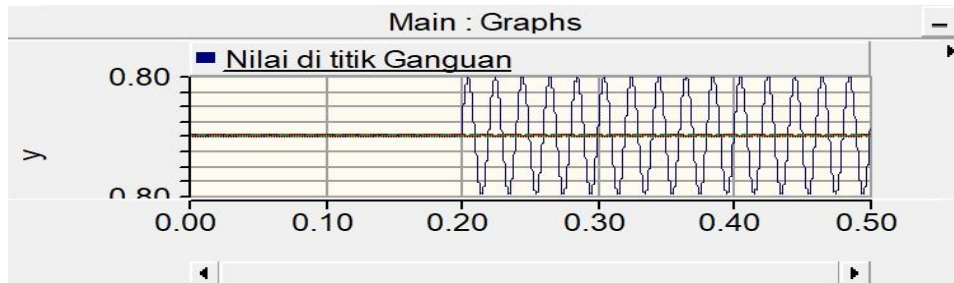
B1.1. Arus Gangguan di GI 1

- Gangguan terjadi pada resistansi 10Ω

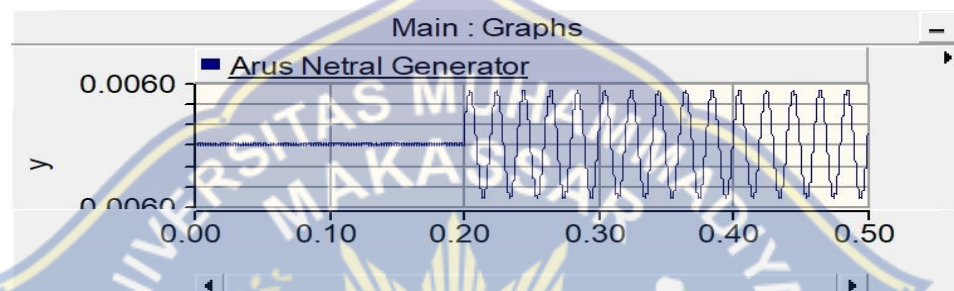


Gambar B.1 Gelombang arus dan gangguan satu fase ketanah $R_f = 10 \Omega$;
(a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c)
tampilan arus netral trafo.

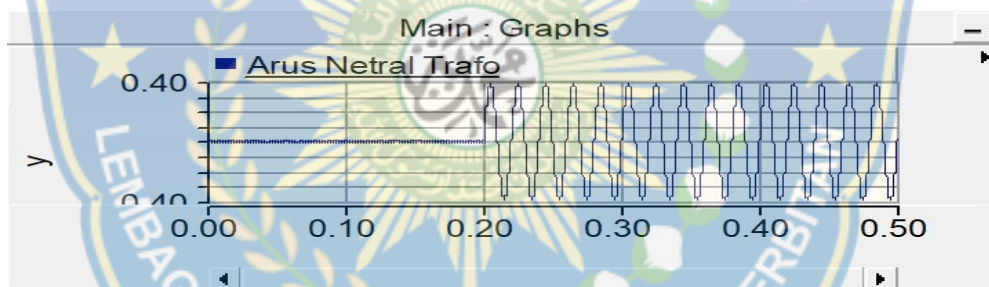
- Gangguan terjadi pada resistansi 20Ω



(a)



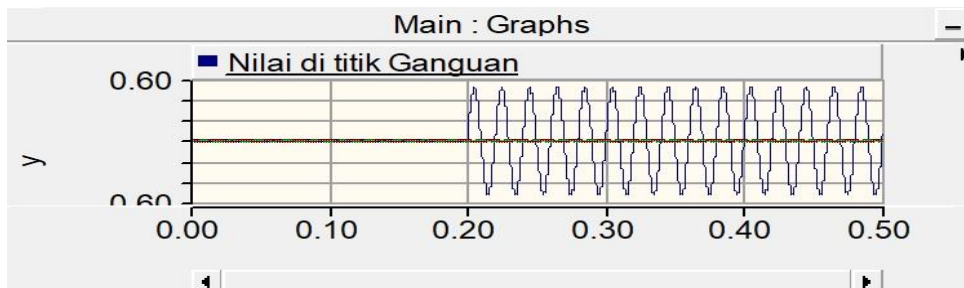
(b)



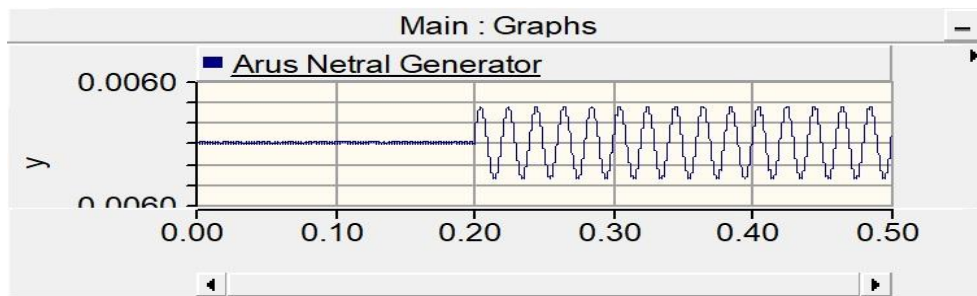
(c)

Gambar B.2 Gelombang arus dan gangguan satu fase ketanah $R_f = 20\Omega$;
(a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c)
tampilan arus netral trafo.

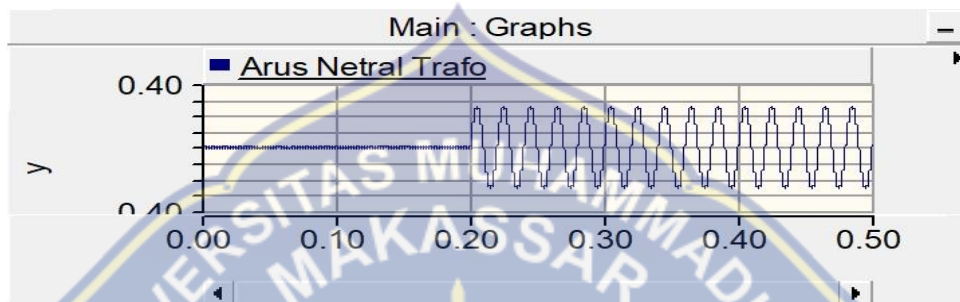
- Gangguan terjadi pada resistansi 30Ω



(a)



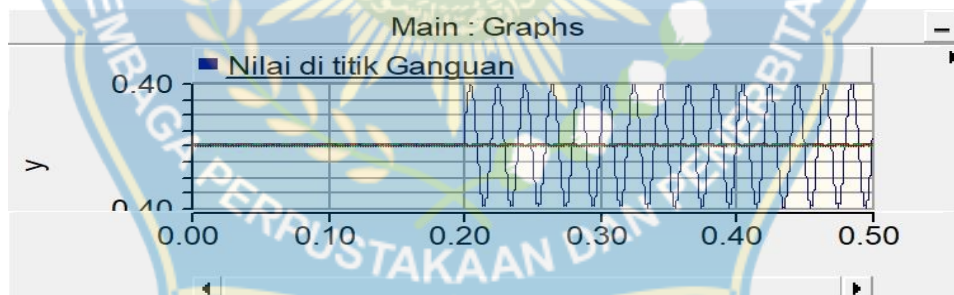
(b)



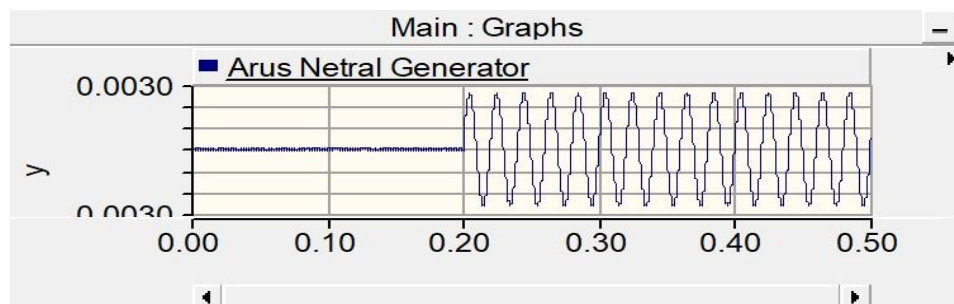
(c)

Gambar B.3 Gelombang arus dan gangguan satu fase ketanah $R_f = 30 \Omega$;
(a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c)
tampilan arus netral trafo.

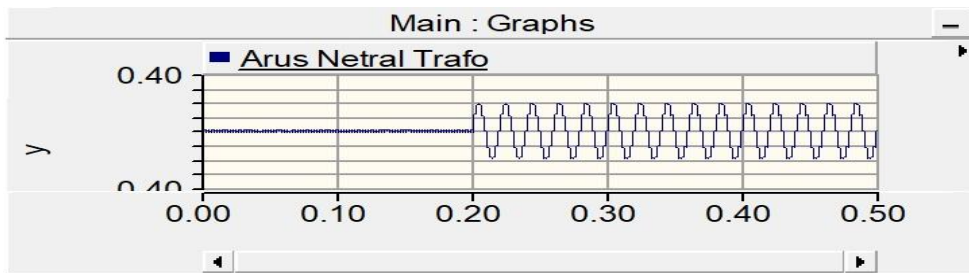
- Gangguan terjadi pada resistansi 40Ω



(a)



(b)

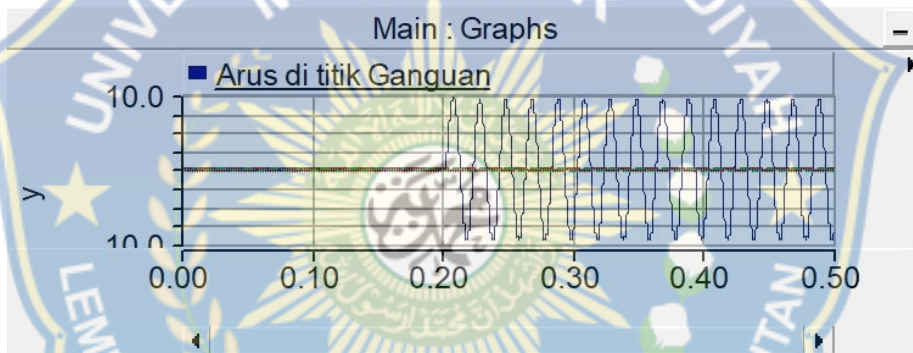


(c)

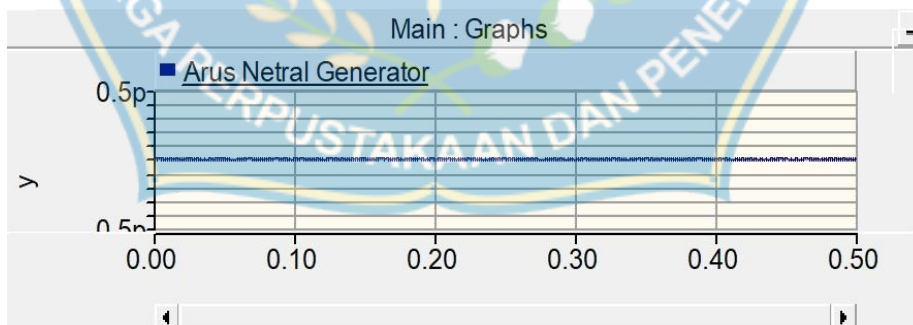
Gambar B.4 Gelombang arus dan gangguan satu fase ketanah $R_f = 40 \Omega$;
(a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c)
tampilan arus netral trafo.

