



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE 184801

**PENGARUH JENIS PENTANAHAN TRANSFORMATOR  
DAYA TEGANGAN TINGGI TERHADAP *TRANSIENT  
RECOVERY VOLTAGE* AKIBAT *SWITCHING* BEBAN  
INDUKTIF**

Fachrul Dwi Cahyo Utomo  
NRP 0711154000068

Dosen Pembimbing  
IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT.  
Danar Fahmi, ST., MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2020





**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE 184801

**PENGARUH JENIS PENTANAHAN TRANSFORMATOR  
DAYA TEGANGAN TINGGI TERHADAP *TRANSIENT  
RECOVERY VOLTAGE* AKIBAT *SWITCHING* BEBAN  
INDUKTIF**

Fachrul Dwi Cahyo Utomo  
NRP 0711154000068

Dosen Pembimbing  
IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT.  
Danar Fahmi, ST., MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2020





**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - EE 184801

**EFFECT OF GROUNDING TYPE OF HIGH VOLTAGE  
POWER TRANSFORMER ON TRANSIENT RECOVERY  
VOLTAGE DUE TO INDUCTIVE LOAD SWITCHING**

Fachrul Dwi Cahyo Utomo  
NRP 0711154000068

Supervisors  
IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT.  
Daniar Fahmi, ST., MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
Faculty of Intelligent Electrical and Informatics Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2020



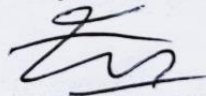
## PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul "**PENGARUH JENIS PENTANAHAN TRANSFORMATOR DAYA TEGANGAN TINGGI TERHADAP TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE AKIBAT SWITCHING BEBAN INDUKTIF**" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Januari 2020



Fachrul Dwi Cahyo Utomo  
NRP. 0711154000068

--Halaman ini sengaja dikosongkan--



**PENGARUH JENIS PENTANAHAN TRANSFORMATOR  
DAYA TEGANGAN TINGGI TERHADAP *TRANSIENT  
RECOVERY VOLTAGE* AKIBAT *SWITCHING* BEBAN  
INDUKTIF**

**TUGAS AKHIR**

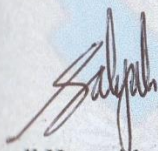
Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Departemen Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

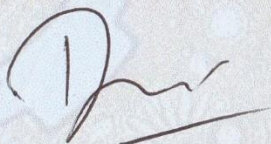
Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



Iqon Satriyadi Hernanda, ST., MT.  
NIP. 197301232002121001

Dosen Pembimbing II



Daniar Fahmi, ST., MT.  
NIP. 198909252014041002



*--Halaman ini sengaja dikosongkan--*

# **PENGARUH JENIS PENTANAHAN TRANSFORMATOR DAYA TEGANGAN TINGGI TERHADAP *TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE* AKIBAT *SWITCHING* BEBAN INDUKTIF**

Nama mahasiswa : Fachrul Dwi Cahyo Utomo  
Dosen Pembimbing I : IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT.  
Dosen Pembimbing II : Daniar Fahmi, ST., MT.

## **ABSTRAK**

*Transient recovery voltage* (TRV) merupakan tegangan yang muncul pada sela kontak *circuit breaker* (pemutus tenaga) selama proses interupsi berlangsung. Selama proses interupsi, busur api terjadi secara terus-menerus hingga gelombang arus mencapai nol. Dalam beberapa mikro detik setelahnya, arus berhenti mengalir dan muncullah fenomena TRV. Proses interupsi dikatakan berhasil jika *circuit breaker* mampu bertahan terhadap keberadaan TRV dan tegangan pemulihan frekuensi daya. Tugas akhir ini akan membahas mengenai pengaruh beberapa jenis pentanahan pada transformator daya tegangan tinggi terhadap TRV pada *circuit breaker* akibat *switching* beban induktif. Rangkaian sistem gardu induk dan sistem-sistem pentanahannya dimodelkan dan disimulasikan menggunakan perangkat lunak komputer. Hasil dari simulasi akan dianalisis untuk didapatkan pengaruh dari jenis pentanahan pada transformator daya tegangan tinggi terhadap karakteristik TRV yang terjadi. Sehingga, harapannya tugas akhir ini dapat digunakan sebagai pertimbangan dalam mendesain jenis pentanahan pada transformator tegangan tinggi. Hasil dari tugas akhir ini menunjukkan bahwa konfigurasi sistem pentanahan yang aman diaplikasikan pada transformator daya tegangan tinggi adalah *Solid – Resistance* dengan nilai resistansi  $\geq 40 \Omega$ .

**Kata kunci:** Pengaruh, *Transient Recovery Voltage*, *Circuit Breaker*, Transformator Daya, *Switching*.

*--Halaman ini sengaja dikosongkan--*

# **EFFECT OF GROUNDING TYPE OF HIGH VOLTAGE POWER TRANSFORMER ON TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE DUE TO INDUCTIVE LOAD SWITCHING**

Student Name : Fachrul Dwi Cahyo Utomo  
Supervisor I : IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT.  
Supervisor II : Daniar Fahmi, ST., MT.

## **ABSTRACT**

Transient recovery voltage (TRV) is a voltage that occurs on the circuit breaker contact during the interruption process. During the interruption process, arcs occur continuously until the current wave reaches zero. Within a few micro seconds after that, the current stops flowing and the TRV phenomenon appears. The breaking operation will be successful if the circuit breaker is able to withstand the TRV and the power frequency recovery voltage. This final project will discuss the effect of several types of grounding on high voltage power transformers to TRV on circuit breakers due to inductive load switching. The series of substations and grounding systems are modeled and simulated using computer software. The results of the simulation will be analyzed to obtain the effect of grounding type on the high voltage power transformer on the TRV characteristics that occur. Hopefully, this final project could be used as a consideration in designing the type of grounding in high voltage transformers. The results of this final project show that a secure earth system configuration applied to high voltage power transformers is Solid - Resistance with a resistance value  $\geq 40 \Omega$ .

**Key Word: Effect, Transient Recovery Voltage, Circuit Breaker, Power Transformer, Switching.**

*--Halaman ini sengaja dikosongkan--*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala rahmat, karunia, dan petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul **“PENGARUH JENIS PENTANAHAN TRANSFORMATOR DAYA TEGANGAN TINGGI TERHADAP *TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE* AKIBAT *SWITCHING* BEBAN INDUKTIF”**.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia dan petunjuk-Nya.
2. Ibu Atik Kadarwati Setyaningsih, (Alm.) Bapak Sumardi Utomo, serta Mbak Hannifa Amalia Arsyitowati selaku Ibu, Ayah dan Kakak dari penulis atas doa dan cinta yang tak henti-hentinya selalu dicurahkan kepada penulis dalam keadaan apapun. Semoga Allah SWT senantiasa melindungi dan memberi mereka tempat terbaik kelak di surga-Nya.
3. Bapak IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT. dan Bapak Daniar Fahmi, ST., MT. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
4. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan menciptakan suasana belajar yang nyaman.
5. Teman-teman seperjuangan e55 yang telah berjuang bersama selama masa kuliah sampai penyusunan tugas akhir ini.
6. Teman-teman Kasih Ibu Tiada Tara: Andre, Fauzi, Bagas, Refky, Tanto, Sandro, Wildan, Ekky dan Fiya yang memberikan dukungan dan berjuang bersama.
7. Teman-teman Omah Solits: Arkan, Mail, Dhundhux, Bagas, Chandra, Luthfi dan Hasbi yang telah menghibur dan memberikan semangat selama pengerjaan tugas akhir ini.
8. Pihak-pihak lain yang belum bisa penulis sebutkan satu per satu yang ikut membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini.

Penulis telah berusaha maksimal dalam penyusunan tugas akhir ini. Namun tetap besar harapan penulis untuk menerima saran dan kritik untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat yang luas.

Surabaya, Januari 2020

Penulis



## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b>	
<b>PERNYATAAN KEASLIAN</b>	
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b>	
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>iii</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>v</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>vii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xi</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xvii</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Sistematika Penulisan .....	3
<b>BAB 2 CIRCUIT BREAKER, TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE, DAN SISTEM PENTANAHAN</b> .....	<b>5</b>
2.1 Sistem Tenaga Listrik .....	5
2.1.1 Pusat Pembangkit Tenaga Listrik .....	6
2.1.2 Sistem Transmisi dan Distribusi Tenaga Listrik .....	6
2.1.3 Gardu Induk .....	7
2.2 <i>Circuit Breaker</i> .....	9
2.2.1 Hubungan <i>Circuit Breaker</i> dengan Relai .....	11
2.2.2 Komponen <i>Circuit Breaker</i> serta Fungsinya .....	12
2.2.3 Klasifikasi <i>Circuit Breaker</i> .....	13
2.3 <i>Transient Recovery Voltage (TRV)</i> .....	15
2.3.1 Proses Terjadinya <i>Transient Recovery Voltage</i> .....	17
2.3.2 Faktor-faktor yang Mempengaruhi <i>TRV</i> .....	18
2.3.3 Efek <i>TRV</i> terhadap <i>Circuit Breaker</i> .....	18
2.3.4 Standar <i>TRV</i> pada <i>Circuit Breaker</i> .....	19
2.4 Transformator Daya .....	21
2.4.1 Hubungan Transformator Tiga Fasa .....	22
2.4.2 Jenis-jenis Konfigurasi Hubungan Belitan Transformator Daya Tiga Fasa .....	23
2.5 Sistem Pentanahan Titik Netral .....	24
2.5.1 Pentanahan Netral Langsung .....	24
2.5.2 Pentanahan Netral dengan Tahanan .....	25
2.5.3 Pentanahan Netral dengan Kumputan / <i>Petersen Coil</i> .....	26
2.5.4 Pentanahan Netral Tidak Diketanahkan .....	26

<b>BAB 3 PEMODELAN RANGKAIAN <i>TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE</i> DAN VARIASI SISTEM PENTANAHAN PADA TRANSFORMATOR DAYA .....</b>	<b>27</b>
3.1 Pemodelan Rangkaian <i>Transient Recovery Voltage</i> .....	27
3.2 Nilai Tegangan Transformator Daya saat Kondisi Normal .....	29
3.3 Konfigurasi Sistem Pentanahan.....	29
3.3.1 Rangkaian Transformator Daya dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Solid – Solid</i> pada Simulasi <i>Transient Recovery Voltage</i> .....	30
3.3.2 Rangkaian Transformator Daya dengan Sistem Pentanahan <i>Solid – Floating</i> pada Simulasi <i>Transient Recovery Voltage</i> .....	30
3.3.3 Rangkaian Transformator Daya dengan Sistem Pentanahan <i>Floating – Solid</i> pada Simulasi <i>Transient Recovery Voltage</i> .....	31
3.3.4 Rangkaian Transformator Daya dengan Sistem Pentanahan <i>Floating – Floating</i> pada Simulasi <i>Transient Recovery Voltage</i> .....	31
3.3.5 Rangkaian Transformator Daya dengan Sistem Pentanahan <i>Solid – Resistance</i> pada Simulasi <i>Transient Recovery Voltage</i> .....	32
3.3.6 Rangkaian Transformator Daya dengan Sistem Pentanahan <i>Solid – Reactor</i> pada Simulasi <i>Transient Recovery Voltage</i> .....	32
3.4 Konfigurasi Gangguan Hubung Singkat.....	33
3.5 Pengambilan dan Pengolahan Data .....	33
<b>BAB 4 ANALISIS HASIL SIMULASI PENGARUH JENIS PENTANAHAN TRANSFORMATOR DAYA TERHADAP <i>TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE</i> .....</b>	<b>35</b>
4.1 Simulasi Rangkaian <i>Transient Recovery Voltage</i> dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung <i>Solid – Solid</i> .....	35
4.1.1 Respons Tegangan Saat Kondisi Normal .....	35
4.1.2 Respons Tegangan Saat Operasi Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah.....	37
4.1.3 Hasil Pengukuran <i>Transient Recovery Voltage</i> dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung <i>Solid – Solid</i> .....	38
4.2 Simulasi Rangkaian <i>Transient Recovery Voltage</i> dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung <i>Solid – Floating</i> .....	41
4.2.1 Respons Tegangan Saat Kondisi Normal .....	42
4.2.2 Respons Tegangan Saat Operasi Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah.....	43
4.2.3 Hasil Pengukuran <i>Transient Recovery Voltage</i> dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung <i>Solid – Floating</i> ....	45

4.3	Simulasi Rangkaian <i>Transient Recovery Voltage</i> dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung <i>Floating – Solid</i> .....	48
4.3.1	Respons Tegangan Saat Kondisi Normal.....	49
4.3.2	Respons Tegangan Saat Operasi Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah .....	50
4.3.3	Hasil Pengukuran <i>Transient Recovery Voltage</i> dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung <i>Floating – Solid</i> ...	52
4.4	Simulasi Rangkaian <i>Transient Recovery Voltage</i> dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung <i>Floating – Floating</i> .....	55
4.4.1	Respons Tegangan Saat Kondisi Normal.....	56
4.4.2	Respons Tegangan Saat Operasi Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah .....	57
4.4.3	Hasil Pengukuran <i>Transient Recovery Voltage</i> dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung <i>Floating – Floating</i> .....	59
4.5	Simulasi Rangkaian <i>Transient Recovery Voltage</i> dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung <i>Solid – Resistance</i> .....	62
4.5.1	Respons Tegangan Saat Kondisi Normal.....	63
4.5.2	Respons Tegangan Saat Operasi Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah .....	64
4.5.3	Hasil Pengukuran <i>Transient Recovery Voltage</i> dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung <i>Solid – Resistance 12 <math>\Omega</math></i> .....	70
4.5.4	Hasil Pengukuran <i>Transient Recovery Voltage</i> dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung <i>Solid – Resistance 40 <math>\Omega</math></i> .....	73
4.5.5	Hasil Pengukuran <i>Transient Recovery Voltage</i> dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung <i>Solid – Resistance 500 <math>\Omega</math></i> .....	75
4.6	Simulasi Rangkaian <i>Transient Recovery Voltage</i> dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung <i>Solid – Reactor</i> .....	76
4.6.1	Respons Tegangan Saat Kondisi Normal.....	76
4.6.2	Respons Tegangan Saat Operasi Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah .....	77

4.6.3	Hasil Pengukuran <i>Transient Recovery Voltage</i> dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung <i>Solid – Reactor</i> 10 mH.....	81
4.6.4	Hasil Pengukuran <i>Transient Recovery Voltage</i> dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung <i>Solid – Reactor</i> 95 mH.....	84
4.7	Analisis <i>Transient Recovery Voltage</i> pada <i>Circuit Breaker</i> Tegangan Menengah berdasarkan Hasil Simulasi .....	86
<b>BAB 5 PENUTUP .....</b>		<b>91</b>
5.1	Kesimpulan.....	91
5.2	Saran.....	91
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>		<b>93</b>
<b>BIOGRAFI PENULIS.....</b>		<b>95</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Diagram Garis Elemen Sistem Tenaga Listrik [1].....	6
<b>Gambar 2.2</b>	Diagram Garis Sistem Tenaga Listrik Interkoneksi [3]....	8
<b>Gambar 2.3</b>	Diagram Garis Suatu Gardu Induk [3].....	9
<b>Gambar 2.4</b>	Diagram Garis Sistem Tenaga Listrik Interkoneksi [3]..	10
<b>Gambar 2.5</b>	Bentuk Fisik serta Skema Konstruksi <i>Circuit Breaker</i> [3] .....	11
<b>Gambar 2.6</b>	Hubungan Relai Proteksi dengan <i>Circuit Breaker</i> [3]....	12
<b>Gambar 2.7</b>	Bentuk Konstruksi <i>CB Single Pole</i> [5].....	13
<b>Gambar 2.8</b>	Bentuk Konstruksi <i>CB Three Pole</i> [5].....	14
<b>Gambar 2.9</b>	Macam-Macam PMT berdasar Besar Tegangan Nominal [5].....	15
<b>Gambar 2.10</b>	<i>TRV</i> dan <i>Recovery Voltage</i> pada Rangkaian Resistif, Induktif dan Kapasitif [6].....	16
<b>Gambar 2.11</b>	Bentuk Sinyal Gelombang <i>TRV</i> , <i>RRRV</i> dan <i>Recovery Voltage</i> [8].....	17
<b>Gambar 2.12</b>	Proses Munculnya <i>TRV</i> dalam Bentuk Sinyal Gelombang [6].....	18
<b>Gambar 2.13</b>	Rangkaian Pengganti Hubungan Belitan Bintang pada Transformator Tiga Fasa [13].....	22
<b>Gambar 2.14</b>	Rangkaian Pengganti Hubungan Belitan Segitiga pada Transformator Tiga Fasa [13].....	23
<b>Gambar 2.15</b>	Pentanahan Netral Langsung [16].....	25
<b>Gambar 2.16</b>	Pentanahan Netral dengan Tahanan [16].....	25
<b>Gambar 2.17</b>	Pentanahan Netral dengan Kumputan Petersen [16].....	26
<b>Gambar 3.1</b>	<i>Single Line Diagram Transient Recovery Voltage</i> pada <i>Circuit Breaker</i> 20 kV.....	27
<b>Gambar 3.2</b>	Pemodelan <i>Single Line Diagram Transient Recovery Voltage</i> pada <i>Circuit Breaker</i> 20 kV pada ATPDraw .....	27
<b>Gambar 3.3</b>	Rangkaian Transformator Daya dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Solid - Solid</i> .....	30
<b>Gambar 3.4</b>	Rangkaian Transformator Daya dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Solid - Floating</i> .....	30
<b>Gambar 3.5</b>	Rangkaian Transformator Daya dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Floating - Solid</i> .....	31

<b>Gambar 3.6</b>	Rangkaian Transformator Daya dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Floating - Floating</i> .....	31
<b>Gambar 3.7</b>	Rangkaian Transformator Daya dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Solid - Resistance</i> .....	32
<b>Gambar 3.8</b>	Rangkaian Transformator Daya dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Solid - Reactor</i> .....	32
<b>Gambar 3.9</b>	Rangkaian Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah .....	33
<b>Gambar 3.10</b>	<i>Flowchart</i> Pengambilan dan Pengolahan Data .....	34
<b>Gambar 4.1</b>	Rangkaian Simulasi <i>Transient Recovery Voltage</i> dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung <i>Solid – Solid</i> .....	35
<b>Gambar 4.2</b>	Respons Tegangan Trafo Daya dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Solid – Solid</i> pada Saat Kondisi Normal (a) Tegangan Sisi Primer; (b) Tegangan Sisi Sekunder .....	36
<b>Gambar 4.3</b>	Respons Tegangan pada <i>Circuit Breaker</i> akibat Hubung Singkat Tiga Fasa pada Rangkaian dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Solid – Solid</i> pada (a) Ketiga Fasa; (b) Fasa R; (c) Fasa S; (d) Fasa T .....	38
<b>Gambar 4.4</b>	Analisis Pengukuran Respons Tegangan pada <i>Circuit Breaker</i> akibat Hubung Singkat Tiga Fasa pada Rangkaian dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Solid – Solid</i> pada (a) Fasa R; (b) Fasa S; (c) Fasa T .....	41
<b>Gambar 4.5</b>	Rangkaian Simulasi <i>Transient Recovery Voltage</i> dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung <i>Solid – Floating</i> .....	41
<b>Gambar 4.6</b>	Respons Tegangan Trafo Daya dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Solid – Floating</i> pada Saat Kondisi Normal (a) Tegangan Sisi Primer; (b) Tegangan Sisi Sekunder .	43
<b>Gambar 4.7</b>	Respons Tegangan pada <i>Circuit Breaker</i> akibat Hubung Singkat Tiga Fasa pada Rangkaian dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Solid – Floating</i> pada (a) Ketiga Fasa; (b) Fasa R; (c) Fasa S; (d) Fasa T .....	45
<b>Gambar 4.8</b>	Analisis Pengukuran Respons Tegangan pada <i>Circuit Breaker</i> akibat Hubung Singkat Tiga Fasa pada Rangkaian dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Solid – Floating</i> pada (a) Fasa R; (b) Fasa S; (c) Fasa T .....	48
<b>Gambar 4.9</b>	Rangkaian Simulasi <i>Transient Recovery Voltage</i> dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung <i>Floating – Solid</i> .....	48