B.1.2. Arus Gangguan di GI 2

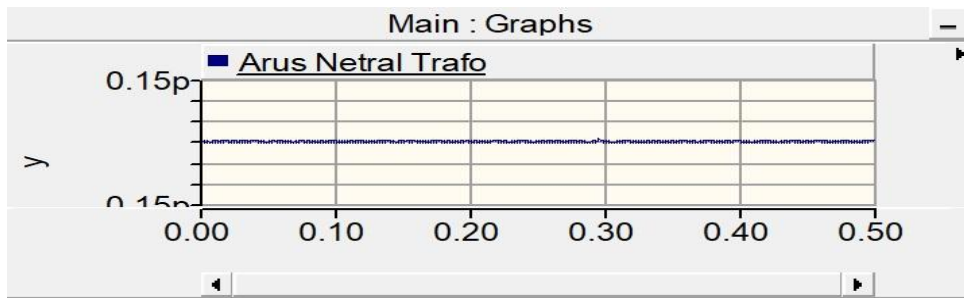
- Gangguan terjadi pada resistansi 10Ω



(a)



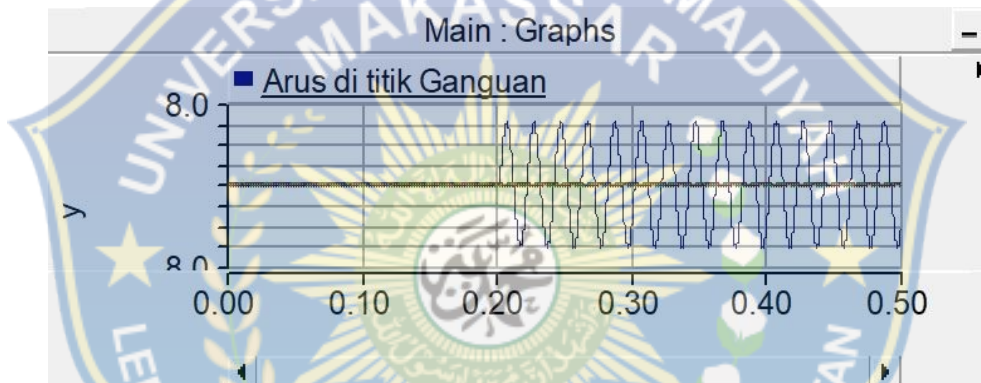
(b)



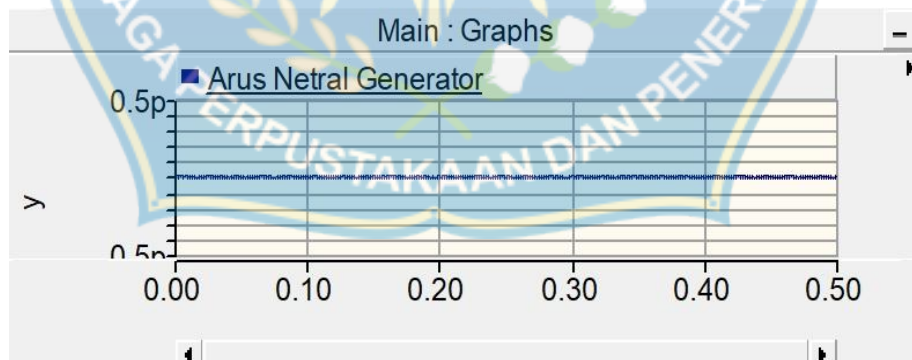
(c)

Gambar B.5 Gelombang arus dan gangguan satu fase ketanah $R_f = 10\Omega$;
(a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c)
tampilan arus netral trafo.

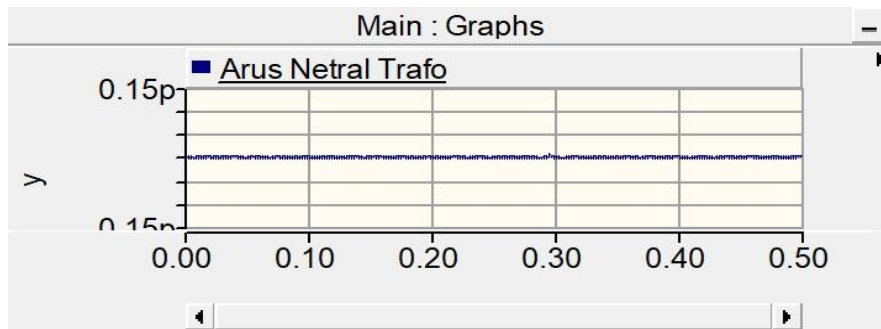
- Gangguan terjadi pada resistansi 20Ω



(a)



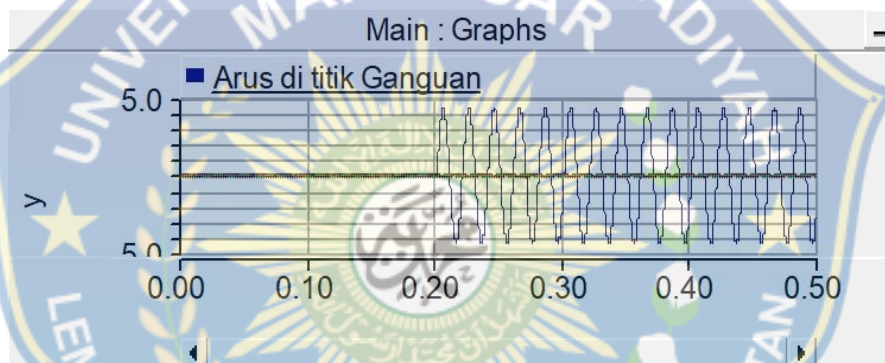
(b)



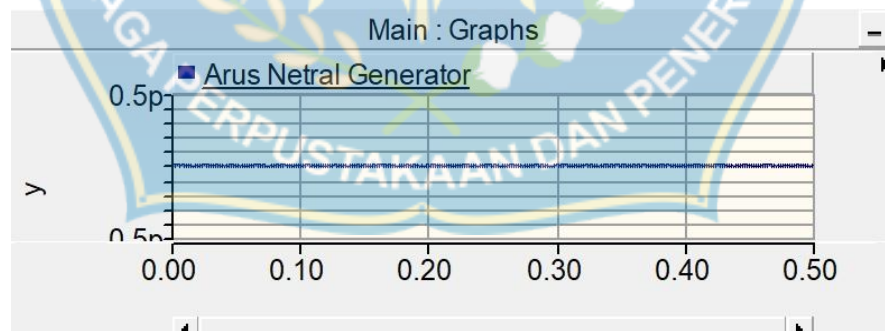
(c)

Gambar B.6 Gelombang arus dan gangguan satu fase ketanah $R_f = 20 \Omega$;
(a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c)
tampilan arus netral trafo.

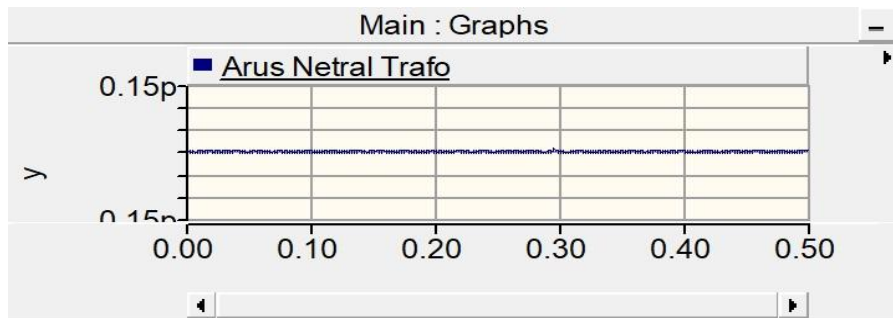
- Gangguan terjadi pada resistansi 30Ω



(a)



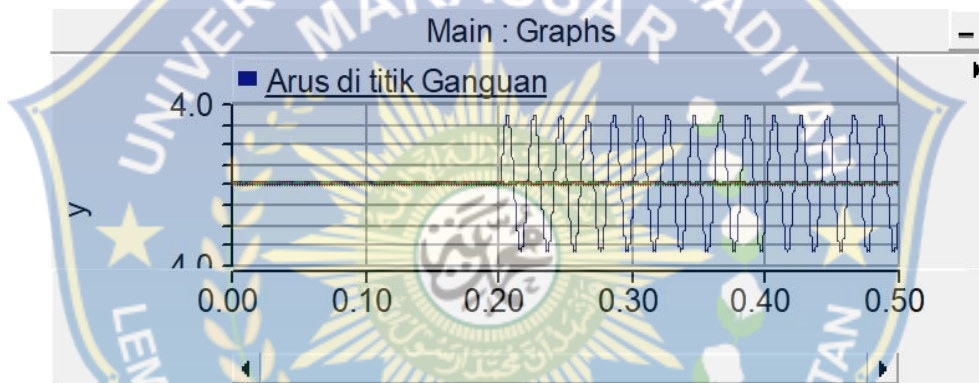
(b)



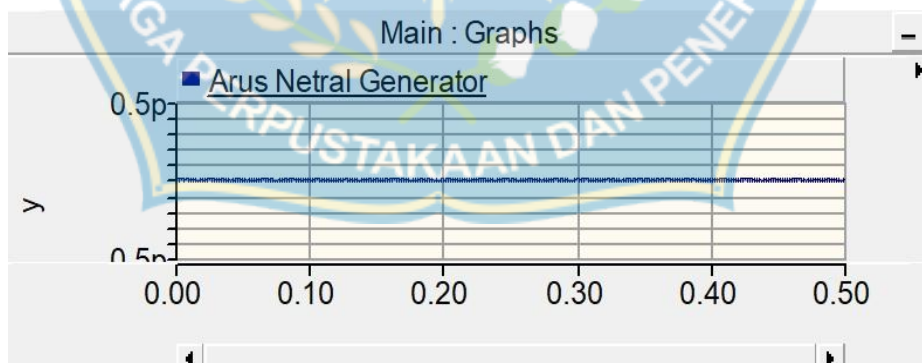
(c)

Gambar B.7 Gelombang arus dan gangguan satu fase ketanah $R_f = 30 \Omega$;
(a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c)
tampilan arus netral trafo.

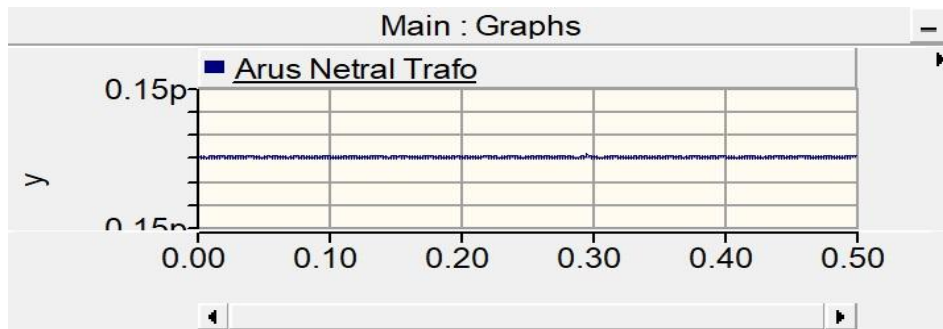
- Gangguan terjadi pada resistansi 40Ω



(a)



(b)

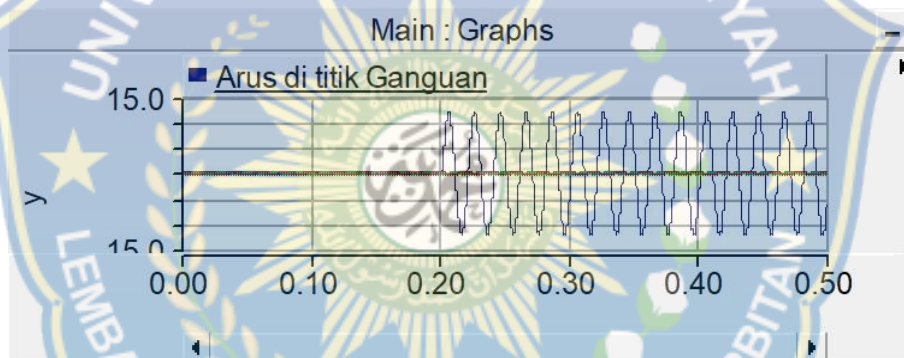


(c)

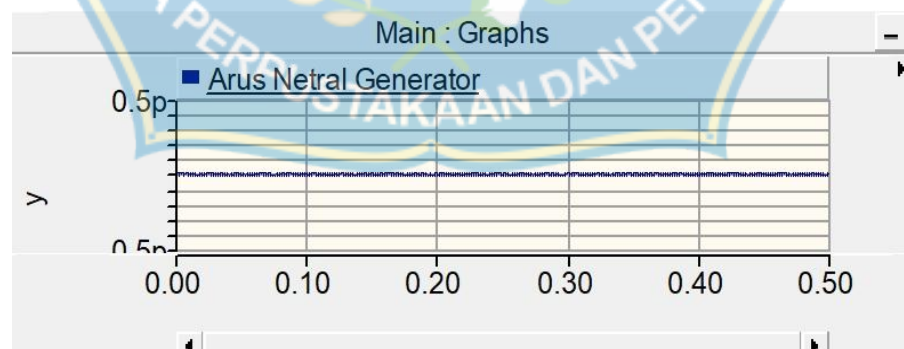
Gambar B.8 Gelombang arus dan gangguan satu fase ketanah $R_f = 40 \Omega$;
 (a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c)
 tampilan arus netral trafo.

B.1.3. Arus Gangguan di GI 3

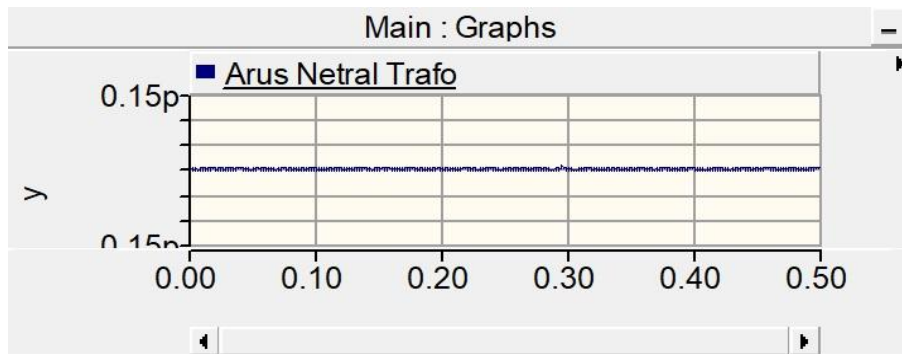
- Gangguan terjadi pada resistansi 10Ω



(a)



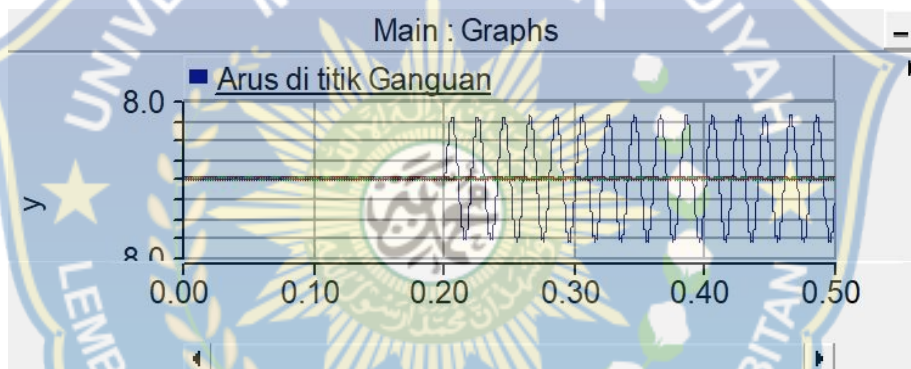
(b)



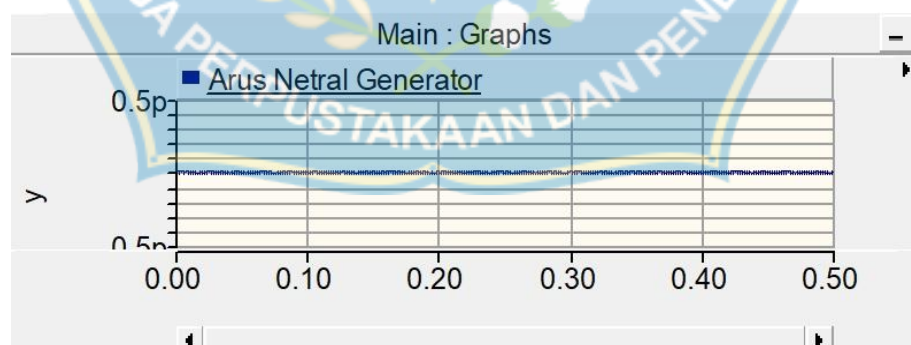
(c)

Gambar B.9 Gelombang arus dan gangguan satu fase ketanah $R_f = 10 \Omega$; (a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c) tampilan arus netral trafo.

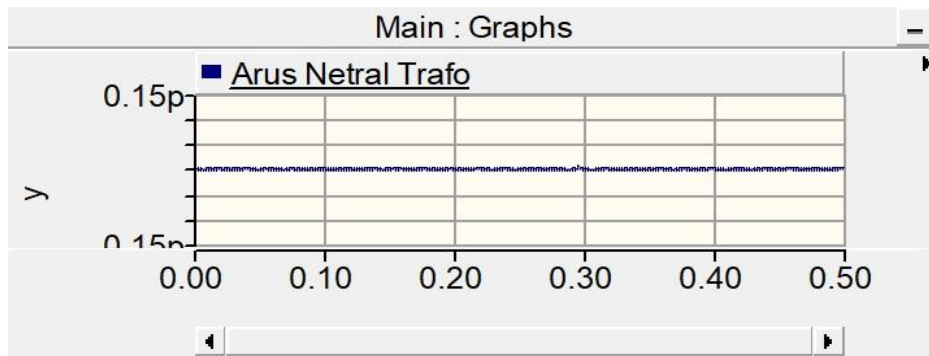
- Gangguan terjadi pada resistansi 20Ω



(a)



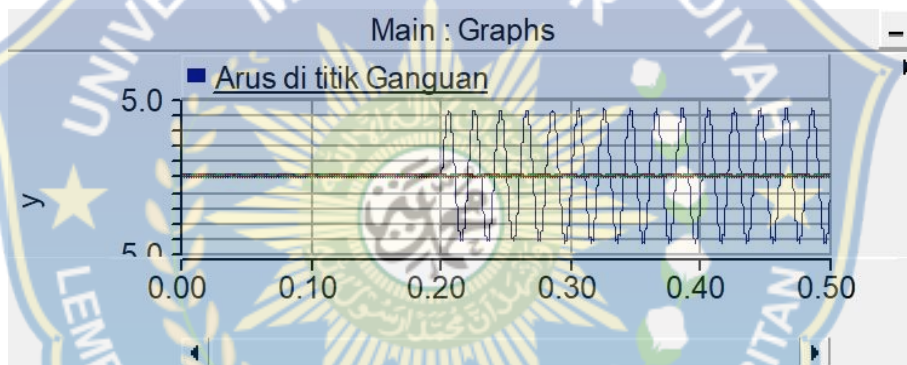
(b)



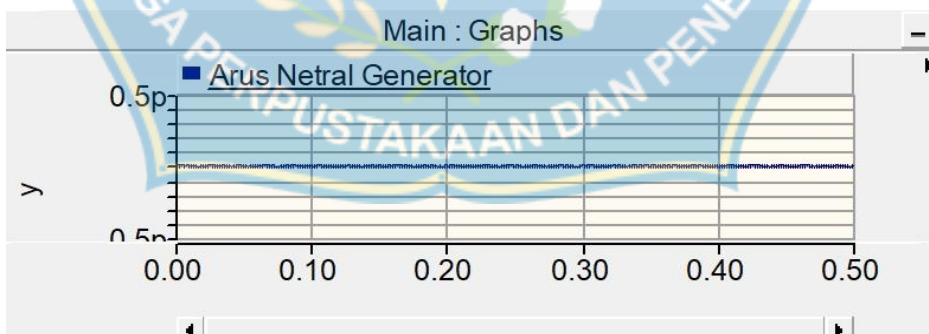
(c)

Gambar B.10 Gelombang arus dan gangguan satu fase ketanah $R_f = 20 \Omega$;
(a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c)
tampilan arus netral trafo.