<b>Gambar 4.10</b>	Respons Tegangan Trafo Daya dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Floating – Solid</i> pada Saat Kondisi Normal (a) Tegangan Sisi Primer; (b) Tegangan Sisi Sekunder .	50
<b>Gambar 4.11</b>	Respons Tegangan pada <i>Circuit Breaker</i> akibat Hubung Singkat Tiga Fasa pada Rangkaian dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Floating – Solid</i> pada (a) Ketiga Fasa; (b) Fasa R; (c) Fasa S; (d) Fasa T .....	52
<b>Gambar 4.12</b>	Analisis Pengukuran Respons Tegangan pada <i>Circuit Breaker</i> akibat Hubung Singkat Tiga Fasa pada Rangkaian dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Floating – Solid</i> pada (a) Fasa R; (b) Fasa S; (c) Fasa T .....	55
<b>Gambar 4.13</b>	Rangkaian Simulasi <i>Transient Recovery Voltage</i> dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung <i>Floating – Floating</i> .....	55
<b>Gambar 4.14</b>	Respons Tegangan Trafo Daya dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Floating – Floating</i> pada Saat Kondisi Normal (a) Tegangan Sisi Primer; (b) Tegangan Sisi Sekunder .....	57
<b>Gambar 4.15</b>	Respons Tegangan pada <i>Circuit Breaker</i> akibat Hubung Singkat Tiga Fasa pada Rangkaian dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Floating – Floating</i> pada (a) Ketiga Fasa; (b) Fasa R; (c) Fasa S; (d) Fasa T .....	59
<b>Gambar 4.16</b>	Analisis Pengukuran Respons Tegangan pada <i>Circuit Breaker</i> akibat Hubung Singkat Tiga Fasa pada Rangkaian dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Floating – Floating</i> pada (a) Fasa R; (b) Fasa S; (c) Fasa T .....	62
<b>Gambar 4.17</b>	Rangkaian Simulasi <i>Transient Recovery Voltage</i> dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung <i>Solid – Resistance</i> .....	62
<b>Gambar 4.18</b>	Respons Tegangan Trafo Daya dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Solid – Resistance</i> pada Saat Kondisi Normal (a) Tegangan Sisi Primer; (b) Tegangan Sisi Sekunder .	64
<b>Gambar 4.19</b>	Respons Tegangan pada <i>Circuit Breaker</i> akibat Hubung Singkat Tiga Fasa pada Rangkaian dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Solid – Resistance</i> bernilai 12 $\Omega$ pada (a) Ketiga Fasa; (b) Fasa R; (c) Fasa S; (d) Fasa T .....	66
<b>Gambar 4.20</b>	Respons Tegangan pada <i>Circuit Breaker</i> akibat Hubung Singkat Tiga Fasa pada Rangkaian dengan Konfigurasi	

	Pentanahan <i>Solid – Resistance</i> bernilai 40 $\Omega$ pada (a) Ketiga Fasa; (b) Fasa R; (c) Fasa S; (d) Fasa T .....	68
<b>Gambar 4.21</b>	Respons Tegangan pada <i>Circuit Breaker</i> akibat Hubung Singkat Tiga Fasa pada Rangkaian dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Solid – Resistance</i> bernilai 500 $\Omega$ pada (a) Ketiga Fasa; (b) Fasa R; (c) Fasa S; (d) Fasa T .....	70
<b>Gambar 4.22</b>	Analisis Pengukuran Respons Tegangan pada <i>Circuit Breaker</i> akibat Hubung Singkat Tiga Fasa pada Rangkaian dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Solid – Resistance</i> 12 $\Omega$ pada (a) Fasa R; (b) Fasa S; (c) Fasa T .....	73
<b>Gambar 4.23</b>	Analisis Pengukuran Respons Tegangan pada <i>Circuit Breaker</i> akibat Hubung Singkat Tiga Fasa pada Rangkaian dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Solid – Resistance</i> 40 $\Omega$ pada (a) Fasa R; (b) Fasa S; (c) Fasa T .....	75
<b>Gambar 4.24</b>	Rangkaian Simulasi <i>Transient Recovery Voltage</i> dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung <i>Solid – Reactor</i> .....	76
<b>Gambar 4.25</b>	Respons Tegangan Trafo Daya dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Solid – Reactor</i> pada Saat Kondisi Normal (a) Tegangan Sisi Primer; (b) Tegangan Sisi Sekunder .....	77
<b>Gambar 4.26</b>	Respons Tegangan pada <i>Circuit Breaker</i> akibat Hubung Singkat Tiga Fasa pada Rangkaian dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Solid – Reactor</i> bernilai 10 mH pada (a) Ketiga Fasa; (b) Fasa R; (c) Fasa S; (d) Fasa T .....	79
<b>Gambar 4.27</b>	Respons Tegangan pada <i>Circuit Breaker</i> akibat Hubung Singkat Tiga Fasa pada Rangkaian dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Solid – Reactor</i> bernilai 95 mH pada (a) Ketiga Fasa; (b) Fasa R; (c) Fasa S; (d) Fasa T .....	81
<b>Gambar 4.28</b>	Analisis Pengukuran Respons Tegangan pada <i>Circuit Breaker</i> akibat Hubung Singkat Tiga Fasa pada Rangkaian dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Solid – Reactor</i> 10 mH pada (a) Fasa R; (b) Fasa S; (c) Fasa T .....	84
<b>Gambar 4.29</b>	Analisis Pengukuran Respons Tegangan pada <i>Circuit Breaker</i> akibat Hubung Singkat Tiga Fasa pada Rangkaian dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Solid – Reactor</i> 95 mH pada (a) Fasa R; (b) Fasa S; (c) Fasa T .....	86
<b>Gambar 4.30</b>	Nilai Tegangan Puncak dalam Satuan Per Unit pada Berbagai Konfigurasi Pentanahan .....	87



<b>Gambar 4.31</b> Waktu yang Dibutuhkan untuk Mencapai Puncak Tegangan pada Berbagai Konfigurasi Pentanahan .....	88
<b>Gambar 4.32</b> Nilai <i>Rate of Rise of Recovery Voltage</i> pada Berbagai Konfigurasi Pentanahan .....	89

*--Halaman ini sengaja dikosongkan--*

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Standar <i>TRV</i> untuk <i>Circuit Breaker</i> Berkapasitas < 100 kV	20
<b>Tabel 2.2</b> Standar <i>TRV</i> untuk <i>Circuit Breaker</i> Berkapasitas $\geq$ 100 kV	21
<b>Tabel 3.1</b> Parameter Rangkaian Pemodelan <i>Transient Recovery Voltage</i> .....	28
<b>Tabel 3.2</b> Parameter Pemodelan Transformator Daya 150/20 kV .....	28
<b>Tabel 4.1</b> Hasil Pengukuran <i>TRV</i> pada Sistem dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Solid - Solid</i> .....	39
<b>Tabel 4.2</b> Hasil Pengukuran <i>TRV</i> pada Sistem dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Solid - Floating</i> .....	46
<b>Tabel 4.3</b> Hasil Pengukuran <i>TRV</i> pada Sistem dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Floating - Solid</i> .....	53
<b>Tabel 4.4</b> Hasil Pengukuran <i>TRV</i> pada Sistem dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Floating - Floating</i> .....	60
<b>Tabel 4.5</b> Hasil Pengukuran <i>TRV</i> pada Sistem dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Solid – Resistance</i> 12 $\Omega$ .....	71
<b>Tabel 4.6</b> Hasil Pengukuran <i>TRV</i> pada Sistem dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Solid – Resistance</i> 40 $\Omega$ .....	73
<b>Tabel 4.7</b> Hasil Pengukuran <i>TRV</i> pada Sistem dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Solid – Reactor</i> 10 mH .....	82
<b>Tabel 4.8</b> Hasil Pengukuran <i>TRV</i> pada Sistem dengan Konfigurasi Pentanahan <i>Solid – Reactor</i> 95 mH .....	84
<b>Tabel 4.9</b> Nilai Tegangan Puncak dalam Satuan Per Unit pada Berbagai Konfigurasi Pentanahan .....	88
<b>Tabel 4.10</b> Waktu yang Dibutuhkan untuk Mencapai Puncak Tegangan pada Berbagai Konfigurasi Pentanahan .....	89
<b>Tabel 4.11</b> Nilai <i>Rate of Rise of Recovery Voltage</i> pada Berbagai Konfigurasi Pentanahan .....	90

*--Halaman ini sengaja dikosongkan--*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Tidak dapat dipungkiri bahwa kebutuhan akan energi listrik saat ini merupakan salah satu kebutuhan pokok manusia dalam menjalankan kehidupan sehari-hari. Hampir di seluruh kegiatan manusia saat ini menggunakan alat-alat yang mengonsumsi energi listrik sebagai sumber energinya. Untuk dapat digunakan oleh konsumen, energi listrik harus melalui suatu proses yang cukup panjang. Proses tersebut dimulai dari proses pembangkitan, lalu penyaluran melalui saluran transmisi, dan yang terakhir yaitu proses distribusi hingga akhirnya dapat digunakan oleh konsumen. Di dalam prosesnya yang cukup panjang untuk menyalurkan daya listrik, tidak menutup kemungkinan adanya suatu gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik, seperti hubung singkat ataupun beban lebih. Di sisi lain suatu sistem tenaga listrik dituntut untuk andal dan terjaga kestabilannya jika terjadi gangguan. Oleh karenanya, suatu sistem tenaga listrik harus dilengkapi dengan sistem proteksi sehingga pelayanan sistem dapat berjalan secara kontinu. Salah satu peralatan proteksi yang dibutuhkan yaitu *circuit breaker* (pemutus tenaga).

*Circuit breaker* berfungsi untuk menghubungkan atau memutuskan aliran daya listrik dalam segala kondisi, termasuk pada saat suatu sistem tenaga listrik mengalami gangguan, baik itu gangguan hubung singkat ataupun gangguan beban berlebih. Salah satu syarat yang harus dimiliki oleh *circuit breaker* agar dapat melaksanakan fungsinya adalah dapat memutuskan dan menghubungkan jaringan dalam keadaan dengan beban maupun terhubung singkat tanpa menyebabkan kerusakan pada *circuit breaker* itu sendiri. Namun selama proses interupsi (pemutusan) pada *circuit breaker* berlangsung, muncul busur api pada sela kontak yang terjadi secara terus-menerus sampai gelombang arus mencapai nol. Dalam beberapa mikro detik setelah gelombang arus mencapai nol, arus berhenti mengalir dan muncul tegangan antar sela kontak yang dinamakan dengan *Transient Recovery Voltage* (TRV). Proses interupsi dikatakan berhasil jika *circuit breaker* mampu bertahan terhadap keberadaan TRV dan tegangan pemulihan frekuensi daya. Keberadaan TRV patut diperhatikan agar *circuit breaker* tidak gagal bekerja dalam mengamankan sistem tenaga listrik.

Dari permasalahan tersebut di atas, maka dilakukan studi mengenai faktor-faktor yang mampu mempengaruhi besarnya *transient recovery voltage*. Pada tugas akhir ini, dilakukan studi mengenai pengaruh dari berbagai jenis pentanahan pada transformator daya tegangan tinggi terhadap besarnya *transient recovery voltage* akibat *switching* beban induktif. Studi ini dilakukan dengan cara simulasi menggunakan pemodelan rangkaian sistem gardu induk tegangan tinggi melalui perangkat lunak ATPDraw.

Masalah yang dibahas pada studi ini adalah bagaimanakah karakteristik *transient recovery voltage* yang timbul akibat gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah berupa proses *switching* pada *circuit breaker* yang melindungi transformator daya tegangan tinggi dengan berbagai macam konfigurasi pentanahan dan pengaruh yang ditimbulkannya serta jenis konfigurasi pentanahan manakah yang paling efektif untuk diterapkan pada transformator daya tegangan tinggi mempertimbangkan *transient recovery voltage* yang ada. Batasan masalah pada studi ini adalah rangkaian simulasi pemacu *transient recovery voltage* pada *circuit breaker* pada transformator daya tegangan tinggi pada gardu induk 150/20 kV yang menggunakan berbagai konfigurasi sistem pentanahan dengan data asumsi dan simulasi dijalankan dengan media perangkat lunak ATPDraw. Batasan masalah lainnya adalah gangguan yang diberikan untuk memicu munculnya *transient recovery voltage* adalah berupa gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah.

Tujuan dan manfaat dari hasil studi ini diharapkan dapat menganalisis karakteristik *transient recovery voltage* yang timbul akibat gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah berupa proses *switching* pada *circuit breaker* yang melindungi transformator daya tegangan tinggi dengan berbagai macam konfigurasi pentanahan dan pengaruh yang ditimbulkannya serta menentukan jenis konfigurasi pentanahan yang paling efektif untuk diterapkan pada transformator daya tegangan tinggi mempertimbangkan *transient recovery voltage* yang ada sehingga dapat menjadi pertimbangan dalam merencanakan pengadaan gardu induk tegangan tinggi.

Metodologi yang digunakan dalam menyusun tugas akhir ini dimulai dari studi literatur, yaitu mempelajari buku-buku dan referensi-referensi yang dilakukan guna mendapatkan definisi, penjelasan dan semua tulisan yang berkaitan dengan tugas akhir ini. Beberapa kata kunci yang bisa disebutkan untuk studi literatur ini seperti fenomena *transient*

*recovery voltage*, gardu induk dan sistem pentanahan. Selain itu, di dalam studi literatur juga mempelajari mengenai pemodelan gardu induk yang akan dilakukan pada perangkat lunak ATPDraw. Setelah berbagai literatur diperoleh, selanjutnya literatur diadopsi sebagian isinya sebagai pendukung dalam pengerjaan tugas akhir ini. Setelah itu dilanjutkan dengan melakukan berbagai persiapan untuk pengumpulan data gardu induk dan sistem pentanahan guna melakukan pemodelan rangkaian gardu induk untuk dilakukan simulasi dalam perangkat lunak ATPDraw. Setelah pemodelan selesai dikerjakan, selanjutnya dilakukan simulasi dengan memvariasikan konfigurasi sistem pentanahan yang digunakan pada transformator daya tegangan tinggi dan kemudian diambil datanya. Setelah data sinyal sampel didapatkan selanjutnya dilakukan pengolahan dan analisis data yang bertujuan untuk mengolah data sinyal *transient recovery voltage* yang didapat dari simulasi untuk diambil nilai puncak tegangannya, waktu menuju puncak tegangan, serta *rate of rise of recovery voltage (rrrv)*-nya. Tahap terakhir dilakukan dengan penarikan kesimpulan dan penyusunan laporan tugas akhir berdasarkan studi yang telah dilakukan.

## **1.2 Sistematika Penulisan**

Bab 1 berisi pembahasan mengenai latar belakang, perumusan dan batasan masalah, tujuan pelaksanaan tugas akhir serta manfaat yang diharapkan, metodologi yang digunakan, serta sistematika penulisan.

Bab 2 berisikan mengenai teori pendukung tentang gardu induk, transformator daya, *circuit breaker*, *transient recovery voltage*, serta sistem pentanahan.

Bab 3 berisikan pemodelan rangkaian yang menggambarkan gardu induk tegangan tinggi pada sistem kelistrikan, simulasi untuk mendapatkan nilai *transient recovery voltage*, *rise time to peak* serta *rate of rise of recovery voltage* dengan gangguan berupa hubung singkat tiga fasa ke tanah pada perangkat lunak ATPDraw.

Bab 4 berisikan hasil dari simulasi *transient recovery voltage* pada pemodelan rangkaian yang telah dibuat. Kemudian dilakukan analisis terhadap hasil simulasi yang diperoleh dari tiap-tiap rangkaian yang divariasikan sistem pentanahannya.

Bab 5 berisi kesimpulan yang dapat ditarik berdasarkan analisis hasil simulasi dan saran yang berkaitan dengan studi ini.

*--Halaman ini sengaja dikosongkan--*



## **BAB 2**

### ***CIRCUIT BREAKER, TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE, DAN SISTEM PENTANAHAN***

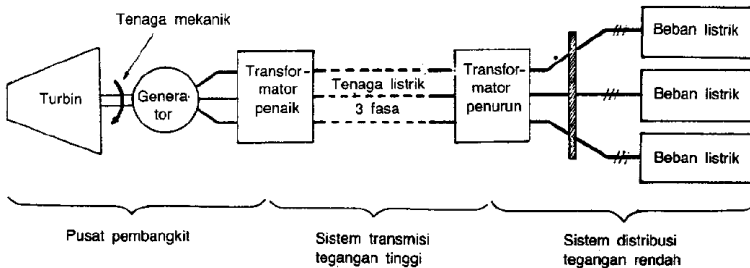
#### **2.1 Sistem Tenaga Listrik**

Energi listrik merupakan salah satu bentuk energi yang sangat bermanfaat untuk menunjang pemenuhan kebutuhan manusia dalam kehidupan sehari-hari. Energi listrik dibutuhkan dalam berbagai lini kehidupan masyarakat, mulai dari untuk mengoperasikan peralatan listrik di dalam rumah tangga, untuk penerangan jalan, hingga untuk mengoperasikan peralatan-peralatan yang mengonsumsi energi listrik yang besar seperti pada perindustrian. Untuk dapat dirasakan manfaatnya seperti pada contoh di atas, energi listrik harus melalui proses yang cukup panjang yang disebut dengan sistem tenaga listrik.

Secara umum, ada tiga sub-sistem yang terdapat pada sistem tenaga listrik yaitu sistem pembangkit tenaga listrik, sistem transmisi tenaga listrik dan sistem distribusi tenaga listrik. Energi listrik akan dibangkitkan dan dikirimkan hingga sampai ke tangan konsumen. Pengiriman dalam bentuk energi listrik bukanlah tanpa alasan, karena merupakan salah satu cara paling ekonomis, mudah dan aman untuk mengirimkan energi [1].

Pada sistem pembangkitan, sumber daya energi primer seperti bahan bakar fosil, hidro, panas bumi dan nuklir diubah menjadi energi listrik menggunakan generator sinkron yang mengubah energi mekanis yang dihasilkan pada poros turbin menjadi energi listrik tiga fasa. Setelah melalui proses pembangkitan, energi listrik dinaikkan tegangannya melalui transformator penaik tegangan (*step-up transformer*) dan dikirimkan melalui saluran transmisi bertegangan tinggi menuju pusat-pusat beban. Tegangan dinaikkan dimaksudkan untuk mengurangi jumlah arus yang mengalir pada saluran transmisi agar rugi-rugi panas yang menyertainya dapat berkurang. Saat saluran transmisi mencapai pusat beban, tegangan kembali diturunkan ke tingkat tegangan menengah melalui transformator penurun tegangan (*step-down transformer*) [1].

Pada pusat-pusat beban yang terhubung dengan saluran distribusi, energi listrik diubah menjadi bentuk-bentuk energi terpakai lainnya. Rangkaian proses yang telah dijabarkan di atas dapat digambarkan pada Gambar 2.1 [1].



**Gambar 2.1** Diagram Garis Elemen Sistem Tenaga Listrik [1]

### 2.1.1 Pusat Pembangkit Tenaga Listrik

Pusat pembangkit tenaga listrik berperan dalam memproduksi serta membangkitkan tenaga listrik yang berasal dari proses konversi energi primer. Pusat pembangkit tenaga listrik mencakup Pusat Listrik Tenaga Uap (PLTU); minyak, gas alam dan batu bara, Pusat Listrik Tenaga Air (PLTA), Pusat Listrik Tenaga Gas (PLTG), Pusat Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP), dan lain sebagainya [1].

Di Indonesia, pusat pembangkit tenaga listrik memproduksi listrik melalui generator arus bolak-balik dengan frekuensi 50 Hertz (Hz) dengan proses sebagai berikut: sumber-sumber energi primer diubah menjadi energi mekanis oleh penggerak mula berupa putaran atau kecepatan, kemudian oleh generator energi mekanis tadi diubah menjadi energi listrik dengan kapasitas daya yang beragam tergantung pada kebutuhan beban [1].