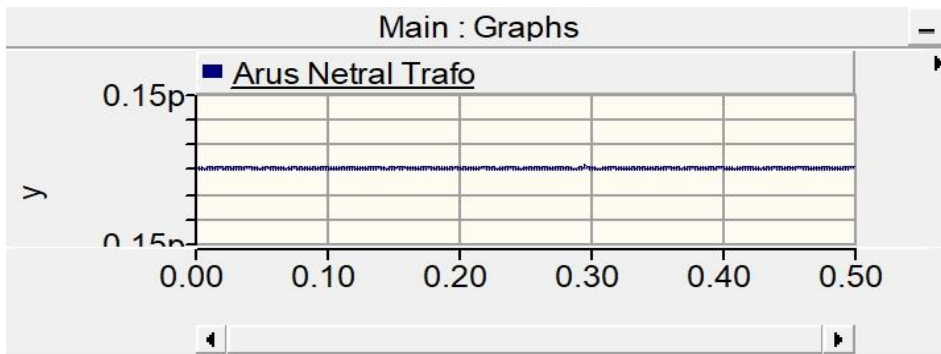
- Gangguan terjadi pada resistansi 30Ω



(a)



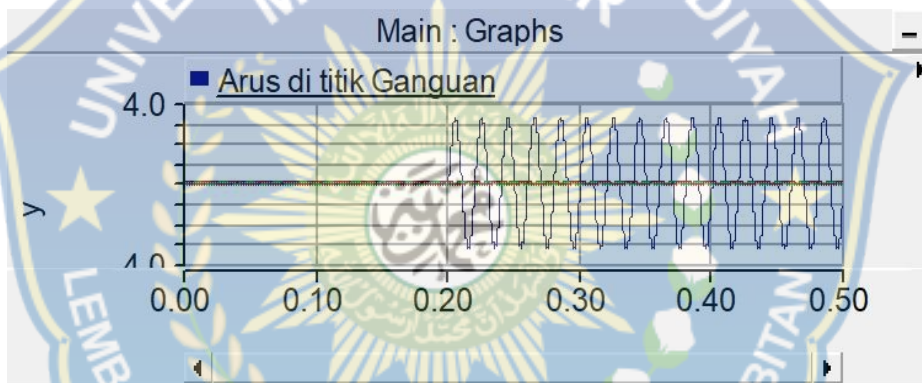
(b)



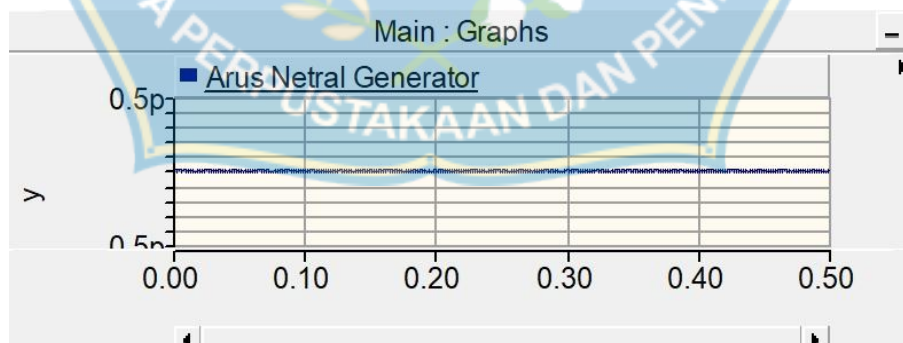
(c)

Gambar B.11 Gelombang arus dan gangguan satu fase ketanah $R_f = 30 \Omega$;
(a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c)
tampilan arus netral trafo.

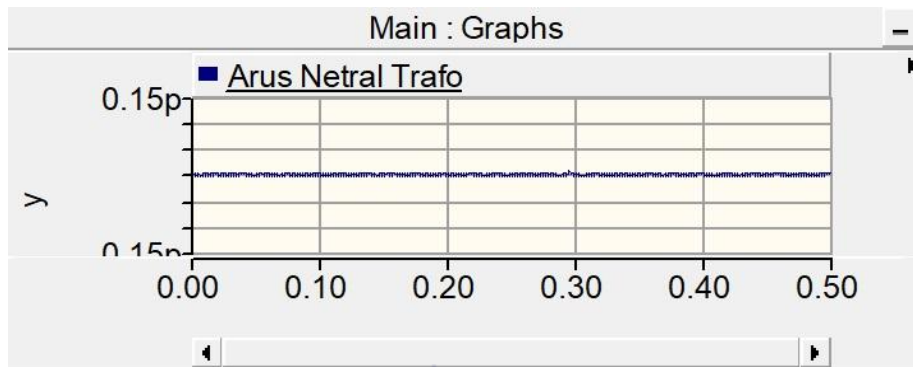
- Gangguan terjadi pada resistansi 40Ω



(a)



(b)



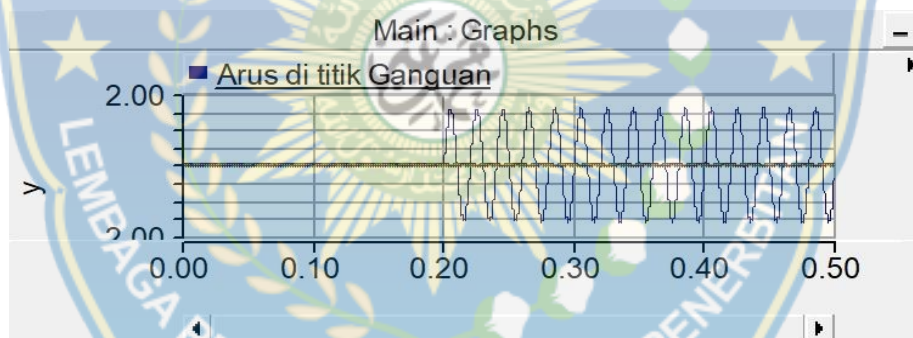
(c)

Gambar B.12 Gelombang arus dan gangguan satu fase ketanah $R_f = 40 \Omega$; (a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c) tampilan arus netral trafo.

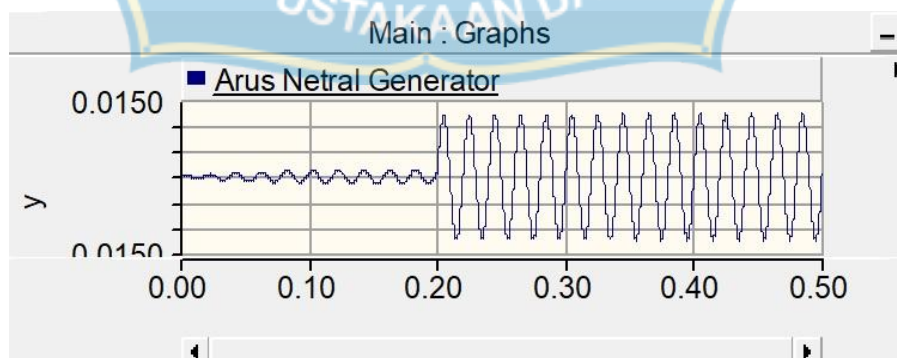
B.2. Hasil Simulasi Transformator Y- Y

B.2.1. Arus Gangguan di GI 1

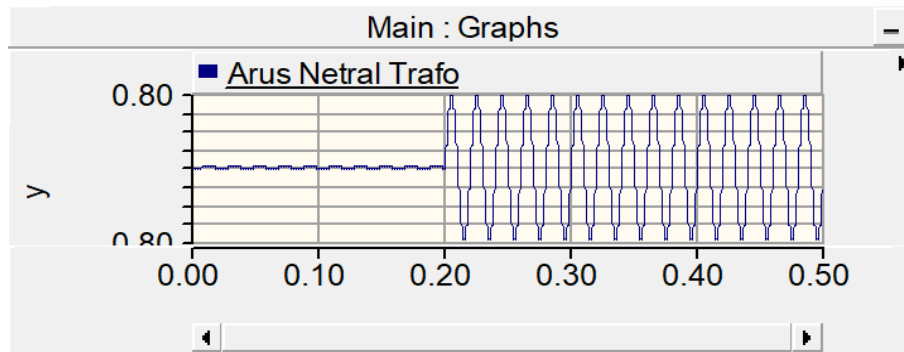
- Gangguan terjadi pada resistansi 10Ω



(a)



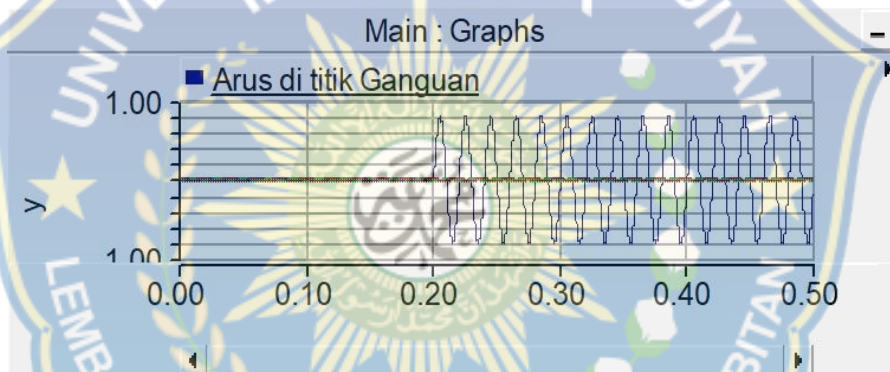
(b)