### 2.1.2 Sistem Transmisi dan Distribusi Tenaga Listrik

Sistem transmisi tenaga listrik memiliki fungsi sebagai penyalur tenaga listrik yang bermula dari pusat pembangkit tenaga listrik menuju ke pusat-pusat beban melalui saluran transmisi. Hal ini terjadi karena terkadang pusat pembangkit tenaga listrik terletak jauh dari pada pusat-pusat bebannya, contohnya seperti pembangkit listrik tenaga air yang terletak dekat pada sumber energi primernya seperti air terjun yang jauh dari tempat perkotaan, sedangkan pusat beban atau letak konsumen tenaga listrik berada pada perkotaan seperti industri, komersial, pabrik dan sebagainya. Dibalik fungsinya yang dapat menyalurkan tenaga listrik dalam jarak yang jauh, saluran transmisi akan memiliki rugi-rugi daya. Oleh karenanya, untuk mengatasi hal itu tenaga listrik yang dikirim dari pusat pembangkit ke pusat beban harus ditransmisikan dalam bentuk

tegangan tinggi maupun tegangan ekstra tinggi [2]. Hal tersebut dapat dijelaskan pada persamaan di bawah:

$$\Delta P = I^2 R \quad (2.1)$$

Keterangan:

$\Delta P$  = Rugi-rugi daya transmisi (Watt)

$I^2$  = Arus pada kawat transmisi (Ampere)

$R$  = Resistansi kawat transmisi ( $\Omega$ )

Sedangkan sistem distribusi tenaga listrik memiliki peran dalam mendistribusikan tenaga listrik ke pengguna seperti industri, rumah tangga, pabrik dan sebagainya. Tegangan tinggi atau tegangan ekstra tinggi yang berada pada saluran transmisi tadi selanjutnya diubah menjadi tegangan menengah atau tegangan distribusi primer pada gardu induk, yang selanjutnya tegangannya dapat diubah kembali menjadi tegangan untuk dapat digunakan langsung oleh konsumen. Energi listrik yang telah sampai pada konsumen dapat dimanfaatkan untuk mengoperasikan mesin-mesin pada pabrik dan peralatan listrik pada rumah tangga seperti kipas angin, mesin pendingin, pompa air, pendingin ruangan, setrika, kompor, lampu dan sebagainya [2]. Singkatnya, apabila saluran transmisi berperan dalam menyalurkan tenaga listrik menggunakan tegangan tinggi atau tegangan ekstra tinggi ke pusat-pusat beban dalam jumlah besar, maka saluran distribusi berperan dalam membagikan tenaga listrik tersebut ke konsumen melalui saluran tegangan rendah [1].

### **2.1.3 Gardu Induk**

Di Indonesia, generator sinkron yang berada pada pusat pembangkit tenaga listrik pada umumnya menghasilkan tenaga listrik dengan level tegangan antara 6-20 kV yang berikutnya tegangan tersebut ditingkatkan pada kisaran 150-500 kV dengan bantuan transformator penaik tegangan. Saluran tegangan tinggi (STT) berperan menyalurkan tenaga listrik menuju ke pusat beban; di sini tegangan diturunkan menuju level tegangan 70 kV. Selanjutnya tegangan yang diterima oleh gardu induk (GI) akan dilepaskan menuju ke transformator distribusi berupa tegangan menengah 20 kV. Tegangan distribusi primer kemudian diturunkan kembali menjadi tegangan rendah 220/380 V melalui transformator distribusi, yang akhirnya sampai kepada konsumen [1]. Hubungan mengenai tegangan dan arus dalam hal ini dijelaskan dalam persamaan berikut:

$$V = IZ \quad (2.2)$$

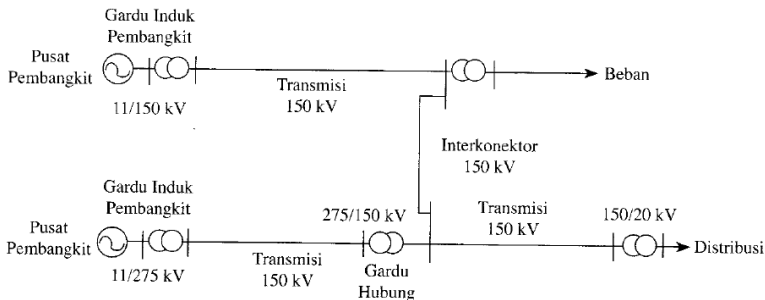
Keterangan:

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (A)

Z = Impedansi ( $\Omega$ )

Trafo-trafo daya penaik tegangan dan penurun tegangan tersebut bersama dengan perlengkapan-perengkapannya dinamakan gardu induk (GI). Selain berfungsi mentransformasikan daya listrik dari suatu level tegangan ke level tegangan lainnya, gardu induk juga berfungsi untuk melakukan pengukuran, pengawasan operasi serta pengamanan dari sistem tenaga listrik, sebagai pengaturan pelayanan beban dan juga dapat berfungsi sebagai sarana telekomunikasi yang dikenal dengan istilah SCADA. Gardu induk dapat diklasifikasikan berdasarkan fungsi, jenis trafo daya yang terpasang, serta penempatan instalasi peralatannya. Gardu induk berdasarkan fungsinya dapat dibagi atas: gardu induk pembangkit, gardu induk beban, dan gardu induk hubung. Posisi suatu gardu induk pada sistem tenaga listrik dapat dilihat pada Gambar 2.2 [3].



**Gambar 2.2** Diagram Garis Sistem Tenaga Listrik Interkoneksi [3]

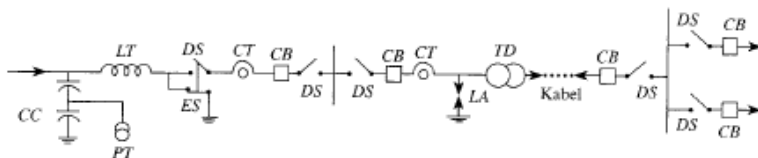
Sedangkan berdasarkan jenis trafo daya yang terpasang, gardu induk dapat dibedakan menjadi gardu induk *step-up* dan gardu induk *step-down*. Dan yang terakhir, berdasarkan penempatan instalasi peralatannya, gardu induk dibagi atas: gardu induk pasangan dalam dan gardu induk pasangan luar. Pada gardu induk pasangan luar, semua pirantinya dipasang pada ruangan terbuka. Sedangkan pada gardu induk pasangan dalam, sebagian pirantinya dipasang pada ruangan tertutup [3]. Selain mengubah daya listrik dari suatu level tegangan ke level tegangan lainnya,

gardu induk juga memiliki fungsi lain sebagai tempat untuk melakukan pengukuran, pengawasan operasi, serta pengaturan sistem proteksi dari sistem tenaga listrik.

Peralatan-peralatan tegangan tinggi yang dapat kita jumpai pada suatu gardu induk antara lain [3] :

- |   |   |
|---|---|
| a. Trafo Daya ( <i>TD</i> )               | f. Sakelar Pembumian ( <i>ES</i> )          |
| b. Pelindung Tegangan Lebih ( <i>LA</i> ) | g. Filter Frekuensi Tinggi ( <i>LT</i> )    |
| c. Pemutus Daya ( <i>CB</i> )             | h. Trafo Tegangan ( <i>PT</i> )             |
| d. Trafo Arus ( <i>CT</i> )               | i. Pembagi Tegangan Kapasitor ( <i>CC</i> ) |
| e. Sakelar Pemisah ( <i>DS</i> )          |   |

Apabila sistem tenaga listrik memerlukan suatu perbaikan faktor daya, di dalam gardu induk dipasangkan kapasitor tegangan tinggi. Pada level tegangan rendah, peralatan-peralatan di atas juga dapat dijumpai pada gardu induknya. Kapasitor, trafo arus, pelindung tegangan lebih, trafo, sekelar dan pemutus ditemui juga pada instalasi 220/380 volt. Terdapat lima hal pokok yang membedakan peralatan tegangan tinggi dengan peralatan tegangan rendah, yaitu ukuran komponen peralatan yang menghantarkan arus, sistem isolasinya, penyambungan konduktor, sistem pendinginan, dan pelindung tegangan lebih. Susunan peralatan dalam suatu gardu induk diperlihatkan pada Gambar 2.3 [3].



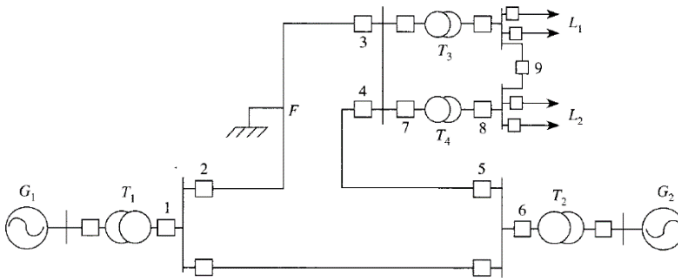
**Gambar 2.3** Diagram Garis Suatu Gardu Induk [3]

## 2.2 *Circuit Breaker*

*Circuit breaker* atau pemutus daya merupakan peralatan sakelar mekanis, yang mampu menutup, mengalirkan dan memutus arus beban dalam kondisi normal serta mampu menutup, mengalirkan (dalam periode waktu tertentu) dan memutus arus beban dalam kondisi abnormal/gangguan seperti kondisi hubung singkat (*short circuit*) [4].

*Circuit breaker* merupakan salah satu peralatan yang terdapat pada gardu induk yang berperan sebagai peralatan proteksi. Dalam sistem tenaga listrik, peralatan proteksi seperti *circuit breaker* berfungsi untuk mencegah adanya kerusakan pada peralatan sistem serta untuk

mempertahankan kestabilan sistem ketika gangguan ada. Oleh karenanya kontinuitas pelayanan sistem dapat dipertahankan. Peranan *circuit breaker* dalam mempertahankan kontinuitas pelayanan sistem tenaga listrik dapat dijelaskan dengan diagram garis yang ditunjukkan oleh Gambar 2.4 [3].



□ = Pemutus daya

**Gambar 2.4** Diagram Garis Sistem Tenaga Listrik Interkoneksi [3]

Apabila gangguan hubung singkat (*short circuit*) terjadi pada titik  $F$ , maka hal ini akan menyebabkan arus hubung singkat mengalir ke titik  $F$ , yang berasal dari generator  $G_1$  dan generator  $G_2$ . Apabila *circuit breaker* 2, 3, 4 dan 5 tidak terpasang, maka untuk menghindari kerusakan pada generator ( $G_1$  dan  $G_2$ ) dan trafo ( $T_1$  dan  $T_2$ ), *circuit breaker* 1 dan 6 harus membuka. Oleh karenanya, aliran daya ke beban terputus. Namun dengan terpasangnya *circuit breaker* 2 dan 3, maka ketika terjadi gangguan di titik  $F$ , kedua *circuit breaker* tersebut akan membuka sedangkan *circuit breaker* 1 dan 6 tetap tertutup, sehingga aliran daya ke beban tetap dipertahankan. Pada kasus ini *circuit breaker* 2 dan 3 beraksi melokalisasi jaringan yang terganggu, sehingga jaringan yang tidak bermasalah tetap dapat melanjutkan operasinya [3].

Saat terjadi gangguan hubung singkat, secara tiba-tiba generator dipaksa bekerja menghasilkan daya yang besar. Perubahan aksi yang mendadak ini dapat menimbulkan ketidakstabilan sistem. Namun bila *circuit breaker* 2 dan 3 terbuka sebelum batas waktu pemutusan kritis terlampaui, kestabilan sistem dapat dipertahankan [3].

Fungsi kerja *circuit breaker* dalam pemeliharaan komponen sistem tenaga listrik dapat pula dijelaskan dengan Gambar 2.4 di atas. Semisal trafo  $T_4$  akan menjalani pemeliharaan, maka *circuit breaker* 7 dan 8 harus dibuka. Andai *circuit breaker* 9 tidak ada, maka aliran daya ke jaringan

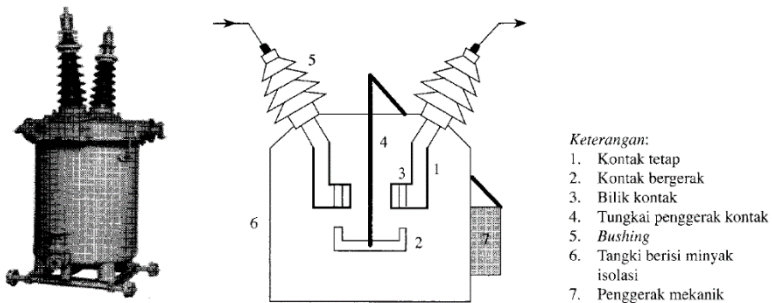
$L_2$  akan terputus. Untuk mencegah pemutusan aliran daya ke jaringan  $L_2$ , *circuit breaker* 9 ditutup sehingga jaringan  $L_2$  disulang dari trafo  $T_3$  [3].

Adapun syarat-syarat yang harus dimiliki oleh suatu *circuit breaker* agar dapat menjalankan kinerjanya di atas, adalah sebagai berikut [3]:

- a. Dapat menyalurkan arus maksimum sistem secara kontinu.
- b. Dapat memutuskan dan menutup jaringan dalam keadaan berbeban maupun terhubung singkat tanpa menimbulkan kerusakan pada *circuit breaker* itu sendiri.
- c. Mampu memutuskan arus hubung singkat dengan cepat agar arus hubung singkat tidak sampai merusak peralatan sistem, tidak membuat sistem kehilangan kestabilan dan tidak merusak *circuit breaker* itu sendiri.

### 2.2.1 Hubungan *Circuit Breaker* dengan Relai

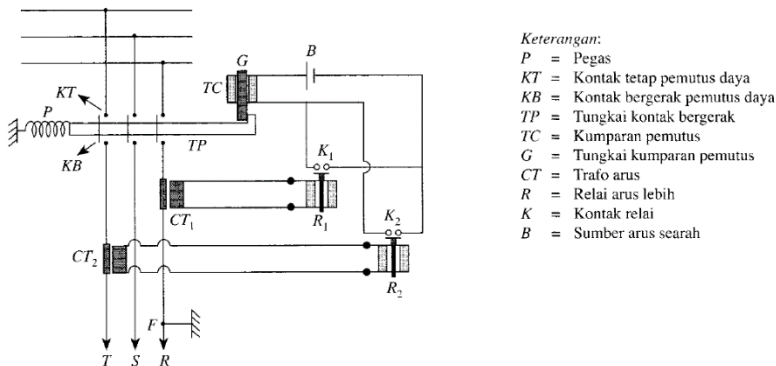
Bagian utama suatu *circuit breaker* yaitu kontak tetap dan kontak bergerak. Kontak bergerak mampu digerakkan secara manual atau dengan dukungan motor listrik atau sistem pneumatik. Apabila kontak bergerak ditarik ke arah atas, maka *circuit breaker* dalam kondisi tertutup. Namun bila kontak bergerak didorong ke arah bawah, maka *circuit breaker* dalam kondisi terbuka. Bentuk fisik serta konstruksi suatu *circuit breaker* minyak dapat dilihat pada Gambar 2.5 [3].



**Gambar 2.5** Bentuk Fisik serta Skema Konstruksi *Circuit Breaker* [3]

Hubungan kerja suatu *circuit breaker* dengan relai proteksi ditunjukkan pada Gambar 2.6. Andai hubung singkat terjadi pada fasa  $R$ , maka arus di fasa  $R$  akan melonjak relatif besar. Arus yang besar tersebut melewati kumparan primer  $CT_1$ . Dampaknya, arus yang mengalir pada kumparan sekunder  $CT_1$  dan relai  $R_1$  akan semakin besar juga. Apabila

arus tersebut melebihi *setting* arus relai, maka relai bekerja menutup kontak  $K_1$ . Dampaknya, arus akan mengalir pada kumparan pemutus  $TC$  sehingga tungkai kumparan pemutus  $G$  tertarik ke atas. Alhasil, tungkai kontak bergerak  $TP$  tertarik ke arah kiri sehingga kontak bergerak  $KB$  menjauh dari kontak tetap  $KT$ . Yang artinya, kontak *circuit breaker* terbuka [3].



**Gambar 2.6** Hubungan Relai Proteksi dengan *Circuit Breaker* [3]

### 2.2.2 Komponen *Circuit Breaker* serta Fungsinya

Suatu sistem *circuit breaker* terdiri dari beberapa sub-sistem yang memiliki beberapa komponen. Pembagian komponen dan fungsinya dilakukan berdasarkan *Failure Modes Effects Analysis (FMEA)*, sebagai berikut [5]:

- Primary*, merupakan bagian *circuit breaker* yang memiliki sifat konduktif dan memiliki fungsi sebagai penyalur energi listrik dengan nilai rugi-rugi yang rendah serta mampu menghubungkan atau memutuskan arus beban saat kondisi normal atau tidak normal.
- Dielectric*, memiliki fungsi sebagai isolasi peralatan serta mematikan busur api dengan sempurna pada saat kontak bergerak bekerja.
- Driving Mechanism*, memiliki peranan untuk menyimpan energi untuk dapat menggerakkan kontak bergerak *circuit breaker* dalam waktu tertentu sesuai dengan spesifikasinya.



- d. *Secondary*, memiliki fungsi untuk mengirimkan sinyal kontrol/*trigger* untuk mengaktifkan sub-sistem mekanik pada waktu yang tepat.

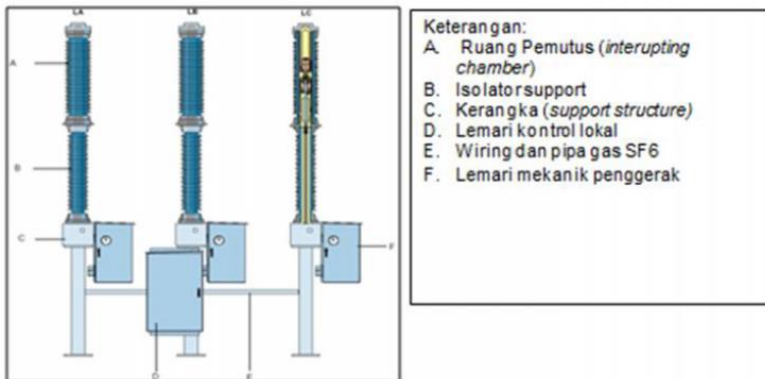
### 2.2.3 Klasifikasi *Circuit Breaker*

*Circuit breaker* dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis, antara lain berdasarkan jumlah penggerak, tegangan nominal/*rating*, media isolasi, dan proses pemadaman busur api jenis gas SF<sub>6</sub> [5].

Berdasarkan jumlah mekanik penggerak, *circuit breaker* dapat dibedakan menjadi [5]:

- a. *Circuit Breaker Single Pole*

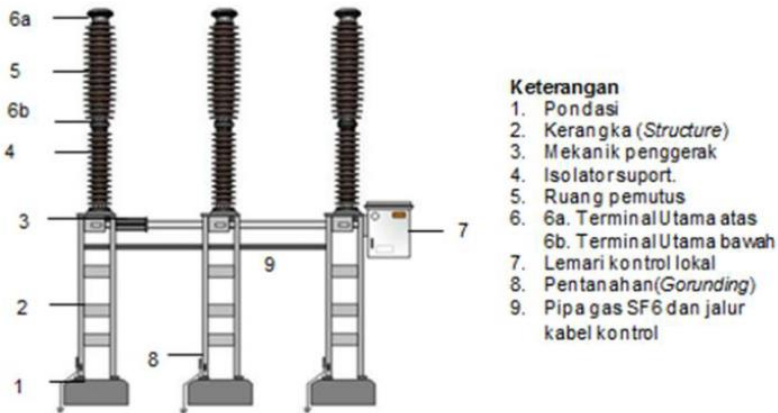
*Circuit breaker (CB)* tipe ini memiliki mekanik penggerak yang terletak pada masing-masing *pole*. Pada umumnya, *circuit breaker* jenis ini diaplikasikan pada *bay* penghantar agar *circuit breaker* dapat melakukan *reclose* satu fasa. Bentuk konstruksi *circuit breaker single pole* dapat dilihat pada Gambar 2.7.



**Gambar 2.7** Bentuk Konstruksi *CB Single Pole* [5]

- b. *Circuit Breaker Three Pole*

*Circuit breaker (CB)* jenis ini memiliki satu mekanik penggerak untuk tiga fasa, yang berfungsi untuk menghubungkan fasa satu dengan fasa lainnya, yang dilengkapi dengan kopel mekanik. Pada umumnya, *circuit breaker* jenis ini diaplikasikan pada *bay* trafo dan *bay* kopel serta *circuit breaker* 20 kV untuk distribusi. Bentuk konstruksi dari *circuit breaker* jenis ini diperlihatkan pada Gambar 2.8.