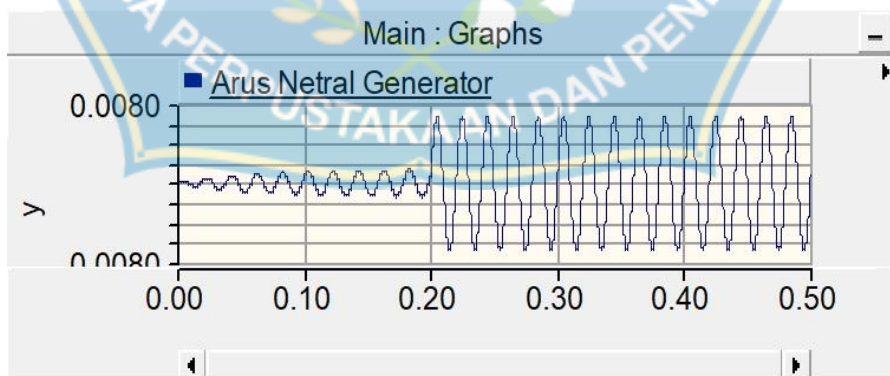
(c)

Gambar B.13 Gelombang arus dan gangguan satu fase ketanah $R_f = 10 \Omega$;
(a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c)
tampilan arus netral trafo.

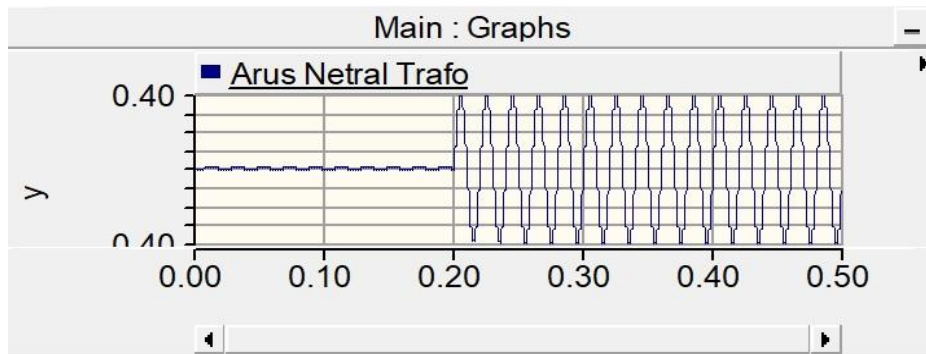
- Gangguan terjadi pada resistansi 20Ω



(a)



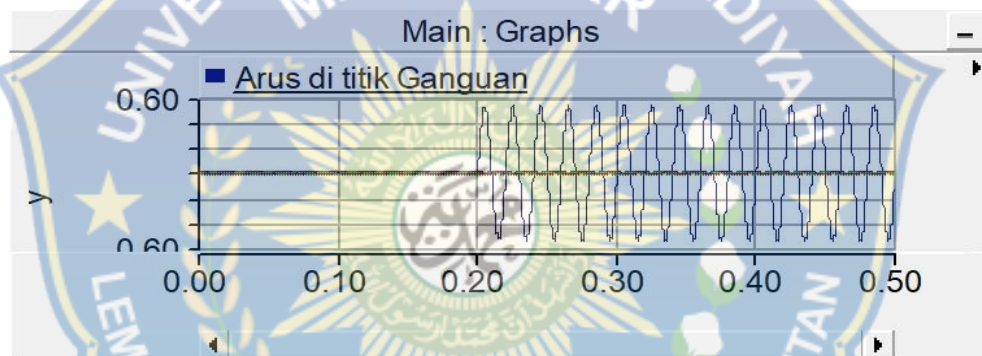
(b)



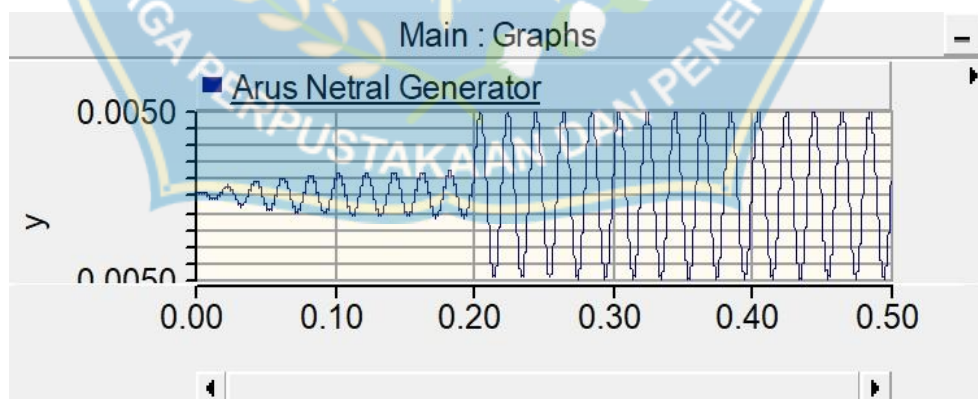
(c)

Gambar B.14 Gelombang arus dan gangguan satu fase ketanah $R_f = 20 \Omega$;
(a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c)
tampilan arus netral trafo.

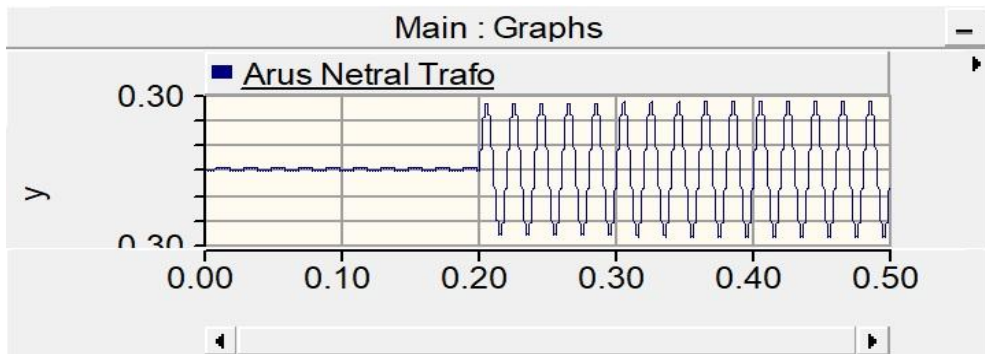
- Gangguan terjadi pada resistansi 30Ω



(a)



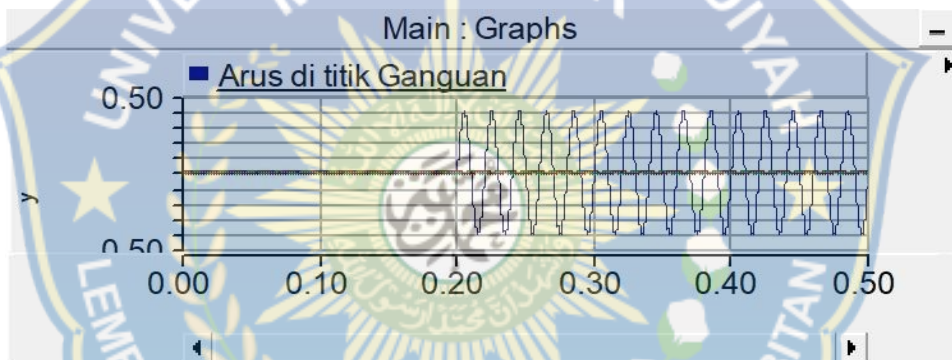
(b)



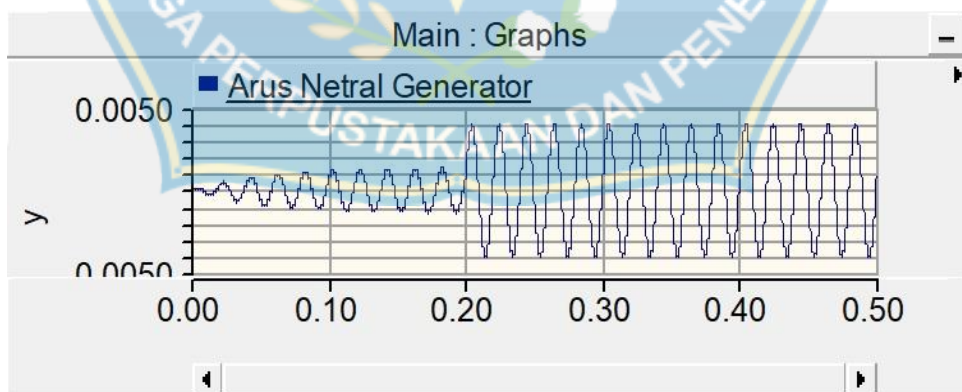
(c)

Gambar B.15 Gelombang arus dan gangguan satu fase ketanah $R_f = 30 \Omega$;
(a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c)
tampilan arus netral trafo.