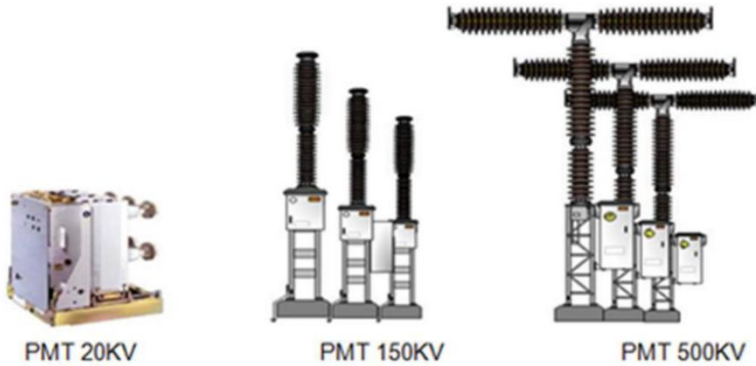


**Gambar 2.8** Bentuk Konstruksi *CB Three Pole* [5]

Sedang berdasarkan besar tegangan nominalnya, *circuit breaker* (*CB*) dapat dibedakan menjadi:

- a. *CB* Tegangan Rendah (*Low Voltage*), dengan *range* tegangan antara 0,1 s/d 1 kV.
- b. *CB* Tegangan Menengah (*Medium Voltage*), dengan *range* tegangan antara 1 s/d 35 kV.
- c. *CB* Tegangan Tinggi (*High Voltage*), dengan *range* tegangan antara 35 s/d 245 kV.
- d. *CB* Tegangan Ekstra Tinggi (*Extra High Voltage*), dengan *range* tegangan lebih besar dari 245 kVAC.

Macam-macam *circuit breaker* atau pemutus tenaga (PMT) berdasarkan besar tegangan nominalnya diperlihatkan pada Gambar 2.9 [5].



**Gambar 2.9** Macam-Macam PMT berdasar Besar Tegangan Nominal [5]

Sedangkan berdasarkan media isolasi, *circuit breaker* (CB) dapat dibedakan menjadi [5]:

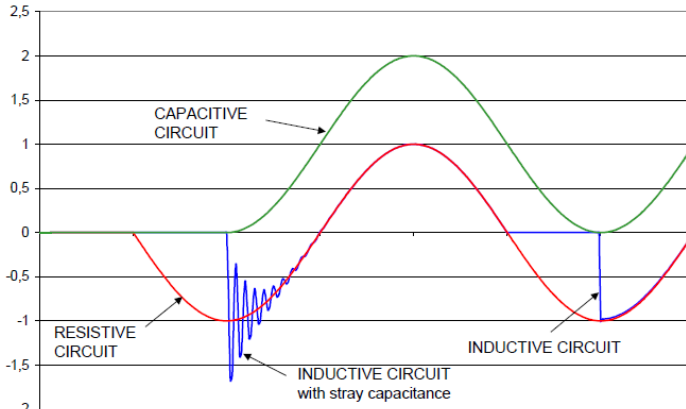
- a. CB Gas SF<sub>6</sub>
- b. CB Minyak
- c. CB Udara Hembus (*Air Blast*)
- d. CB Hampa Udara (*Vacuum*)

Dan yang terakhir, *circuit breaker* (CB) juga dapat dibedakan berdasarkan proses pemadaman busur api listrik di ruang pemutus, yaitu [5]:

- a. CB Jenis Tekanan Tunggal (*Single Pressure Type*)
- b. CB Jenis Tekanan Ganda (*Double Pressure Type*)

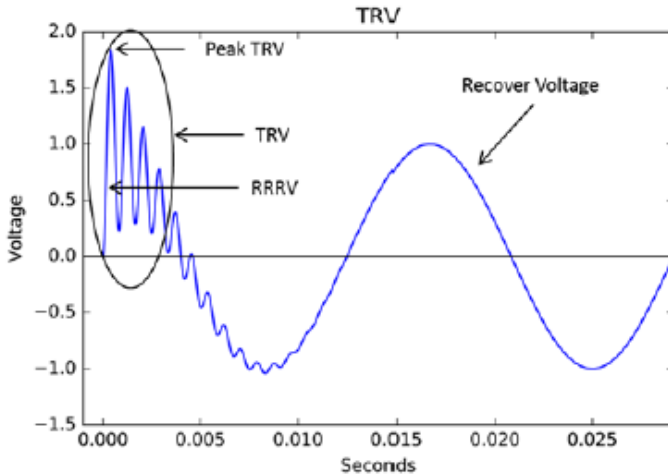
### 2.3 *Transient Recovery Voltage (TRV)*

*Transient Recovery voltage (TRV)* adalah tegangan yang muncul pada sela kontak *circuit breaker*. Tegangan ini dapat dibagi menjadi dua dalam interval waktu yang berurutan. Yang pertama adalah tegangan pemulihan transien (*TRV*) dan yang berikutnya adalah tegangan pemulihan dengan frekuensi daya. Karakteristik dari *transient recovery voltage* tergantung pada sifat rangkaian yang diputuskan oleh *circuit breaker*, apakah bersifat resistif, kapasitif atau induktif, (atau beberapa kombinasi). Ilustrasi mengenai ketiga jenis *transient recovery voltage* dapat dilihat pada Gambar 2.10 [6].



**Gambar 2.10** TRV dan *Recovery Voltage* pada Rangkaian Resistif, Induktif dan Kapasitif [6]

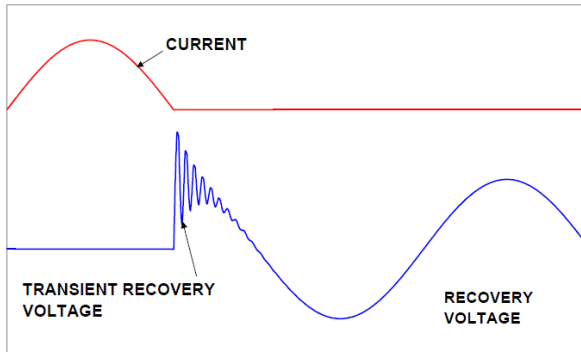
Dalam suatu rangkaian yang bersifat dominan induktif, munculnya *transient recovery voltage* memiliki tingkat kenaikan yang sangat cepat dan memberinya peluang yang besar terjadinya terpaan busur api balik. Oleh karena itu, pemutusan gangguan pada rangkaian yang bersifat induktif hanya dapat diputus oleh *circuit breaker* yang ideal [6]. Hal lain yang patut diperhatikan untuk menunjang keberhasilan *circuit breaker* dalam memutus suatu gangguan adalah waktu yang dibutuhkan tegangan dari nol setelah *circuit breaker* berhasil memutus hingga puncak dari *transient recovery voltage*. Parameter ini disebut juga dengan *rate of rise of recovery voltage (RRRV)*, yang diperoleh dari nilai puncak *transient recovery voltage* dibagi dengan waktu yang dibutuhkan mulai dari tegangan nol hingga puncak nilai *transient recovery voltage* [7]. Untuk melihat lebih jelas apa itu TRV, RRRV dan *recovery voltage* dalam bentuk sinyal gelombang, akan dijelaskan pada Gambar 2.11 [8].



**Gambar 2.11** Bentuk Sinyal Gelombang TRV, RRRV dan Recovery Voltage [8]

### 2.3.1 Proses Terjadinya *Transient Recovery Voltage*

Selama proses pemutusan pada *circuit breaker* berlangsung, busur api akan muncul dan secara cepat kehilangan konduktivitas karena arus sesaat mendekati nol. Di antara beberapa mikro-detik setelah arus mencapai nol, arus akan berhenti mengalir pada saluran yang dilaluinya dan menyebabkan munculnya respons tegangan pada sistem tenaga listrik berupa *transient recovery voltage (TRV)* pada sela kontak *circuit breaker*. [6]. Jika isolasi pada sela kontak *circuit breaker* pulih lebih cepat daripada *transient recovery voltage*, maka *circuit breaker* berhasil memutus gangguan. Jika tidak, maka busur api akan kembali muncul dan proses interupsi kembali dicoba sampai *circuit breaker* berhasil memutus gangguan (atau sampai *circuit breaker* gagal bekerja) [7]. Proses munculnya *transient recovery voltage* akan digambarkan pada Gambar 2.12.



**Gambar 2.12** Proses Munculnya *TRV* dalam Bentuk Sinyal Gelombang [6]

### 2.3.2 Faktor-faktor yang Mempengaruhi *TRV*

Besarnya *transient recovery voltage* dipengaruhi oleh berbagai parameter dalam suatu sistem tenaga listrik. Berikut merupakan faktor-faktor yang mempengaruhinya [6][9][10]:

- a. Tingkat arus hubung singkat pada sistem.
- b. Besarnya induktansi dan kapasitansi dalam sistem.
- c. Jumlah saluran transmisi pada bus dan karakteristik impedansinya.
- d. Besarnya kapasitansi *bushing* dari *circuit breaker*, trafo tegangan, dll.
- e. Faktor internal *circuit breaker*.
- f. Sistem pentanahan.

### 2.3.3 Efek *TRV* terhadap *Circuit Breaker*

*Transient recovery voltage* muncul pada sistem dalam durasi waktu yang sangat singkat dan memiliki nilai yang sangat tinggi. Perubahan cepat tersebut mempunyai efek yang dapat membahayakan perangkat-perangkat dalam sistem, antara lain [6][7][9][11]:

- a. Kegagalan Isolasi

*Transient recovery voltage* adalah tegangan yang muncul pada setiap *circuit breaker* pada sistem ketika memutus arus, dan akan sangat berbahaya ketika arus yang diputus adalah arus hubung singkat. *TRV* menyebabkan isolasi pada *circuit breaker* menjadi tertekan dan selanjutnya dapat menyebabkan kerusakan. Contoh klasik dari kerusakan isolasi adalah *flashover* eksternal

antara fase dan tanah, atau antar fase dan lainnya. *TRV* menyebabkan udara di sekitar menjadi tertekan ke tingkat yang lebih tinggi sehingga mengakibatkan kerusakan.

b. *Re-ignition* dan *Re-strike*

Ketika *circuit breaker* memutus suatu gangguan, akan menghasilkan busur api dalam sela kontakannya. Selama proses pemutusan berlangsung, busur api selalu mencoba untuk tetap bertahan pada sela kontak. Agar proses pemutusan berhasil, sela kontak harus tahan terhadap *transient recovery voltage* yang meningkat dengan cepat.

Dengan demikian, ada suatu persaingan dalam sela kontak *circuit breaker* untuk beralih dari kondisi konduksi ke kondisi isolasi, dengan *transient recovery voltage*. Jika laju kenaikan *TRV* lebih cepat daripada laju yang diperlukan sela kontak untuk mengisolasi keadaan kerusakan busur api, maka akan menyebabkan arus berlanjut mengalir di *circuit breaker*. Namun jika laju sela dalam mengisolasi jauh lebih cepat, maka proses pemutusan akan berhasil. Proses pembentukan arus ini dinamakan *re-ignition* dan mengacu pada pembentukan ulang busur api pada *circuit breaker*. *Re-ignition* pada umumnya terjadi segera setelah arus mencapai nol karena pada umumnya plasma busur api mengandung ion konduktor.

Jika *transient recovery voltage* bernilai sangat tinggi, akan menghasilkan kembali busur api dan menyebabkan keadaan isolasi menjadi tertekan. Jika bidang ini terbentuk di seluruh kontak, sangat besar kemungkinan terjadinya gangguan dielektrik yang menyebabkan sela kontak menjadi konduktor dan membawa arus. Proses pembentukan arus ini dinamakan *re-strike*. Pada umumnya, *re-strike* terjadi sekitar setengah *cycle* setelah pemutusan arus. Fenomena ini terjadi secara internal ke *circuit breaker*, mirip dengan kegagalan isolasi eksternal pada *circuit breaker*.

#### **2.3.4 Standar *TRV* pada *Circuit Breaker***

Dalam merencanakan suatu pembangunan sistem tenaga listrik seperti gardu induk dan yang lainnya, yang memerlukan peralatan proteksi *circuit breaker*, perlu mempertimbangkan adanya fenomena *transient recovery voltage* (*TRV*). Kemampuan *circuit breaker* dalam bertahan dari adanya *TRV* menjadi faktor besar keberhasilan *circuit breaker* dalam memutus arus gangguan. Oleh karena itu, terdapat standar yang mengatur mengenai nilai *TRV* pada *circuit breaker* berdasarkan

kelasnya. Parameter-parameter yang masuk ke dalam standar nilai *TRV* yaitu: nilai tegangan puncak ( $E_2$ ) dengan satuan kV, waktu menuju puncak ( $T_2$ ) dengan satuan  $\mu s$ , (dan *rate of rise of recovery voltage* (RRRV) dengan satuan kV/ $\mu s$  untuk *circuit breaker* berkapasitas di atas 100 kV). Standar yang digunakan mengacu pada IEEE Std C37.04-1999 dan ANSI C37.06-2000. Standar-standar tersebut ditunjukkan lebih jelas pada Tabel 2.1 untuk *circuit breaker* berkapasitas di bawah 100 kV dan Tabel 2.2 untuk *circuit breaker* berkapasitas 100 kV ke atas [10][11].

**Tabel 2.1** Standar *TRV* untuk *Circuit Breaker* Berkapasitas < 100 kV

Tegangan rms Maksimum <i>Circuit Breaker</i>	Tegangan Puncak / $E_2$ (kV)	Waktu untuk Mencapai Puncak Tegangan / $T_2$ ( $\mu s$ )	<i>Rate of Rise of Recovery Voltage / RRRV</i> (kV/ $\mu s$ )
15,5 kV	$E_2 = K_a \times K_f \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times V$	36	-
25,8 kV	dimana:	52	-
38 kV	$K_a$ = faktor amplitudo transien = 1,54;	63	-
48,3 kV	$K_f$ = faktor first pole-to-clear = 1,5;	80	-
72,5 kV	$V$ = tegangan maksimum	106	-



**Tabel 2.2** Standar *TRV* untuk *Circuit Breaker* Berkapasitas  $\geq 100$  kV

Tegangan rms Maksimum <i>Circuit Breaker</i>	Tegangan Puncak / $E_2$ (kV)	Waktu untuk Mencapai Puncak Tegangan / $T_2$ ( $\mu$ s)	<i>Rate of Rise of Recovery Voltage / RRRV</i> (kV/ $\mu$ s)
123 kV	$E_2 = K_a \times K_f \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times V$ <p>dimana:</p> $K_a$ = faktor amplitudo transien = 1,4; $K_f$ = faktor first pole-to-clear = 1,3; $V$ = tegangan maksimum	260	2,0
145 kV		310	2,0
170 kV		360	2,0
245 kV		520	2,0
362 kV		775	2,0
550 kV		1325	2,0
800 kV		1530	2,0

## 2.4 Transformator Daya

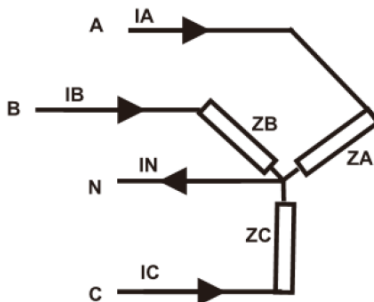
Transformator daya atau yang lebih mudah disebutkan dengan trafo daya, memiliki fungsi yang sangat penting dalam suatu sistem tenaga listrik. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, saluran transmisi tenaga listrik haruslah bertegangan tinggi agar *losses* daya tidak melebihi *losses* yang diinginkan. Oleh karena itu, dibutuhkanlah alat untuk menyalurkan daya dari generator bertegangan menengah menuju ke transmisi bertegangan tinggi; dan untuk menyalurkan daya yang berasal dari transmisi bertegangan tinggi menuju ke jaringan distribusi, yaitu trafo daya [3].

### 2.4.1 Hubungan Transformator Tiga Fasa

Sama seperti namanya, transformator tiga fasa bekerja pada tegangan yang memiliki tiga buah fasa. Suatu transformator tiga fasa secara prinsip kerja sama dengan transformator satu fasa. Namun perbedaannya yang fundamental adalah terletak pada sistem kelistrikkannya, yaitu sistem satu fasa atau tiga fasa. Sehingga, belitan yang terdapat pada suatu transformator daya tiga fasa dapat dihubungkan dengan hubungan belitan bintang ataupun segitiga [12].

#### 2.4.1.1 Hubungan Bintang / Wye (Y)

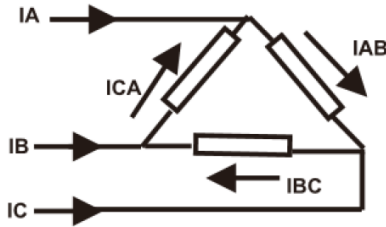
Hubungan bintang (Y) pada transformator daya tiga fasa mempunyai kumparan yang disatukan pada ujung-ujungnya. Titik penyatuan dari ujung-ujung belitan tersebut dijadikan titik netral. Arus yang melalui transformator daya tiga fasa dengan hubungan bintang (Y) mempunyai perbedaan sudut sebesar  $120^\circ$ . Rangkaian pengganti hubungan bintang (Y) pada transformator daya tiga fasa digambarkan pada Gambar 2.13.



**Gambar 2.13** Rangkaian Pengganti Hubungan Belitan Bintang pada Transformator Tiga Fasa [13]

#### 2.4.1.2 Hubungan Segitiga / Delta ( $\Delta$ )

Hubungan segitiga ( $\Delta$ ) pada transformator daya tiga fasa mempunyai ujung netral yang dikaitkan dengan ujung fasa kumparan lain sehingga membentuk suatu segitiga. Tegangan transformator tiga fasa dengan kumparan yang dihubungkan segitiga mempunyai perbedaan sudut sebesar  $120^\circ$ . Rangkaian pengganti hubungan segitiga ( $\Delta$ ) pada transformator daya tiga fasa digambarkan pada Gambar 2.14.



**Gambar 2.14** Rangkaian Pengganti Hubungan Belitan Segitiga pada Transformator Tiga Fasa [13]

#### 2.4.2 Jenis-jenis Konfigurasi Hubungan Belitan Transformator Daya Tiga Fasa

Konfigurasi hubungan belitan transformator daya tiga fasa pada prinsipnya adalah metode atau cara merangkai belitan di sisi primer dan sekunder. Pada umumnya dikenal beberapa jenis konfigurasi hubungan belitan pada transformator daya tiga fasa, diantaranya yaitu [12]:

a. Hubungan Bintang-Bintang (Y-Y)

Hubungan bintang-bintang (Y-Y) dapat dikatakan lebih ekonomis untuk arus nominal yang kecil pada transformator tegangan tinggi. Jumlah dari belitan per fasa dan jumlah isolasi bernilai minimum karena tegangan fasa bernilai  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  tegangan jala-jala (*line*), serta nihil perubahan fasa antara tegangan primer dengan tegangan sekunder. Jika beban pada sisi sekunder dari transformator tidak seimbang, maka tegangan fasa dari sisi beban akan berubah kecuali titik bintang diketanahkan.

b. Hubungan Segitiga-Segitiga ( $\Delta$ - $\Delta$ )

Hubungan segitiga-segitiga ( $\Delta$ - $\Delta$ ) pada umumnya diaplikasikan pada sistem yang menyalurkan arus besar pada tegangan rendah dan yang paling penting saat keberlangsungan dari pelayanan sistem harus tetap terjaga meskipun salah satu fasa mengalami gangguan.

c. Hubungan Bintang-Segitiga (Y-  $\Delta$ )

Hubungan Bintang-Segitiga (Y-  $\Delta$ ) pada umumnya diaplikasikan pada jaringan transmisi dimana kemudian tegangan akan diturunkan (*step-down*). Pada hubungan ini, perbandingan

tegangan jala-jala (*line*)  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  kali perbandingan belitan transformator serta tegangan sekunder tertinggal  $30^\circ$  dari tegangan primer.

d. Hubungan Segitiga-Bintang ( $\Delta$ -Y)

Hubungan Segitiga-Bintang ( $\Delta$ -Y) pada umumnya diaplikasikan untuk menaikkan tegangan (*step-up*) pada awal sistem transmisi tegangan tinggi. Dalam hubungan ini, perbandingan tegangan  $\sqrt{3}$  kali perbandingan belitan transformator dan tegangan sekunder mendahului tegangan primer sebesar  $30^\circ$ .

## 2.5 Sistem Pentanahan Titik Netral

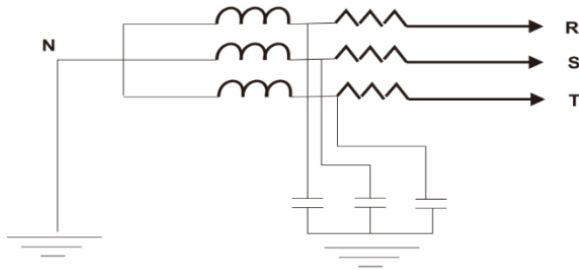
Tujuan dari diketanahkannya suatu sistem adalah untuk meminimalkan dampak buruk gangguan hubung singkat fasa ke tanah yang berwujud *arcing grounds* serta membatasi tegangan pada fasa yang tidak mengalami gangguan. Terdapat berbagai jenis sistem pentanahan titik netral dimana masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan. Pertimbangan-pertimbangan yang digunakan dalam pemilihan metode pengetanahan antara lain: pembatasan besarnya arus gangguan tanah, sensitivitas relai gangguan tanah, pembatasan tegangan lebih transien, serta tingkat pengamanan tegangan surja dengan *arrester* [14]. Permasalahan yang muncul pada sistem yang tidak dibumikan adalah arus gangguan relatif besar. Sehingga, busur listrik yang timbul tidak dapat padam dengan sendirinya, yang akan menimbulkan busur tanah. Gejala ini sangat berbahaya karena dapat menimbulkan tegangan lebih transien yang tinggi yang dapat merusak peralatan. Pada sistem yang dibumikan, gejala tersebut hampir tidak ada. Berikut merupakan beberapa jenis sistem pentanahan titik netral [15]:

- a. Pentanahan netral langsung
- b. Pentanahan netral dengan tahanan
- c. Pentanahan netral dengan kumparan/*Petersen Coil*
- d. Pentanahan netral tidak diketanahkan

### 2.5.1 Pentanahan Netral Langsung

Sistem pentanahan langsung (*solid grounding*) merupakan sistem pentanahan dimana titik netral sistem dihubungkan langsung dengan tanah, tanpa memasukkan harga suatu impedansi. Jika terjadi gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah pada sistem ini akan selalu

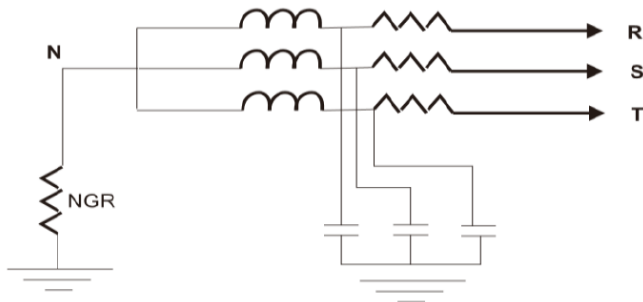
menyebabkan terganggunya saluran, yaitu gangguan harus diisolasi dengan cara membuka *circuit breaker*. Salah satu tujuan pentanahan netral langsung adalah untuk membatasi tegangan dari fasa-fasa yang tidak terganggu apabila terjadi gangguan hubung singkat fasa ke tanah [15]. Rangkaian pengganti pentanahan netral langsung (*solid grounding*) dapat dilihat pada Gambar 2.15.



**Gambar 2.15** Pentanahan Netral Langsung [16]

### 2.5.2 Pentanahan Netral dengan Tahanan

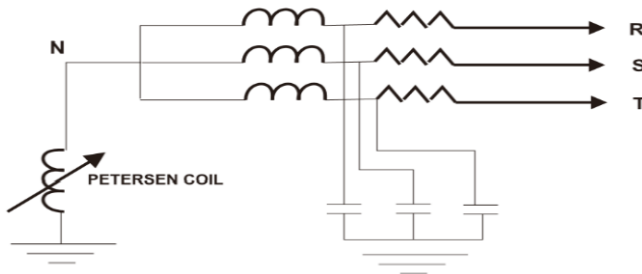
Sistem pentanahan netral dengan tahanan (*resistance grounding*) merupakan suatu sistem yang titik netralnya dihubungkan dengan tanah melalui suatu tahanan (*resistor*). Dengan memilih nilai tahanan yang tepat, arus gangguan ke tanah dapat dibatasi sehingga nilainya hampir sama bila gangguan terjadi di segala tempat di dalam sistem bila terdapat titik pentanahan lainnya [15]. Rangkaian pengganti sistem pentanahan netral dengan tahanan dapat dilihat pada Gambar 2.16.



**Gambar 2.16** Pentanahan Netral dengan Tahanan [16]

### 2.5.3 Pentanahan Netral dengan Kumputan / Petersen Coil

Sistem pentanahan netral dengan kumputan merupakan suatu sistem yang titik netralnya dihubungkan dengan tanah melalui suatu kumputan induktor dengan nilai tertentu. Sedikit berbeda, kumputan induktor pada pentanahan netral dengan *Petersen Coil* nilai reaktansinya dapat diatur melalui tap. Tujuan dari sistem pentanahan ini adalah untuk melindungi sistem dari gangguan hubung singkat fasa ke tanah yang bersifat sementara (*temporary fault*), yaitu dengan membuat arus gangguan sekecil-kecilnya dan pemadaman busur api dapat terjadi dengan sendirinya [15]. Rangkaian pengganti sistem pentanahan netral dengan kumputan Petersen dapat dilihat pada Gambar 2.17.



**Gambar 2.17** Pentanahan Netral dengan Kumputan Petersen [16]

### 2.5.4 Pentanahan Netral Tidak Diketanahkan

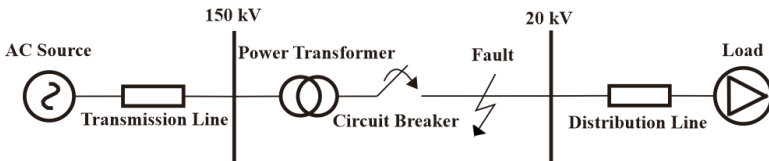
Suatu sistem yang tidak diketanahkan (*floating grounding*) atau yang kita kenal dengan sistem segitiga/delta merupakan sistem yang tidak ada hubungan galvanis antara sistem tersebut dengan tanah [15].

# BAB 3

## PEMODELAN RANGKAIAN TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE DAN VARIASI SISTEM PENTANAHAN PADA TRANSFORMATOR DAYA

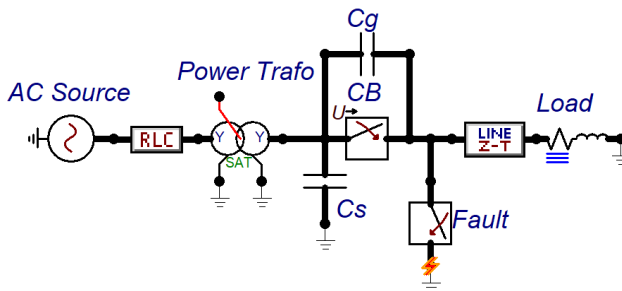
### 3.1 Pemodelan Rangkaian *Transient Recovery Voltage*

Pada studi ini, fenomena *transient recovery voltage* terjadi pada *circuit breaker* tegangan menengah sehingga dilakukan simulasi dengan pemodelan rangkaian *transient recovery voltage* pada *circuit breaker* tegangan menengah seperti pada Gambar 3.1.



**Gambar 3.1** Single Line Diagram Transient Recovery Voltage pada Circuit Breaker 20 kV

Dari *single line diagram* tersebut di atas, dibuatkan pemodelan rangkaian *single line diagram transient recovery voltage* pada perangkat lunak ATPDraw. Pemodelan rangkaian *single line diagram transient recovery voltage* pada ATPDraw dapat dilihat pada Gambar 3.2.



**Gambar 3.2** Pemodelan Single Line Diagram Transient Recovery Voltage pada Circuit Breaker 20 kV pada ATPDraw

Pemodelan rangkaian *single line diagram transient recovery voltage* tersebut meliputi rangkaian *trigger* berupa *switching* yang dihubungkan dengan tanah sebagai pemodelan dari *short circuit* fasa ke tanah. Pemodelan pada rangkaian ini terdiri dari berbagai komponen, seperti sumber tegangan 150 kV, resistor, induktor non-linier, kapasitor, *circuit breaker*, serta transformator daya. Pemodelan rangkaian *transient recovery voltage* tersebut dilakukan pada perangkat lunak ATPDraw (*Alternative Transient Program*). Tujuan dari dilakukannya pemodelan ini adalah untuk mengetahui pengaruh perubahan jenis pentanahan transformator daya terhadap besarnya *transient recovery voltage* yang muncul pada *circuit breaker*. Parameter yang divariasikan pada rangkaian ini adalah sistem pentanahan pada transformator daya. Parameter-parameter pada rangkaian beserta nilainya dapat dilihat pada Tabel 3.1.

**Tabel 3.1** Parameter Rangkaian Pemodelan *Transient Recovery Voltage*

Paramater	Nilai	Satuan
Sumber Tegangan	150	kV
Frekuensi	50	Hz
<i>Grading Capacitance</i> (Cg)	0,05	$\mu$ F
<i>Shunt Capacitance</i> (Cs)	0,04	$\mu$ F
Waktu <i>Switching Circuit Breaker</i>	0,1	s

Selain itu, pada rangkaian pemodelan *transient recovery voltage* ini juga terdapat pemodelan transformator daya. Transformator daya yang digunakan pada rangkaian ini merupakan transformator daya tiga fasa penurun tegangan (*step-down transformer*) dengan *rating* tegangan 150/20 kV. Parameter-parameter pada transformator daya yang digunakan beserta nilainya ditunjukkan pada Tabel 3.2 di bawah.

**Tabel 3.2** Parameter Pemodelan Transformator Daya 150/20 kV

Paramater	Nilai	Satuan
Resistansi Primer	220	$\Omega$
Induktansi Primer	1,745	mH
R Magnetisasi	6500000	$\Omega$
Resistansi Sekunder	5	$\Omega$
Induktansi Sekunder	0,039	mH



### 3.2 Nilai Tegangan Transformator Daya saat Kondisi Normal

Dalam kondisi normal, variasi dari sistem pentanahan pada transformator daya dapat diabaikan karena belum terjadi proses *switching*. Sehingga, hasil simulasi berupa tegangan sumber dalam kondisi normal dapat dijadikan sebagai pembanding dengan simulasi rangkaian setelah terjadi *switching* akibat gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah. Sumber tegangan yang digunakan pada rangkaian simulasi adalah tegangan bolak-balik (AC) rms *line-line* ( $V_{L-L\text{ rms}}$ ) 150 kV, dengan frekuensi 50 Hz. Serta tegangan pada sisi sekunder transformator atau sisi beban merupakan tegangan bolak-balik (AC) rms *line-line* ( $V_{L-L\text{ rms}}$ ) 20 kV, dengan frekuensi 50 Hz. Nilai tegangan puncak dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$V_{L-N\text{ rms}} = \frac{V_{L-L\text{ rms}}}{\sqrt{3}} \quad (3.1)$$

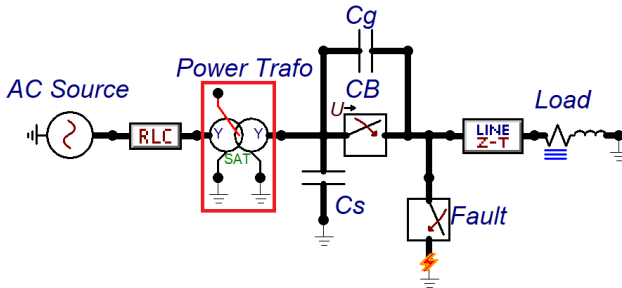
$$V_{L-N\text{ peak}} = V_{L-N\text{ rms}} \times \sqrt{2} \quad (3.2)$$

### 3.3 Konfigurasi Sistem Pentanahan

Kehadiran fenomena *transient recovery voltage* patut menjadi pertimbangan dalam membangun suatu sistem karena jika besarnya *transient recovery voltage* melebihi standar kemampuan *circuit breaker* dalam bertahan, maka dapat mengakibatkan *circuit breaker* gagal bekerja dalam melokalisasi gangguan, sehingga kestabilan sistem terganggu. Salah satu hal yang dapat mempengaruhi besarnya nilai *transient recovery voltage* dalam suatu sistem adalah konfigurasi pentanahan yang digunakan. Suatu konfigurasi sistem pentanahan yang tepat dapat membatasi tegangan lebih transien dalam suatu sistem. Pada studi ini, akan diteliti pengaruh dari beberapa konfigurasi sistem pentanahan yang dipasangkan pada titik netral sisi primer dan sisi sekunder transformator daya penurun tegangan 150/20 kV terhadap besarnya *transient recovery voltage* yang dihasilkan pada *circuit breaker* sisi tegangan menengah. Konfigurasi sistem pentanahan yang akan digunakan pada studi ini di antaranya, yaitu *Solid – Solid*, *Solid – Floating*, *Floating – Solid*, *Floating – Floating*, *Solid – Resistance*, serta *Solid – Reactor*.

### 3.3.1 Rangkaian Transformator Daya dengan Konfigurasi Pentanahan *Solid – Solid* pada Simulasi *Transient Recovery Voltage*

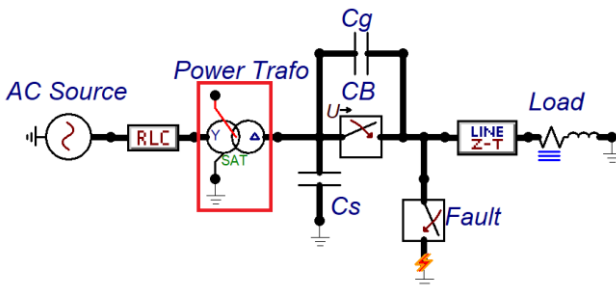
Pada simulasi ini, transformator daya menggunakan konfigurasi pentanahan *Solid* pada titik netral sisi primernya dan sisi sekundernya. Rangkaian simulasi transformator daya dengan konfigurasi pentanahan *Solid – Solid* dapat dilihat pada Gambar 3.3.



**Gambar 3.3** Rangkaian Transformator Daya dengan Konfigurasi Pentanahan *Solid - Solid*

### 3.3.2 Rangkaian Transformator Daya dengan Sistem Pentanahan *Solid – Floating* pada Simulasi *Transient Recovery Voltage*

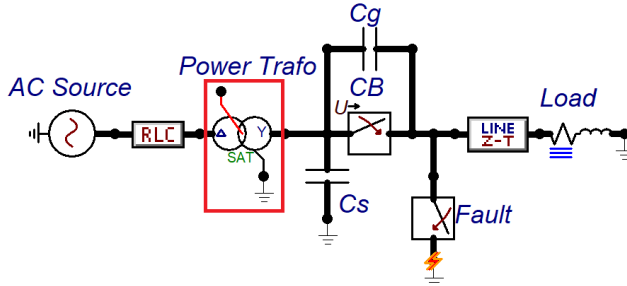
Pada simulasi ini, transformator daya menggunakan konfigurasi pentanahan *Solid* pada sisi primernya dan pentanahan *Floating* pada sisi sekundernya. Rangkaian simulasi transformator daya dengan konfigurasi pentanahan *Solid – Floating* dapat dilihat pada Gambar 3.4.



**Gambar 3.4** Rangkaian Transformator Daya dengan Konfigurasi Pentanahan *Solid - Floating*

### 3.3.3 Rangkaian Transformator Daya dengan Sistem Pentanahan *Floating – Solid* pada Simulasi *Transient Recovery Voltage*

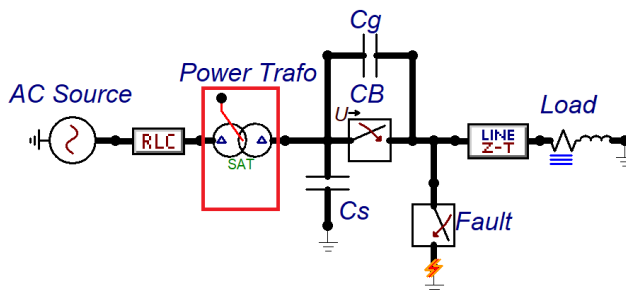
Pada simulasi ini, transformator daya menggunakan konfigurasi pentanahan *Floating* pada sisi primernya dan pentanahan *Solid* pada sisi sekundernya. Rangkaian simulasi transformator daya dengan konfigurasi pentanahan *Floating – Solid* dapat dilihat pada Gambar 3.5.



**Gambar 3.5** Rangkaian Transformator Daya dengan Konfigurasi Pentanahan *Floating - Solid*

### 3.3.4 Rangkaian Transformator Daya dengan Sistem Pentanahan *Floating – Floating* pada Simulasi *Transient Recovery Voltage*

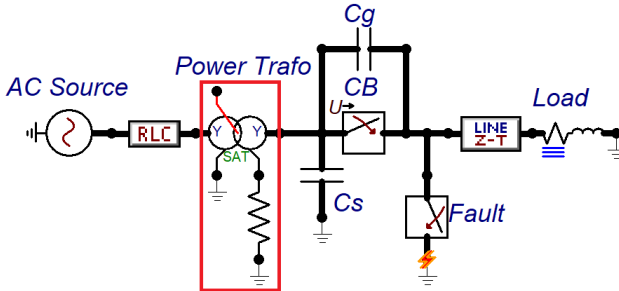
Pada simulasi ini, transformator daya menggunakan konfigurasi pentanahan *Floating* pada titik netral sisi primernya dan sisi sekundernya. Rangkaian simulasi transformator daya dengan konfigurasi pentanahan *Floating – Floating* dapat dilihat pada Gambar 3.6.



**Gambar 3.6** Rangkaian Transformator Daya dengan Konfigurasi Pentanahan *Floating - Floating*

### 3.3.5 Rangkaian Transformator Daya dengan Sistem Pentanahan *Solid – Resistance* pada Simulasi *Transient Recovery Voltage*

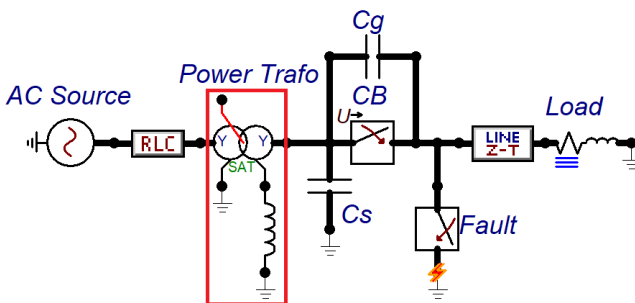
Pada simulasi ini, transformator daya menggunakan konfigurasi pentanahan *Solid* pada sisi primernya dan pentanahan *Resistance* pada sisi sekundernya. Rangkaian simulasi transformator daya dengan konfigurasi pentanahan *Solid – Resistance* dapat dilihat pada Gambar 3.7.



**Gambar 3.7** Rangkaian Transformator Daya dengan Konfigurasi Pentanahan *Solid - Resistance*

### 3.3.6 Rangkaian Transformator Daya dengan Sistem Pentanahan *Solid – Reactor* pada Simulasi *Transient Recovery Voltage*

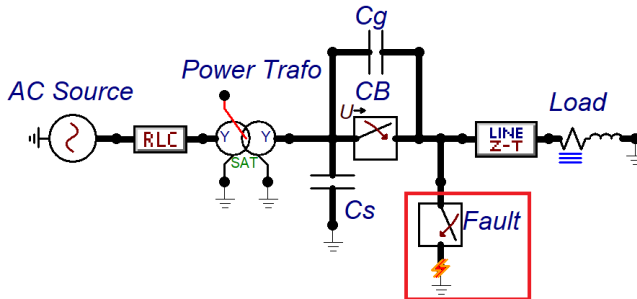
Pada simulasi ini, transformator daya menggunakan konfigurasi pentanahan *Solid* pada sisi primernya dan pentanahan *Reactor* pada sisi sekundernya. Rangkaian simulasi transformator daya dengan konfigurasi pentanahan *Solid – Reactor* dapat dilihat pada Gambar 3.8.



**Gambar 3.8** Rangkaian Transformator Daya dengan Konfigurasi Pentanahan *Solid - Reactor*

### 3.4 Konfigurasi Gangguan Hubung Singkat

Hubung singkat yang digunakan pada studi ini untuk melakukan simulasi *transient recovery voltage* adalah jenis hubung singkat tiga fasa ke tanah yang dalam simulasi ini digambarkan dengan sebuah *switch* tiga fasa sebagai pengatur waktu kapan terjadinya hubung singkat. Rangkaian hubung singkat tiga fasa pada simulasi ini dapat dilihat pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Rangkaian Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah

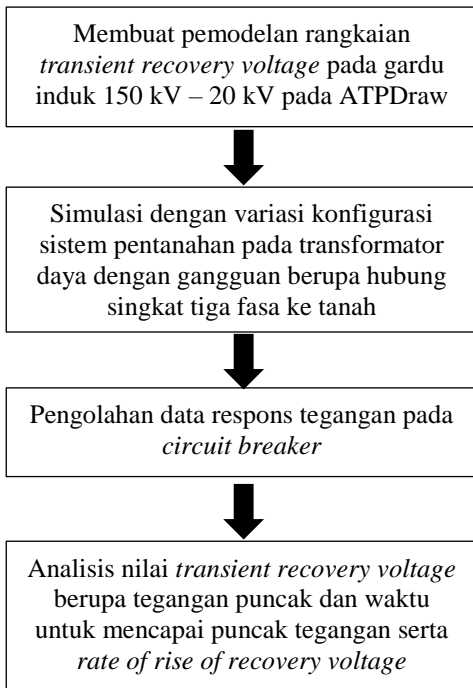
### 3.5 Pengambilan dan Pengolahan Data

Pada studi ini, pemodelan rangkaian *transient recovery voltage* disimulasikan pada perangkat lunak ATPDraw. Rangkaian simulasi *transient recovery voltage* dijalankan dalam waktu 0,12 detik dengan waktu *variable step* 0,1 mikrodetik. Gangguan yang diberikan yaitu berupa operasi hubung singkat (*short circuit*) tiga fasa ke tanah berupa proses *switching* tiga fasa pada detik ke-0,05.