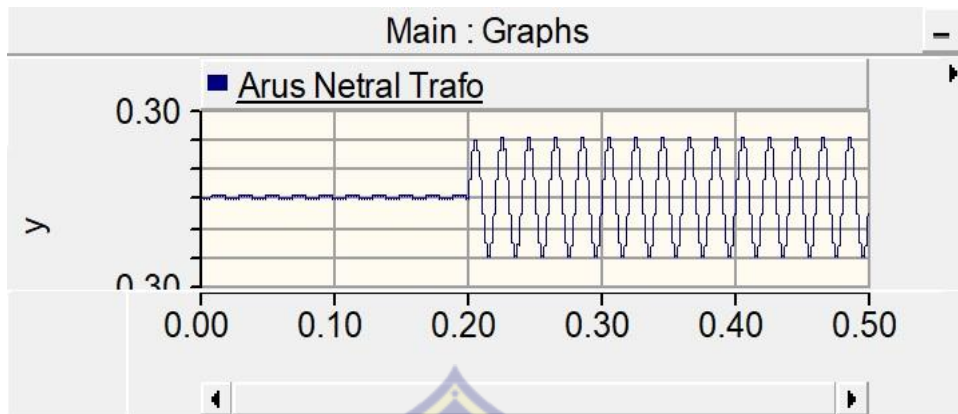
- Gangguan terjadi pada resistansi 40Ω



(a)



(b)

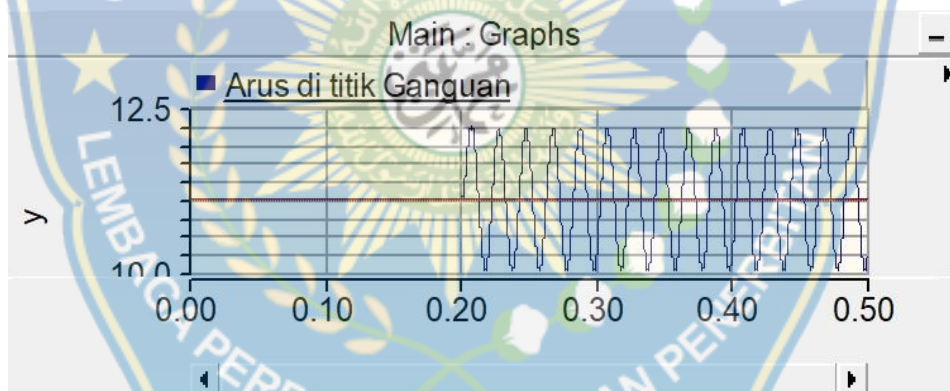


(c)

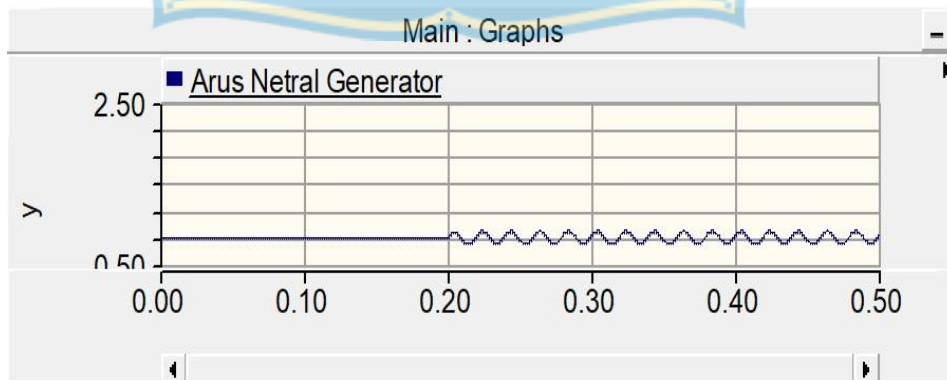
Gambar B.16 Gelombang arus dan gangguan satu fase ketanah $R_f = 40 \Omega$;
(a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c)
tampilan arus netral trafo.

B.2.2 Arus Gangguan di GI 2

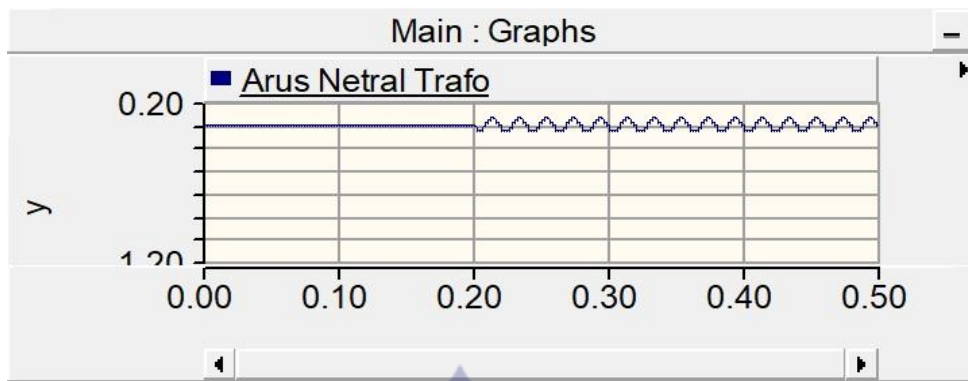
- Gangguan terjadi pada resistansi 10Ω



(a)



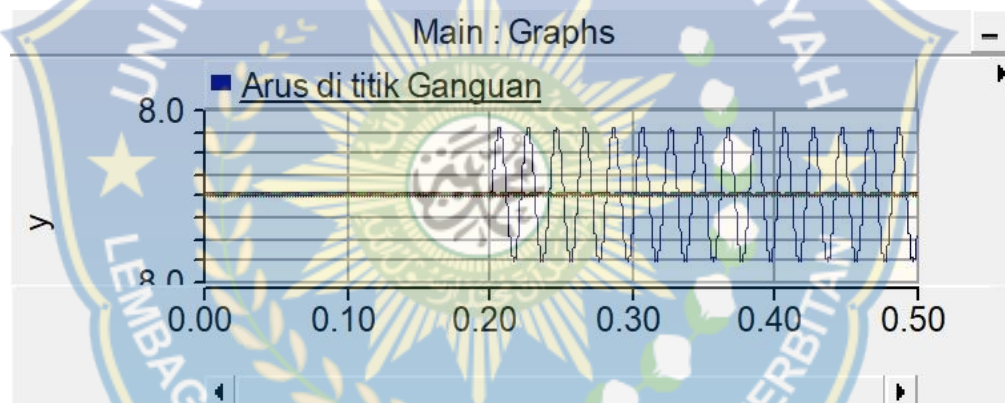
(b)



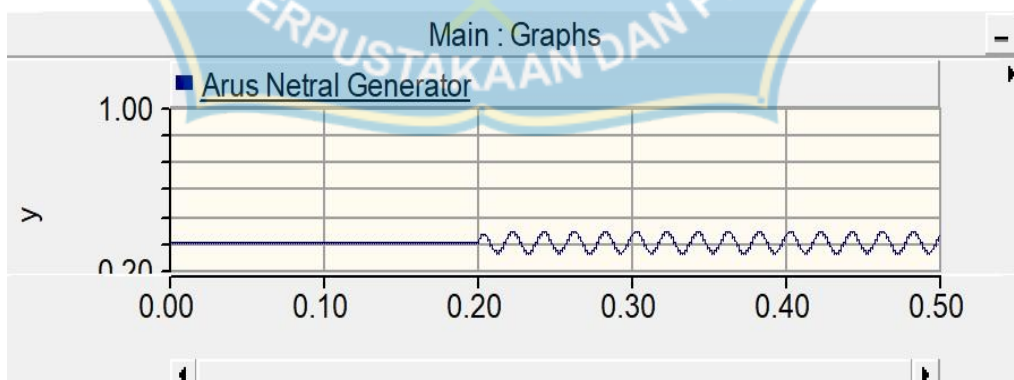
(c)

Gambar B.17 Gelombang arus dan gangguan satu fase ketanah $R_f = 10 \Omega$;
(a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c)
tampilan arus netral trafo.

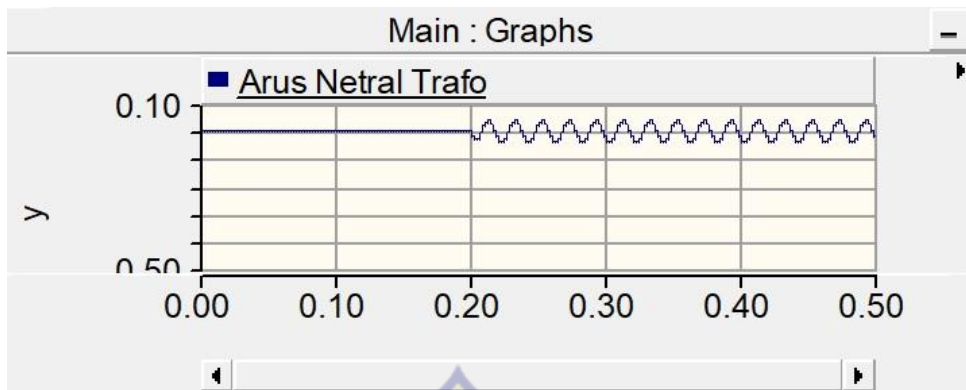
- Gangguan terjadi pada resistansi 20Ω



(a)



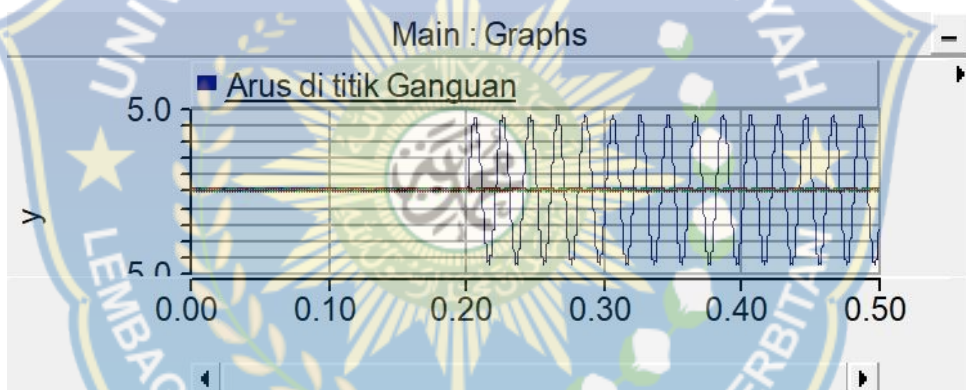
(b)



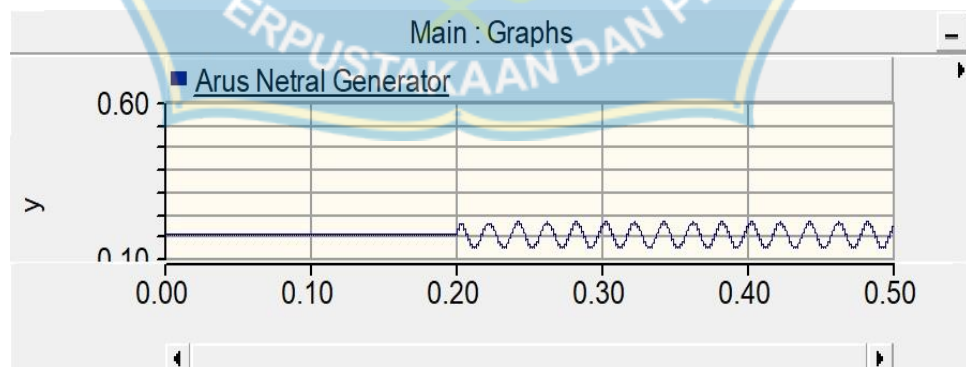
(c)

Gambar B.18 Gelombang arus dan gangguan satu fase ketanah $R_f = 20 \Omega$;
(a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c)
tampilan arus netral trafo.