Pemodelan rangkaian simulasi *transient recovery voltage* yang diteliti yaitu menggunakan transformator daya dengan sistem pentanahan langsung (*Solid*); sistem pentanahan dengan resistansi sebesar 12  $\Omega$ , 40  $\Omega$ , dan 500  $\Omega$  (NGR); sistem pentanahan dengan reaktansi 10 mH dan 95 mH (*Petersen Coil*); serta sistem dengan titik netral tidak ditanahkan (*Floating*) pada sisi primer atau sekunder. Dengan membuat pemodelan rangkaian simulasi *transient recovery voltage* tersebut, maka didapatkan data setelah menjalankan simulasi untuk kondisi normal serta untuk kondisi *switching* terbuka tiga fasa pada fasa R, S dan T.

Data yang diambil adalah berupa nilai dan respons gelombang tegangan pada *circuit breaker* untuk setiap konfigurasi sistem pentanahan. Setelah data hasil respons tegangan dari simulasi ATPDraw didapatkan, dapat dianalisis nilai *transient recovery voltage* berupa

tegangan puncak dan waktu untuk mencapai puncak tegangan serta nilai *rate of rise of recovery voltage* berdasarkan standar IEEE C37.04-1999 dan ANSI C37.06-2000. Untuk alur dari pengerjaan studi ini ditunjukkan pada Gambar 3.10.



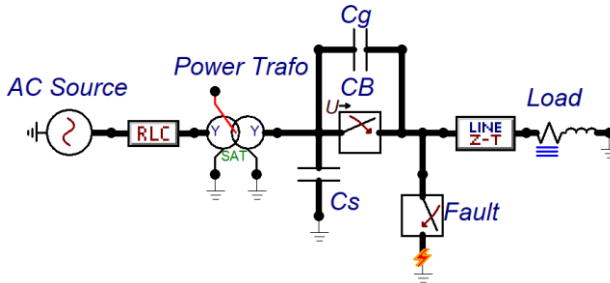
**Gambar 3.10** *Flowchart* Pengambilan dan Pengolahan Data

## BAB 4

### ANALISIS HASIL SIMULASI PENGARUH JENIS PENTANAHAN TRANSFORMATOR DAYA TERHADAP *TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE*

#### 4.1 Simulasi Rangkaian *Transient Recovery Voltage* dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung *Solid – Solid*

Pada simulasi rangkaian *transient recovery voltage* ini digunakan transformator daya dengan konfigurasi pentanahan *Solid* pada sisi primer dan sisi sekundernya. Simulasi rangkaian *transient recovery voltage* ini dapat dilihat pada Gambar 4.1.



**Gambar 4.1** Rangkaian Simulasi *Transient Recovery Voltage* dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung *Solid – Solid*

##### 4.1.1 Respons Tegangan Saat Kondisi Normal

Nilai tegangan *line-neutral* ( $V_{L-N \text{ rms}}$ ) pada tiap fasa di sisi primer trafo daya adalah:

$$V_{L-N \text{ rms}} = \frac{150.000}{\sqrt{3}} = 86.602,54 \text{ V} \quad (3.1)$$

Tegangan puncak *line-neutral* ( $V_{L-N \text{ peak}}$ ) pada tiap fasa di sisi primer trafo daya adalah:

$$V_{L-N \text{ peak}} = 86.602,54 \times \sqrt{2} = 122.474,49 \text{ V} \quad (3.2)$$

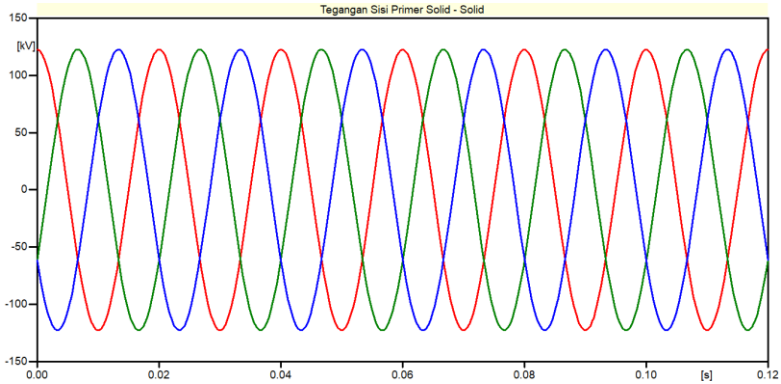
Nilai tegangan *line-neutral* ( $V_{L-N \text{ rms}}$ ) pada tiap fasa di sisi sekunder trafo daya adalah:

$$V_{L-N \text{ rms}} = \frac{20.000}{\sqrt{3}} = 11.547,005 \text{ V} \quad (3.3)$$

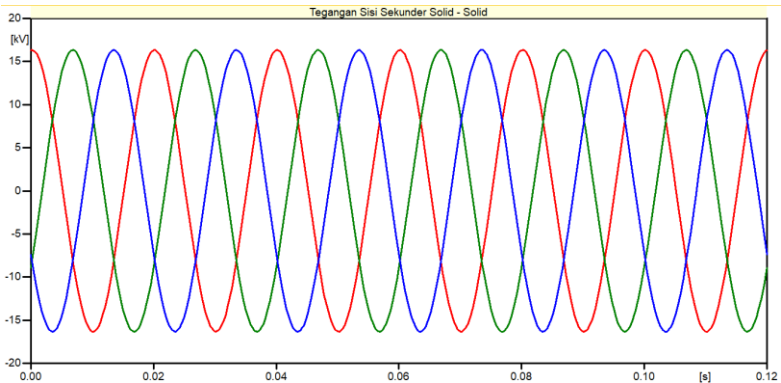
Tegangan puncak *line-neutral* ( $V_{L-N \text{ peak}}$ ) pada tiap fasa di sisi sekunder trafo daya adalah:

$$V_{L-N \text{ peak}} = 11.547,005 \times \sqrt{2} = 16.329,93 \text{ V} \quad (3.4)$$

Respons tegangan pada saat kondisi normal pada konfigurasi pentanahan *Solid – Solid* diperlihatkan pada Gambar 4.2. Tegangan puncak hasil simulasi sudah sesuai dengan hasil perhitungan sebelumnya.



(a)



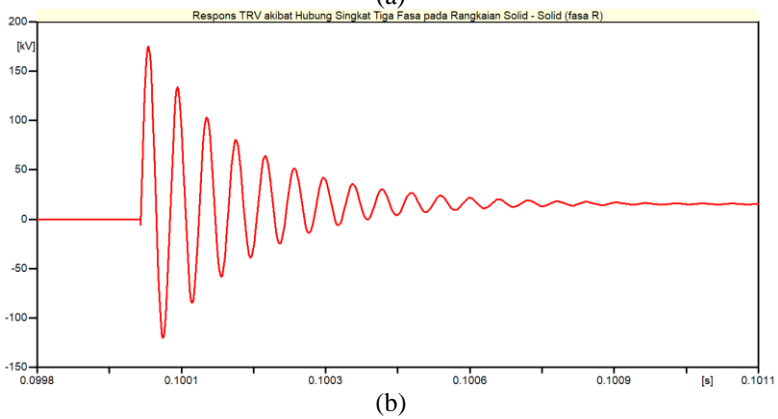
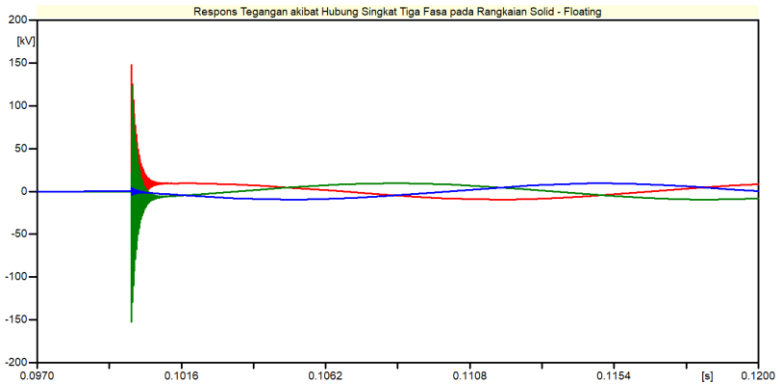
(b)

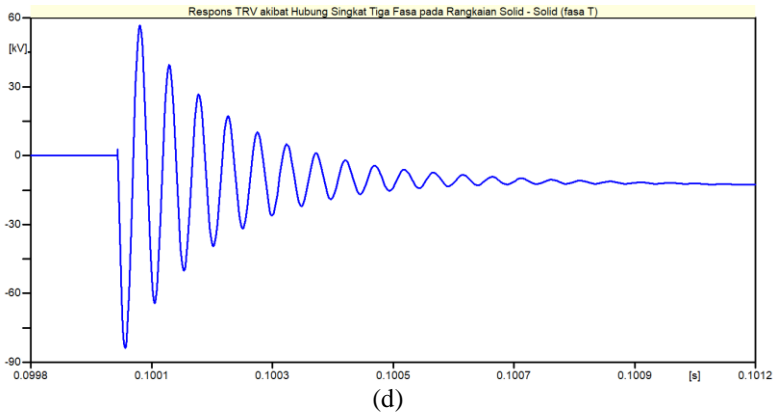
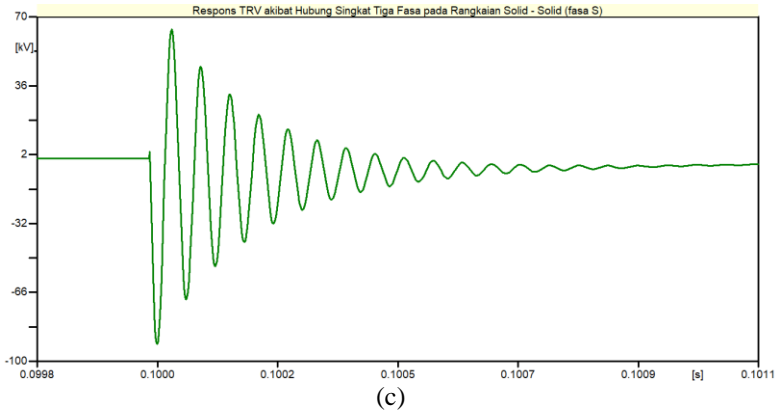
**Gambar 4.2** Respons Tegangan Trafo Daya dengan Konfigurasi Pentanahan *Solid – Solid* pada Saat Kondisi Normal (a) Tegangan Sisi Primer; (b) Tegangan Sisi Sekunder



#### 4.1.2 Respons Tegangan Saat Operasi Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah

Pada kondisi ini diberikan gangguan berupa operasi hubung singkat tiga fasa ke tanah pada rangkaian simulasi *transient recovery voltage*. Operasi hubung singkat dilakukan pada fasa R, S, dan T pada detik ke-0,05. Variabel yang diamati pada simulasi ini adalah tegangan pada *circuit breaker* sisi sekunder transformator daya yang meliputi puncak tegangan, waktu tegangan untuk mencapai puncak, serta *rate of rise of recovery voltage*. Respons tegangan ketika dilakukan operasi hubung singkat tiga fasa ke tanah pada rangkaian simulasi *transient recovery voltage* menggunakan transformator daya dengan konfigurasi pentanahan *Solid – Solid* dapat dilihat pada Gambar 4.3.





**Gambar 4.3** Respons Tegangan pada *Circuit Breaker* akibat Hubung Singkat Tiga Fasa pada Rangkaian dengan Konfigurasi Pentanahan *Solid – Solid* pada (a) Ketiga Fasa; (b) Fasa R; (c) Fasa S; (d) Fasa T

#### 4.1.3 Hasil Pengukuran *Transient Recovery Voltage* dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung *Solid – Solid*

Hasil pengukuran *transient recovery voltage* akibat hubung singkat tiga fasa pada sistem tegangan menengah dengan transformator daya terhubung *Solid – Solid* pada tiap fasanya diperlihatkan pada Tabel 4.1.

**Tabel 4.1** Hasil Pengukuran *TRV* pada Sistem dengan Konfigurasi Pentanahan *Solid - Solid*

Tegangan Puncak (kV)			Waktu untuk Mencapai Puncak Tegangan ( $\mu$ s)			Rate of Rise of Recovery Voltage (kV/ $\mu$ s)		
R	S	T	R	S	T	R	S	T
175,35	91,51	83,84	14,7	14,7	14,7	17,02	8,88	8,06

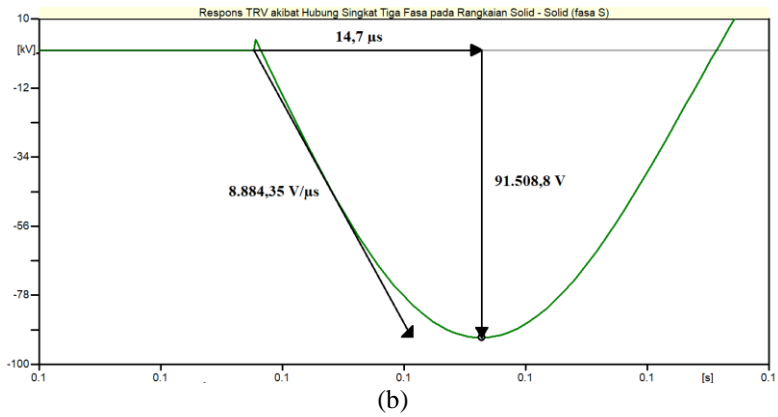
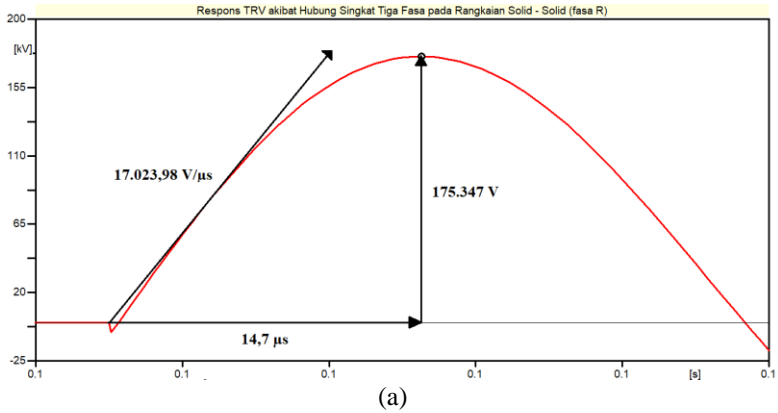
Dapat terlihat bahwa gangguan hubung singkat tiga fasa pada sistem tegangan menengah dengan konfigurasi pentanahan *Solid - Solid* menyebabkan munculnya *transient recovery voltage* pada *circuit breaker* di setiap fasanya.

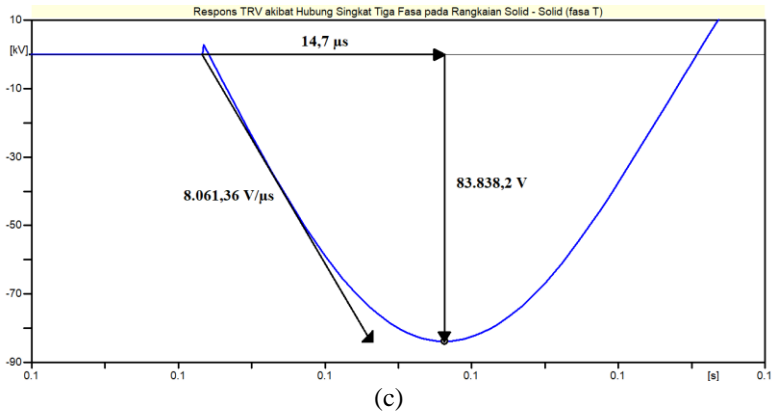
Batas nilai puncak *transient recovery voltage* pada sistem tegangan menengah dengan transformator daya terhubung *Solid - Solid* pada tiap fasa berdasarkan IEEE Std C37.04-1999 adalah:

$$V_{peak} = 1,54 \times 1,5 \times 16.329,93 = 37.722,14 \text{ V} = 37,72 \text{ kV} \quad (3.5)$$

Dari perhitungan di atas, dapat terlihat bahwa sistem tegangan menengah dengan transformator daya terhubung *Solid - Solid* menghasilkan nilai puncak *transient recovery voltage* yang melebihi standar nilai puncak *transient recovery voltage* yang telah ditetapkan, yaitu 37,72 kV di ketiga fasanya. Namun, waktu menuju puncak *transient recovery voltage* yang dihasilkan oleh sistem ini masih memenuhi standar, yaitu di bawah 52  $\mu$ s. Sehingga, konfigurasi pentanahan *Solid - Solid* pada transformator daya masih kurang aman untuk digunakan pada sistem ini.

Untuk analisis pengukuran respons tegangan ketika dilakukan operasi hubung singkat tiga fasa ke tanah pada rangkaian simulasi *transient recovery voltage* menggunakan transformator daya dengan konfigurasi pentanahan *Solid - Solid* dapat dilihat pada Gambar 4.4.

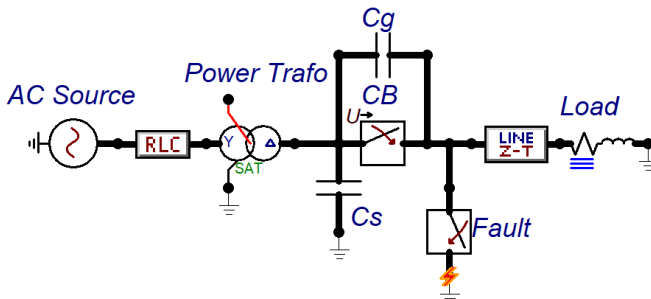




**Gambar 4.4** Analisis Pengukuran Respons Tegangan pada *Circuit Breaker* akibat Hubung Singkat Tiga Fasa pada Rangkaian dengan Konfigurasi Pentanahan *Solid – Solid* pada (a) Fasa R; (b) Fasa S; (c) Fasa T

#### 4.2 Simulasi Rangkaian *Transient Recovery Voltage* dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung *Solid – Floating*

Pada simulasi rangkaian *transient recovery voltage* ini digunakan transformator daya dengan konfigurasi pentanahan *Solid* pada sisi primer dan *Floating* pada sisi sekunder. Simulasi rangkaian *transient recovery voltage* ini dapat dilihat pada Gambar 4.5.