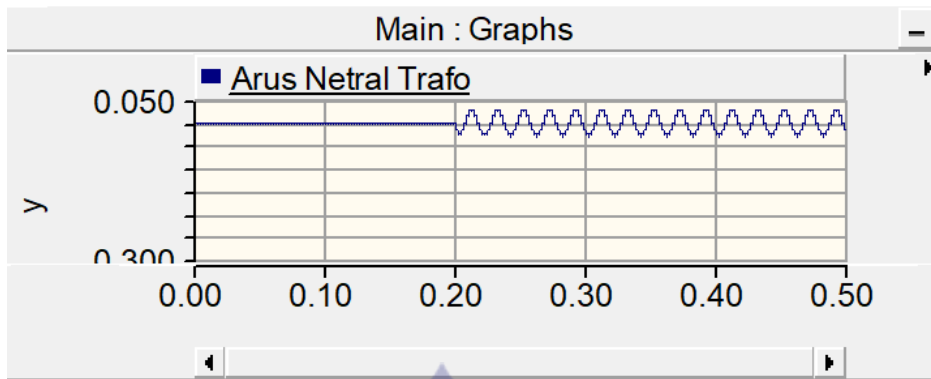
- Gangguan terjadi pada resistansi 30Ω



(a)



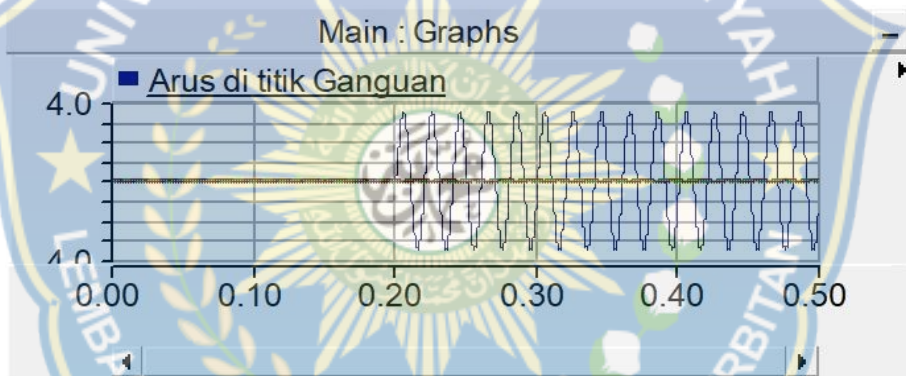
(b)



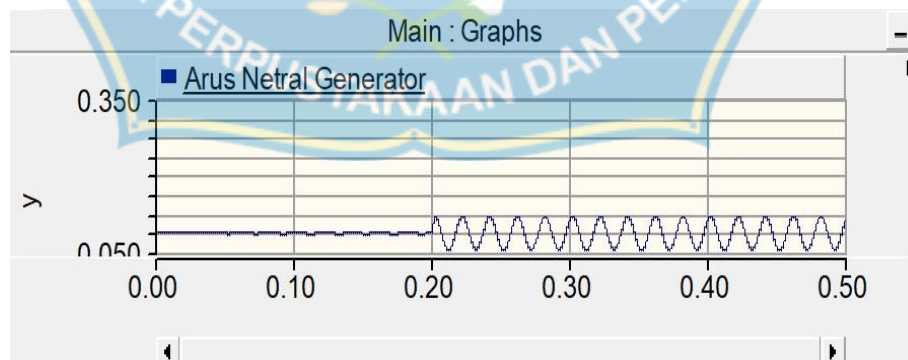
(c)

Gambar B.19 Gelombang arus dan gangguan satu fase ketanah $R_f = 30 \Omega$;
(a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c)
tampilan arus netral trafo.

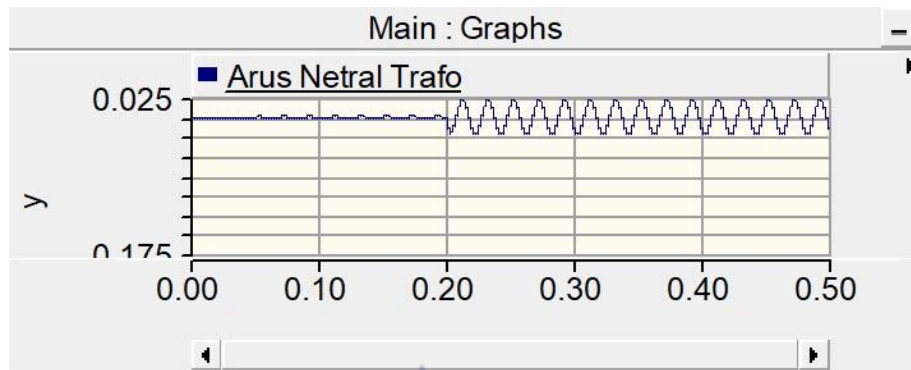
- Gangguan terjadi pada resistansi 40Ω



(a)



(b)

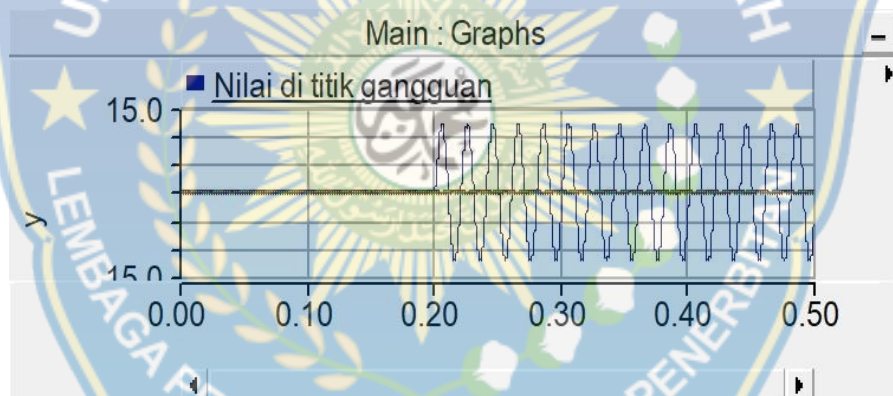


(c)

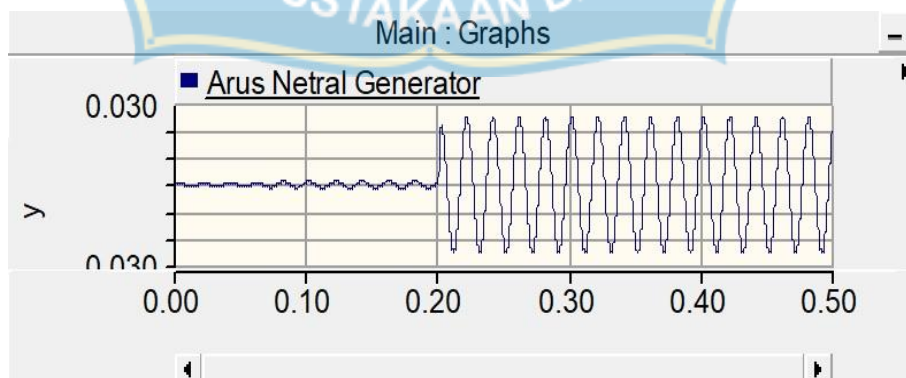
Gambar B.20 Gelombang arus dan gangguan satu fase ketanah $R_f = 40 \Omega$;
 (a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c)
 tampilan arus netral trafo.

B.2.3. Arus Gangguan di GI 3

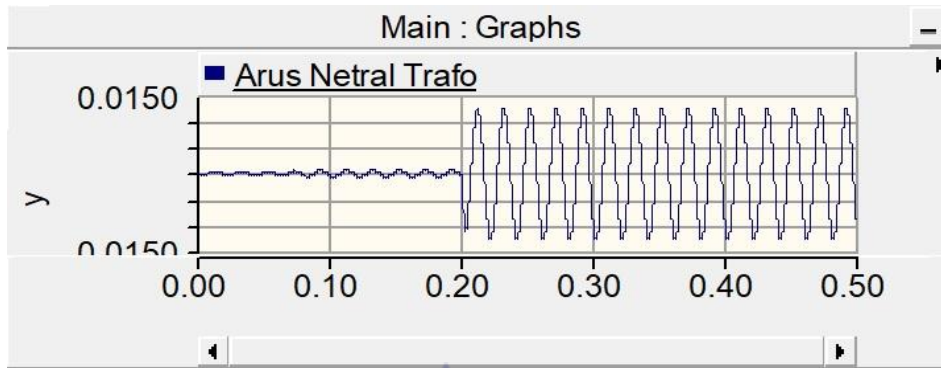
- Gangguan terjadi pada resistansi 10Ω



(a)



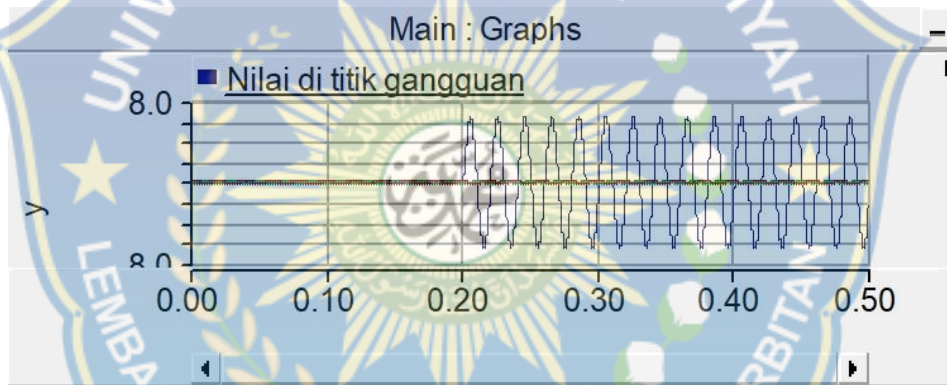
(b)