**Gambar 4.5** Rangkaian Simulasi *Transient Recovery Voltage* dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung *Solid – Floating*

#### 4.2.1 Respons Tegangan Saat Kondisi Normal

Nilai tegangan *line-netral* ( $V_{L-N \text{ rms}}$ ) pada tiap fasa di sisi primer trafo daya adalah:

$$V_{L-N \text{ rms}} = \frac{150.000}{\sqrt{3}} = 86.602,54 \text{ V} \quad (3.6)$$

Tegangan puncak *line-netral* ( $V_{L-N \text{ peak}}$ ) pada tiap fasa di sisi primer trafo daya adalah:

$$V_{L-N \text{ peak}} = 86.602,54 \times \sqrt{2} = 122.474,49 \text{ V} \quad (3.7)$$

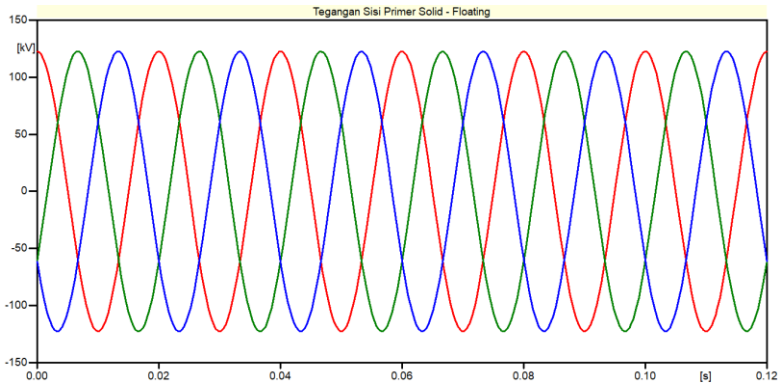
Nilai tegangan *line-netral* ( $V_{L-N \text{ rms}}$ ) pada tiap fasa di sisi sekunder trafo daya adalah:

$$V_{L-N \text{ rms}} = \frac{20.000}{\sqrt{3}} = 11.547,005 \text{ V} \quad (3.8)$$

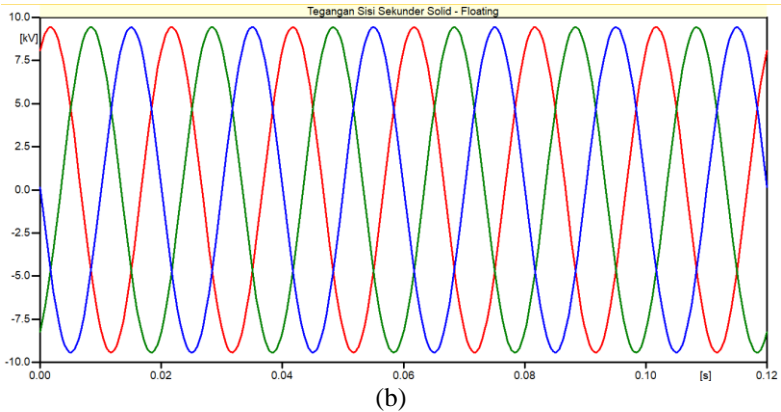
Tegangan puncak *line-netral* ( $V_{L-N \text{ peak}}$ ) pada tiap fasa di sisi sekunder trafo daya adalah:

$$V_{L-N \text{ peak}} = \frac{11.547 \times \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 9.428,09 \text{ V} \quad (3.9)$$

Respons tegangan pada saat kondisi normal pada konfigurasi pentanahan *Solid – Floating* diperlihatkan pada Gambar 4.6. Tegangan puncak hasil simulasi sudah sesuai dengan hasil perhitungan sebelumnya.



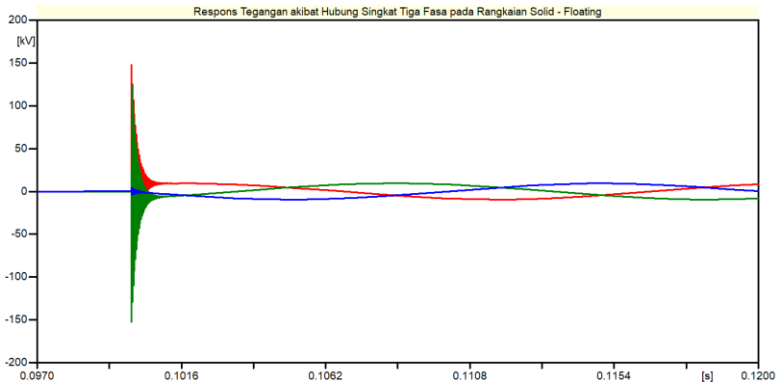
(a)



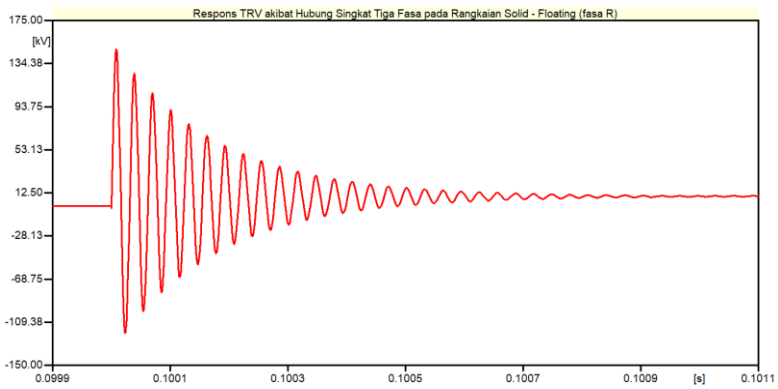
**Gambar 4.6** Respons Tegangan Trafo Daya dengan Konfigurasi Pentanahan *Solid – Floating* pada Saat Kondisi Normal (a) Tegangan Sisi Primer; (b) Tegangan Sisi Sekunder

#### 4.2.2 Respons Tegangan Saat Operasi Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah

Pada kondisi ini diberikan gangguan berupa operasi hubung singkat tiga fasa ke tanah pada rangkaian simulasi *transient recovery voltage*. Operasi hubung singkat dilakukan pada fasa R, S, dan T pada detik ke-0,05. Variabel yang diamati pada simulasi ini adalah tegangan pada *circuit breaker* sisi sekunder transformator daya yang meliputi puncak tegangan, waktu tegangan untuk mencapai puncak, serta *rate of rise of recovery voltage*. Respons tegangan ketika dilakukan operasi hubung singkat tiga fasa ke tanah pada rangkaian simulasi *transient recovery voltage* menggunakan transformator daya dengan konfigurasi pentanahan *Solid – Floating* dapat dilihat pada Gambar 4.7.

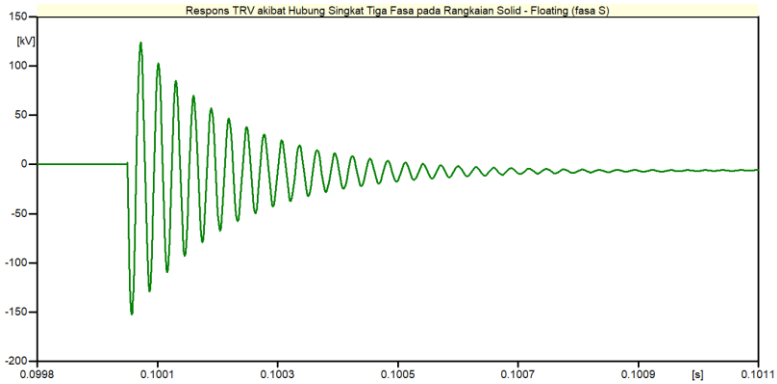


(a)

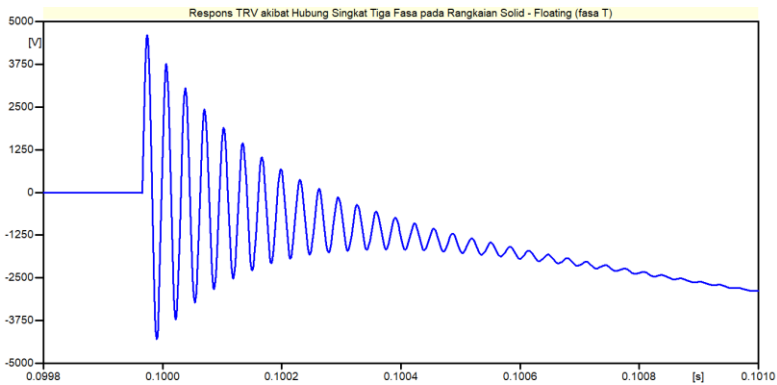


(b)





(c)



(d)

**Gambar 4.7** Respons Tegangan pada *Circuit Breaker* akibat Hubung Singkat Tiga Fasa pada Rangkaian dengan Konfigurasi Pentanahan *Solid – Floating* pada (a) Ketiga Fasa; (b) Fasa R; (c) Fasa S; (d) Fasa T

#### 4.2.3 Hasil Pengukuran *Transient Recovery Voltage* dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung *Solid – Floating*

Hasil pengukuran *transient recovery voltage* akibat hubung singkat tiga fasa pada sistem tegangan menengah dengan transformator daya terhubung *Solid – Floating* pada tiap fasanya diperlihatkan pada Tabel 4.2.

**Tabel 4.2** Hasil Pengukuran *TRV* pada Sistem dengan Konfigurasi Pentanahan *Solid - Floating*

Tegangan Puncak (kV)			Waktu untuk Mencapai Puncak Tegangan (μs)			Rate of Rise of Recovery Voltage (kV/ μs)		
R	S	T	R	S	T	R	S	T
148,07	152,66	4,61	8,5	8,5	8,2	24,27	25,44	0,81

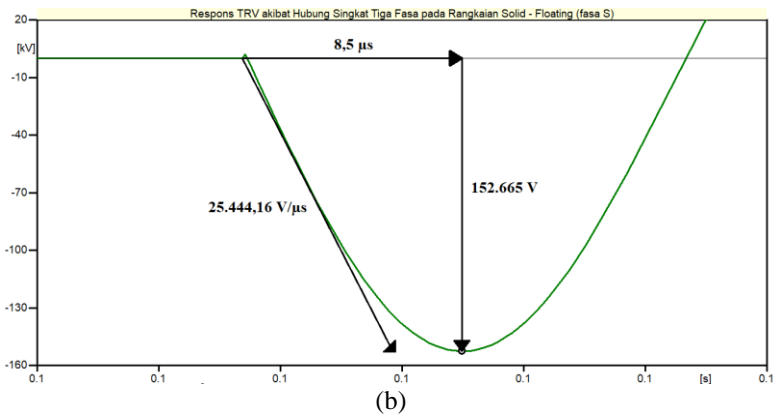
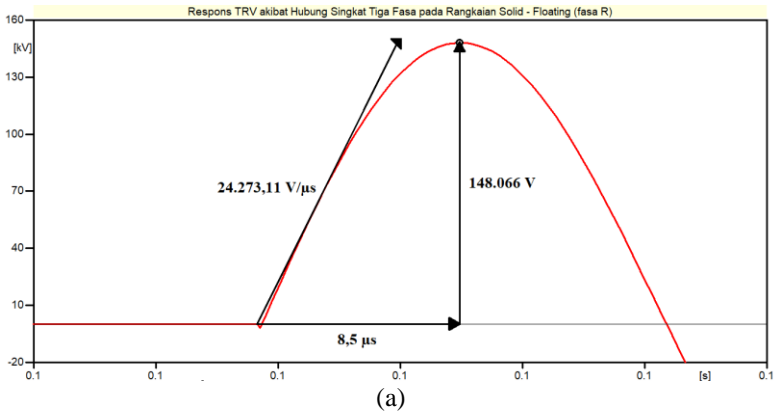
Dapat terlihat bahwa gangguan hubung singkat tiga fasa pada sistem tegangan menengah dengan konfigurasi pentanahan *Solid – Floating* menyebabkan munculnya *transient recovery voltage* pada *circuit breaker* di setiap fasanya.

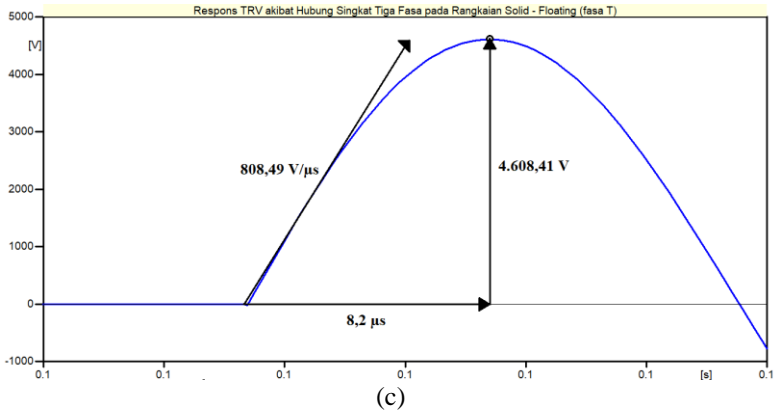
Batas nilai puncak *transient recovery voltage* pada sistem tegangan menengah dengan transformator daya terhubung *Solid – Floating* pada tiap fasa berdasarkan IEEE Std C37.04-1999 adalah:

$$V_{peak} = 1,54 \times 1,5 \times 9.428,09 = 21.778,89 \text{ V} = 21,78 \text{ kV} \quad (3.10)$$

Dari perhitungan di atas, dapat terlihat bahwa sistem tegangan menengah dengan transformator daya terhubung *Solid – Floating* menghasilkan nilai puncak *transient recovery voltage* yang melebihi standar nilai puncak *transient recovery voltage* yang telah ditetapkan, yaitu 21,78 kV pada fasa R dan S serta menghasilkan nilai puncak *transient recovery voltage* yang sesuai standar nilai puncak *transient recovery voltage* pada fasa T. Sedangkan waktu menuju puncak *transient recovery voltage* yang dihasilkan oleh sistem ini masih memenuhi standar, yaitu di bawah 36 μs. Sehingga, konfigurasi pentanahan *Solid – Floating* pada transformator daya masih kurang aman untuk digunakan pada sistem ini.

Untuk analisis pengukuran respons tegangan ketika dilakukan operasi hubung singkat tiga fasa ke tanah pada rangkaian simulasi *transient recovery voltage* menggunakan transformator daya dengan konfigurasi pentanahan *Solid – Floating* dapat dilihat pada Gambar 4.8.

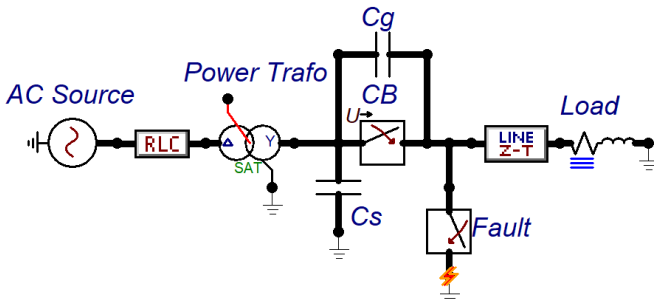




**Gambar 4.8** Analisis Pengukuran Respons Tegangan pada *Circuit Breaker* akibat Hubung Singkat Tiga Fasa pada Rangkaian dengan Konfigurasi Pentanahan *Solid – Floating* pada (a) Fasa R; (b) Fasa S; (c) Fasa T

### 4.3 Simulasi Rangkaian *Transient Recovery Voltage* dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung *Floating – Solid*

Pada simulasi rangkaian *transient recovery voltage* ini digunakan transformator daya dengan konfigurasi pentanahan *Floating* pada sisi primer dan *Solid* pada sisi sekunder. Simulasi rangkaian *transient recovery voltage* ini dapat dilihat pada Gambar 4.9.



**Gambar 4.9** Rangkaian Simulasi *Transient Recovery Voltage* dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung *Floating – Solid*

### 4.3.1 Respons Tegangan Saat Kondisi Normal

Nilai tegangan *line-neutral* ( $V_{L-N \text{ rms}}$ ) pada tiap fasa di sisi primer trafo daya adalah:

$$V_{L-N \text{ rms}} = \frac{150.000}{\sqrt{3}} = 86.602,54 \text{ V} \quad (3.11)$$

Tegangan puncak *line-neutral* ( $V_{L-N \text{ peak}}$ ) pada tiap fasa di sisi primer trafo daya adalah:

$$V_{L-N \text{ peak}} = 86.602,54 \times \sqrt{2} = 122.474,49 \text{ V} \quad (3.12)$$

Nilai tegangan *line-neutral* ( $V_{L-N \text{ rms}}$ ) pada tiap fasa di sisi sekunder trafo daya adalah:

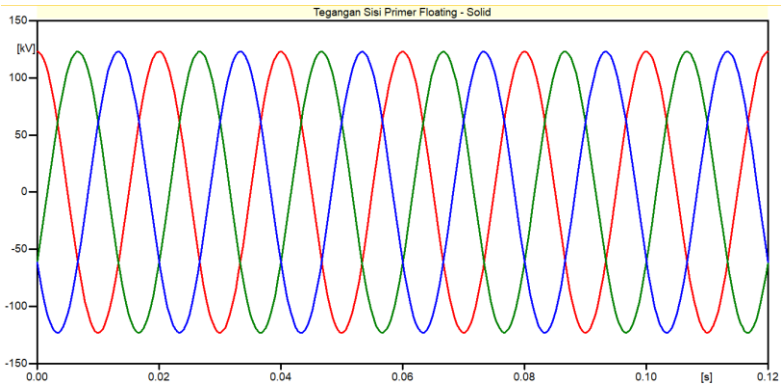
$$V_{L-N \text{ rms}} = \frac{20.000}{\sqrt{3}} = 11.547,005 \text{ V} \quad (3.13)$$

Tegangan puncak *line-neutral* ( $V_{L-N \text{ peak}}$ ) pada tiap fasa di sisi sekunder trafo daya adalah:

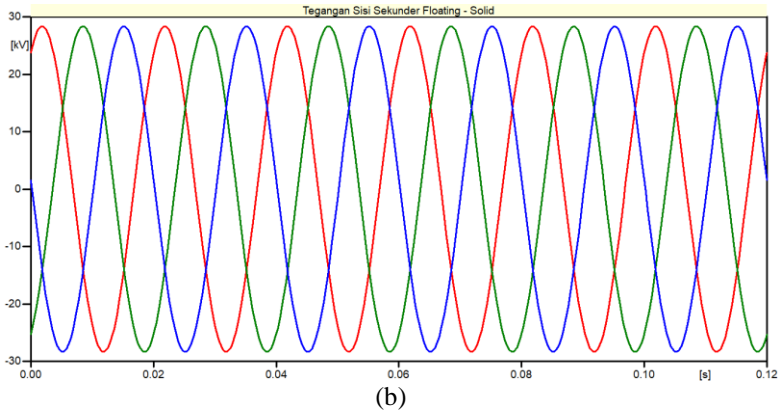
$$V_{L-N \text{ peak}} = 11.547,005 \times \sqrt{2} = 16.329,93 \text{ V} \quad (3.14)$$

$$V_{L-N \text{ peak}} = 16.329,93 \times \sqrt{3} = 28.284,27 \text{ V} \quad (3.15)$$

Respons tegangan pada saat kondisi normal pada konfigurasi pentanahan *Floating – Solid* diperlihatkan pada Gambar 4.10. Tegangan puncak hasil simulasi sudah sesuai dengan hasil perhitungan sebelumnya.



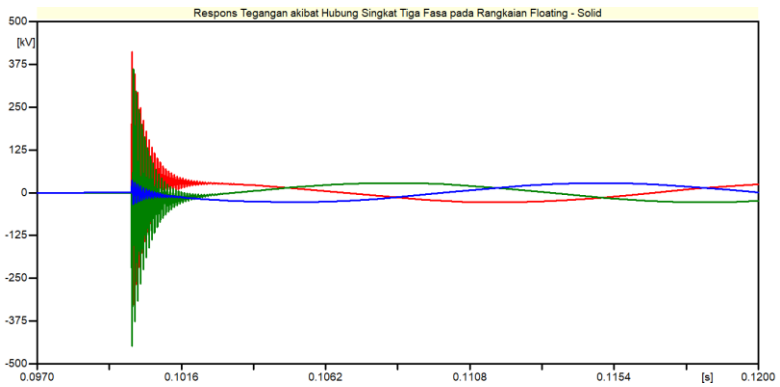
(a)



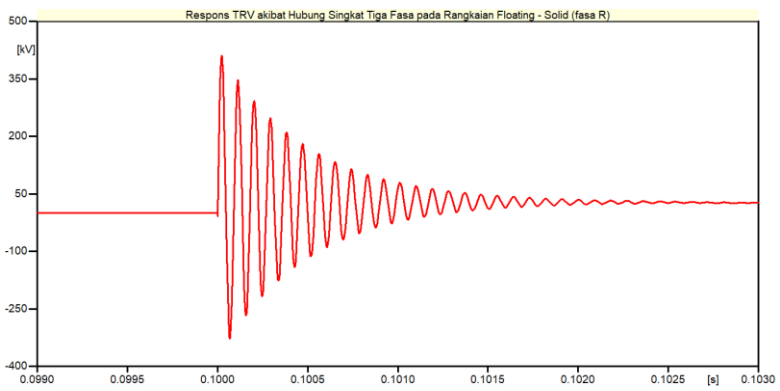
**Gambar 4.10** Respons Tegangan Trafo Daya dengan Konfigurasi Pentanahan *Floating – Solid* pada Saat Kondisi Normal (a) Tegangan Sisi Primer; (b) Tegangan Sisi Sekunder

#### 4.3.2 Respons Tegangan Saat Operasi Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah

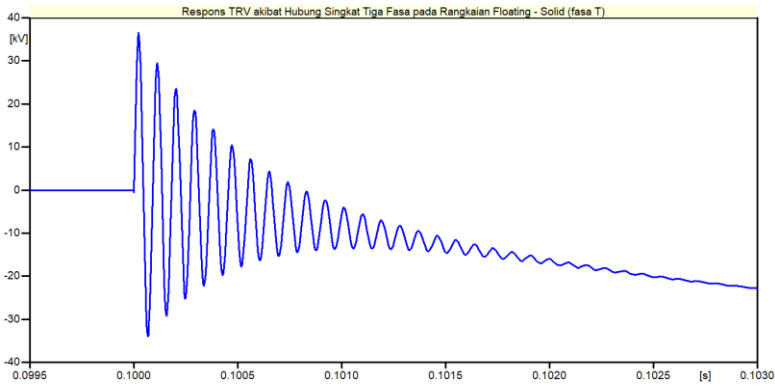
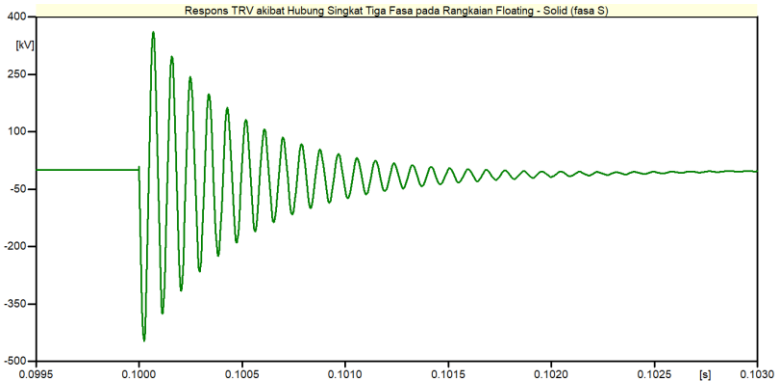
Pada kondisi ini diberikan gangguan berupa operasi hubung singkat tiga fasa ke tanah pada rangkaian simulasi *transient recovery voltage*. Operasi hubung singkat dilakukan pada fasa R, S, dan T pada detik ke-0,05. Variabel yang diamati pada simulasi ini adalah tegangan pada *circuit breaker* sisi sekunder transformator daya yang meliputi puncak tegangan, waktu tegangan untuk mencapai puncak, serta *rate of rise of recovery voltage*. Respons tegangan ketika dilakukan operasi hubung singkat tiga fasa ke tanah pada rangkaian simulasi *transient recovery voltage* menggunakan transformator daya dengan konfigurasi pentanahan *Floating – Solid* dapat dilihat pada Gambar 4.11.