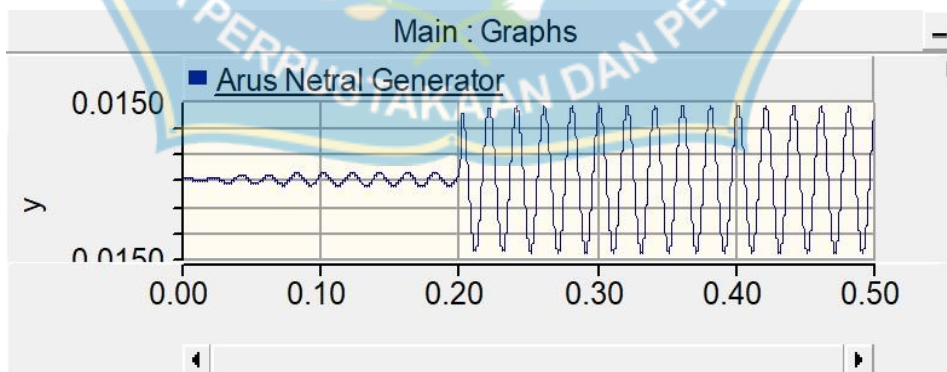
(c)

Gambar B.21 Gelombang arus dan gangguan satu fase ketanah $R_f = 10 \Omega$;
(a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c)
tampilan arus netral trafo.

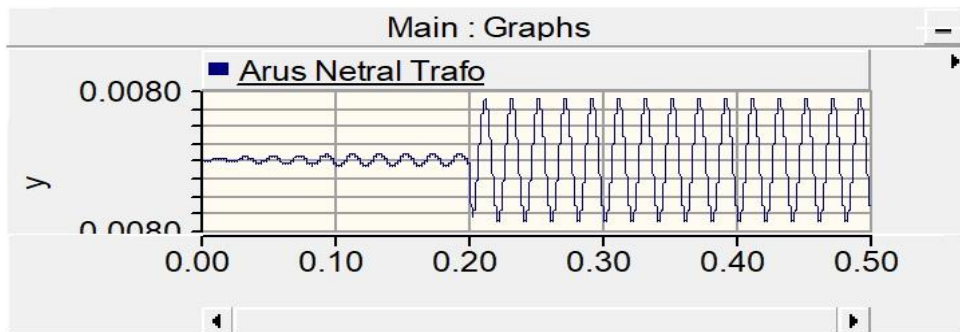
- Gangguan terjadi pada resistansi 20Ω



(a)



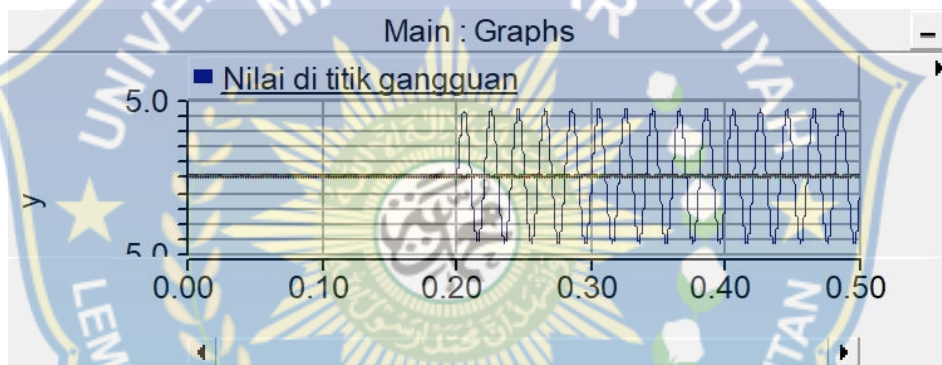
(b)



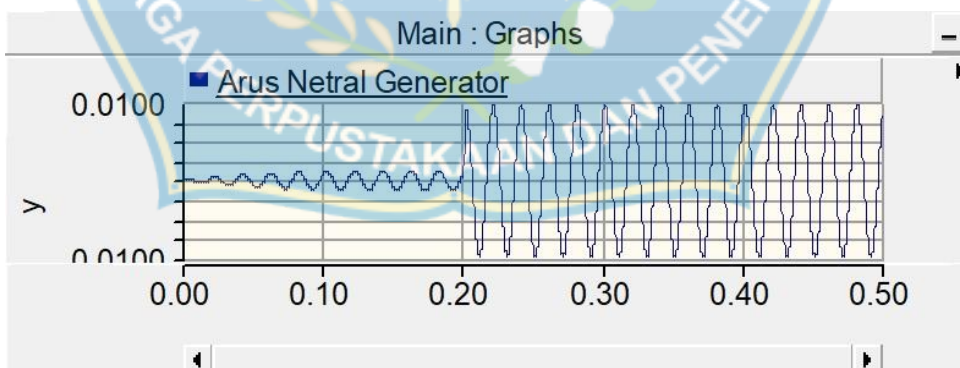
(c)

Gambar B.22 Gelombang arus dan gangguan satu fase ketanah $R_f = 20 \Omega$;
(a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c)
tampilan arus netral trafo.

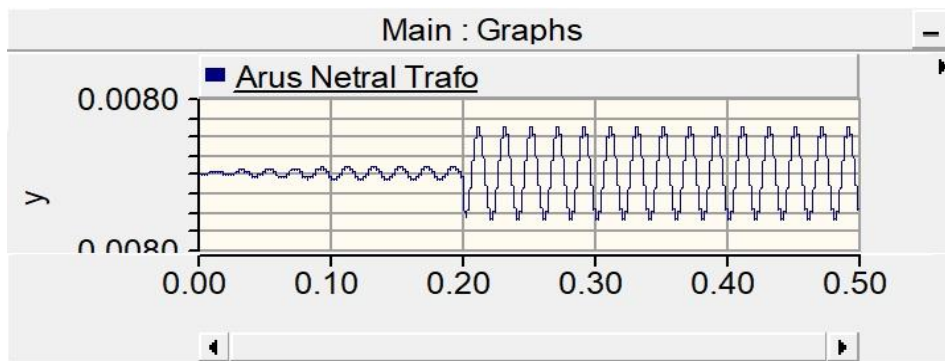
- Gangguan terjadi pada resistansi 30Ω



(a)



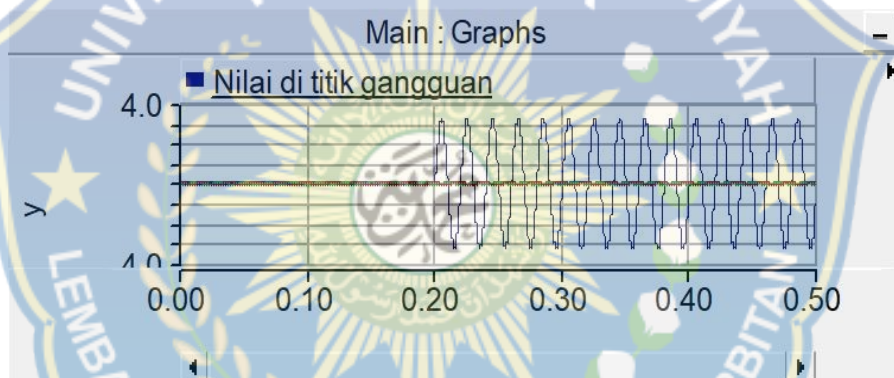
(b)



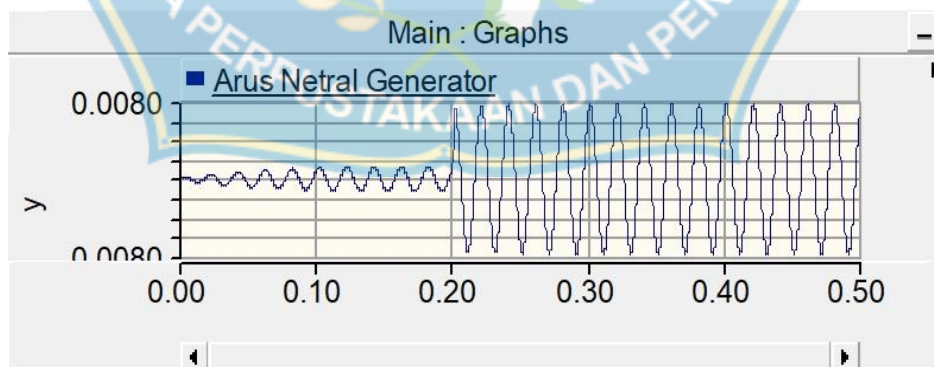
(c)

Gambar B.23 Gelombang arus dan gangguan satu fase ketanah $R_f = 30 \Omega$;
 (a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c)
 tampilan arus netral trafo.

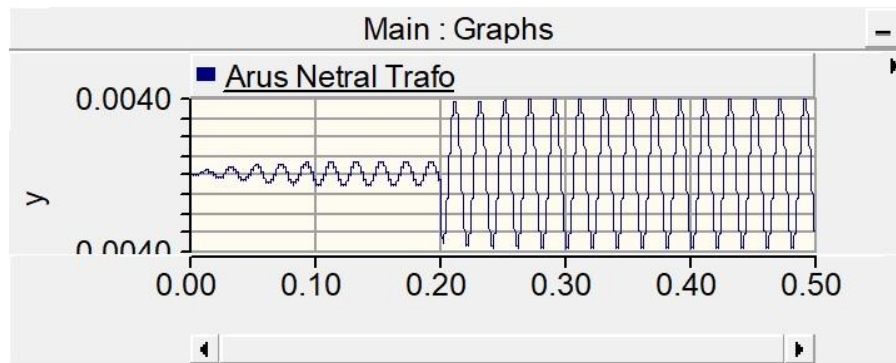
- Gangguan terjadi pada resistansi 40Ω



(a)



(b)



(c)

**Gambar B.24 Gelombang arus dan gangguan satu fase ketanah $R_f = 40 \Omega$;
 (a) tampilan arus gangguan; (b) tampilan arus netral generator; (c)
 tampilan arus netral trafo.**