(a)



(b)



**Gambar 4.11** Respons Tegangan pada *Circuit Breaker* akibat Hubung Singkat Tiga Fasa pada Rangkaian dengan Konfigurasi Pentanahan *Floating – Solid* pada (a) Ketiga Fasa; (b) Fasa R; (c) Fasa S; (d) Fasa T

#### 4.3.3 Hasil Pengukuran *Transient Recovery Voltage* dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung *Floating – Solid*

Hasil pengukuran *transient recovery voltage* akibat hubung singkat tiga fasa pada sistem tegangan menengah dengan transformator daya terhubung *Floating – Solid* pada tiap fasanya diperlihatkan pada Tabel 4.3.



**Tabel 4.3** Hasil Pengukuran *TRV* pada Sistem dengan Konfigurasi Pentanahan *Floating - Solid*

Tegangan Puncak (kV)			Waktu untuk Mencapai Puncak Tegangan ( $\mu\text{s}$ )			<i>Rate of Rise of Recovery Voltage</i> (kV/ $\mu\text{s}$ )		
R	S	T	R	S	T	R	S	T
411,09	447,52	36,52	23,8	23,7	22,8	24,91	27,46	2,36

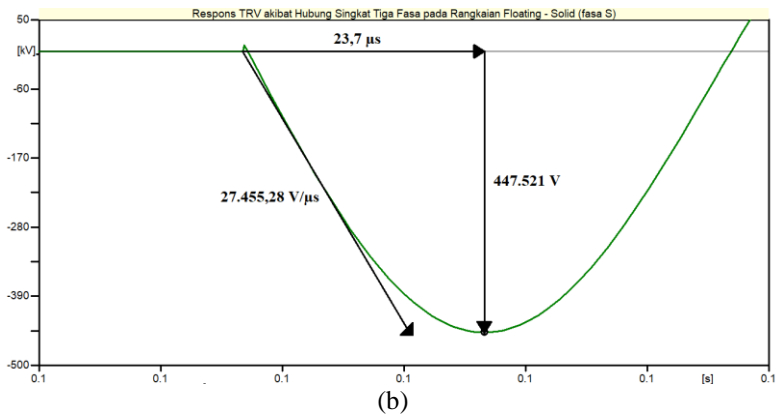
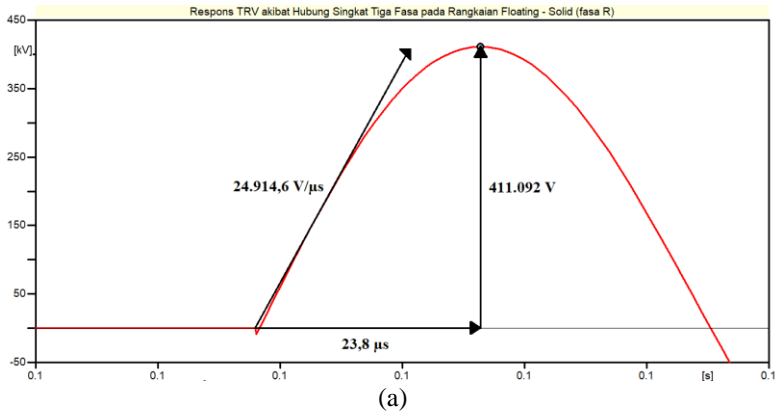
Dapat terlihat bahwa gangguan hubung singkat tiga fasa pada sistem tegangan menengah dengan konfigurasi pentanahan *Floating - Solid* menyebabkan munculnya *transient recovery voltage* pada *circuit breaker* di setiap fasanya.

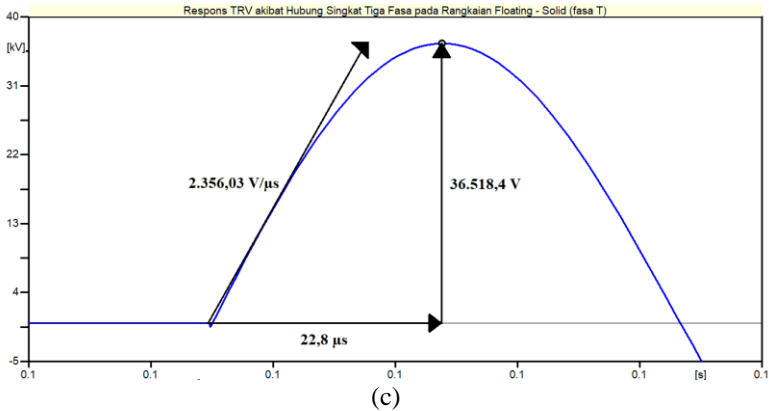
Batas nilai puncak *transient recovery voltage* pada sistem tegangan menengah dengan transformator daya terhubung *Floating - Solid* pada tiap fasa berdasarkan IEEE Std C37.04-1999 adalah:

$$V_{peak} = 1,54 \times 1,5 \times 28.284,27 = 65.336,66 \text{ V} = 65,34 \text{ kV} \quad (3.16)$$

Dari perhitungan di atas, dapat terlihat bahwa sistem tegangan menengah dengan transformator daya terhubung *Floating - Solid* menghasilkan nilai puncak *transient recovery voltage* yang melebihi standar nilai puncak *transient recovery voltage* yang telah ditetapkan, yaitu 65,34 kV pada fasa R dan S serta menghasilkan nilai puncak *transient recovery voltage* yang sesuai standar nilai puncak *transient recovery voltage* pada fasa T. Sedangkan waktu menuju puncak *transient recovery voltage* yang dihasilkan oleh sistem ini masih memenuhi standar, yaitu di bawah 63  $\mu\text{s}$ . Sehingga, konfigurasi pentanahan *Floating - Solid* pada transformator daya masih kurang aman untuk digunakan pada sistem ini.

Untuk analisis pengukuran respons tegangan ketika dilakukan operasi hubung singkat tiga fasa ke tanah pada rangkaian simulasi *transient recovery voltage* menggunakan transformator daya dengan konfigurasi pentanahan *Floating - Solid* dapat dilihat pada Gambar 4.12.

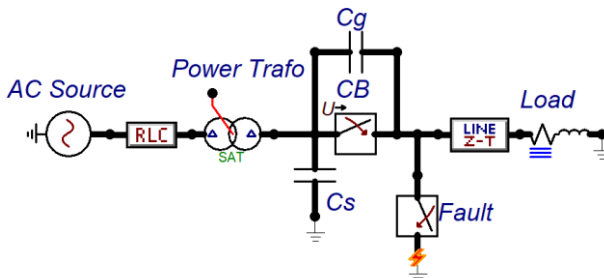




**Gambar 4.12** Analisis Pengukuran Respons Tegangan pada *Circuit Breaker* akibat Hubung Singkat Tiga Fasa pada Rangkaian dengan Konfigurasi Pentanahan *Floating – Solid* pada (a) Fasa R; (b) Fasa S; (c) Fasa T

#### 4.4 Simulasi Rangkaian *Transient Recovery Voltage* dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung *Floating – Floating*

Pada simulasi rangkaian *transient recovery voltage* ini digunakan transformator daya dengan konfigurasi pentanahan *Floating* pada sisi primer dan sisi sekundernya. Simulasi rangkaian *transient recovery voltage* ini dapat dilihat pada Gambar 4.13.



**Gambar 4.13** Rangkaian Simulasi *Transient Recovery Voltage* dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung *Floating – Floating*

#### 4.4.1 Respons Tegangan Saat Kondisi Normal

Nilai tegangan *line-netral* ( $V_{L-N \text{ rms}}$ ) pada tiap fasa di sisi primer trafo daya adalah:

$$V_{L-N \text{ rms}} = \frac{150.000}{\sqrt{3}} = 86.602,54 \text{ V} \quad (3.17)$$

Tegangan puncak *line-netral* ( $V_{L-N \text{ peak}}$ ) pada tiap fasa di sisi primer trafo daya adalah:

$$V_{L-N \text{ peak}} = 86.602,54 \times \sqrt{2} = 122.474,49 \text{ V} \quad (3.18)$$

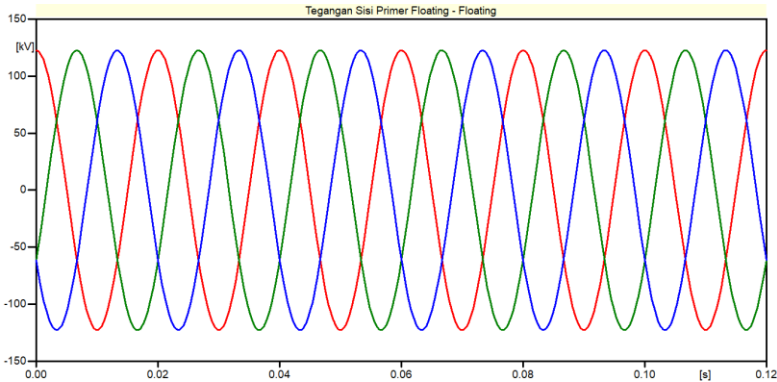
Nilai tegangan *line-netral* ( $V_{L-N \text{ rms}}$ ) pada tiap fasa di sisi sekunder trafo daya adalah:

$$V_{L-N \text{ rms}} = \frac{20.000}{\sqrt{3}} = 11.547,005 \text{ V} \quad (3.19)$$

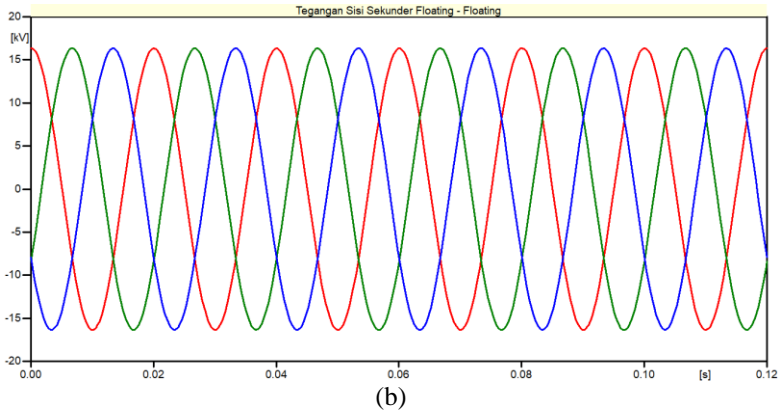
Tegangan puncak *line-netral* ( $V_{L-N \text{ peak}}$ ) pada tiap fasa di sisi sekunder trafo daya adalah:

$$V_{L-N \text{ peak}} = 11.547,005 \times \sqrt{2} = 16.329,93 \text{ V} \quad (3.20)$$

Respons tegangan pada saat kondisi normal pada konfigurasi pentanahan *Floating - Floating* diperlihatkan pada Gambar 4.14. Tegangan puncak hasil simulasi sudah sesuai dengan hasil perhitungan sebelumnya.



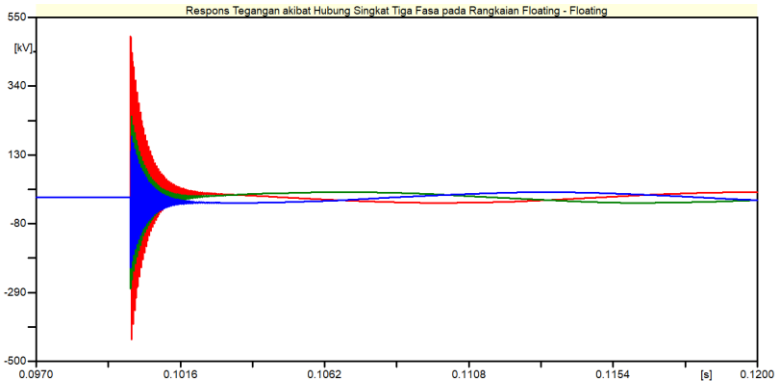
(a)



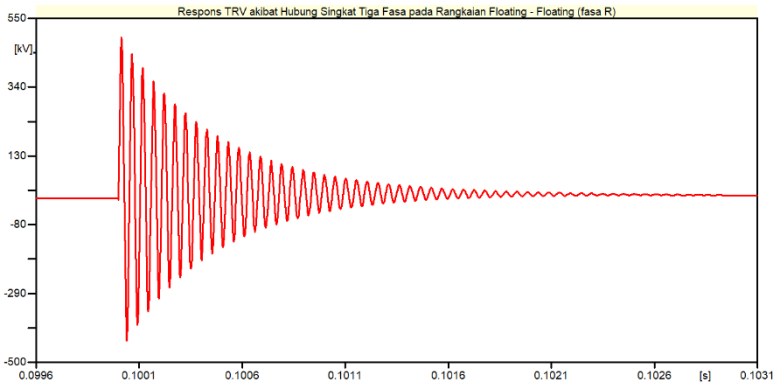
**Gambar 4.14** Respons Tegangan Trafo Daya dengan Konfigurasi Pentanahan *Floating – Floating* pada Saat Kondisi Normal (a) Tegangan Sisi Primer; (b) Tegangan Sisi Sekunder

#### 4.4.2 Respons Tegangan Saat Operasi Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah

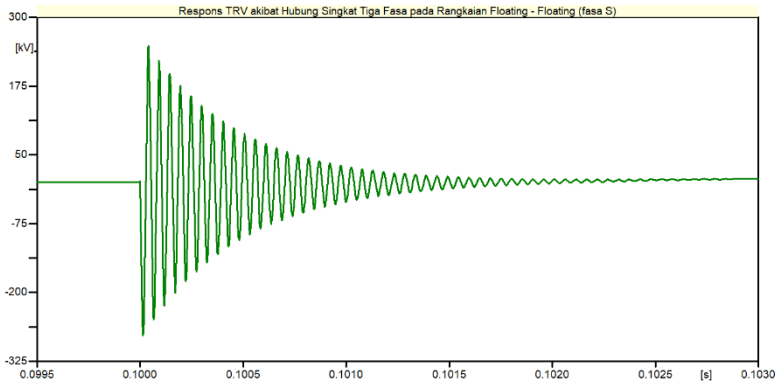
Pada kondisi ini diberikan gangguan berupa operasi hubung singkat tiga fasa ke tanah pada rangkaian simulasi *transient recovery voltage*. Operasi hubung singkat dilakukan pada fasa R, S, dan T pada detik ke-0,05. Variabel yang diamati pada simulasi ini adalah tegangan pada *circuit breaker* sisi sekunder transformator daya yang meliputi puncak tegangan, waktu tegangan untuk mencapai puncak, serta *rate of rise of recovery voltage*. Respons tegangan ketika dilakukan operasi hubung singkat tiga fasa ke tanah pada rangkaian simulasi *transient recovery voltage* menggunakan transformator daya dengan konfigurasi pentanahan *Floating – Floating* dapat dilihat pada Gambar 4.15.



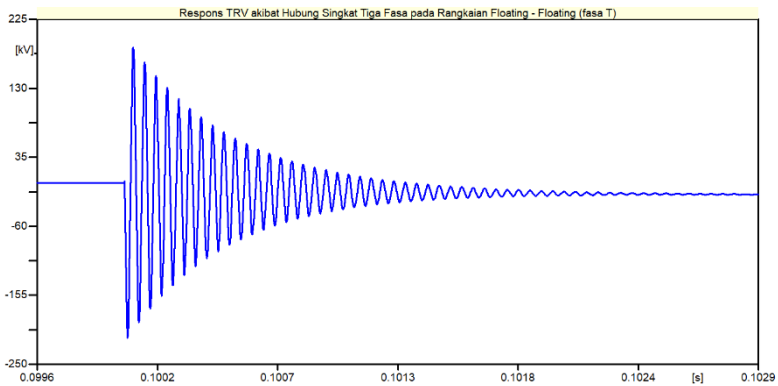
(a)



(b)



(c)



(d)

**Gambar 4.15** Respons Tegangan pada *Circuit Breaker* akibat Hubung Singkat Tiga Fasa pada Rangkaian dengan Konfigurasi Pentanahan *Floating – Floating* pada (a) Ketiga Fasa; (b) Fasa R; (c) Fasa S; (d) Fasa T

#### 4.4.3 Hasil Pengukuran *Transient Recovery Voltage* dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung *Floating – Floating*

Hasil pengukuran *transient recovery voltage* akibat hubung singkat tiga fasa pada sistem tegangan menengah dengan transformator daya terhubung *Floating – Floating* pada tiap fasanya diperlihatkan pada Tabel 4.4.

**Tabel 4.4** Hasil Pengukuran *TRV* pada Sistem dengan Konfigurasi Pentanahan *Floating - Floating*

Tegangan Puncak (kV)			Waktu untuk Mencapai Puncak Tegangan ( $\mu$ s)			Rate of Rise of Recovery Voltage (kV/ $\mu$ s)		
R	S	T	R	S	T	R	S	T
492,55	278,5	214,06	13,8	13,7	13,8	51,31	29,32	22,3

Dapat terlihat bahwa gangguan hubung singkat tiga fasa pada sistem tegangan menengah dengan konfigurasi pentanahan *Floating - Floating* menyebabkan munculnya *transient recovery voltage* pada *circuit breaker* di setiap fasanya.

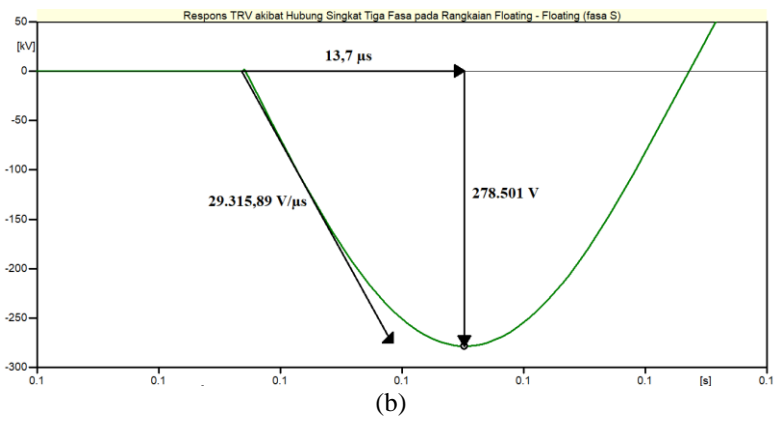
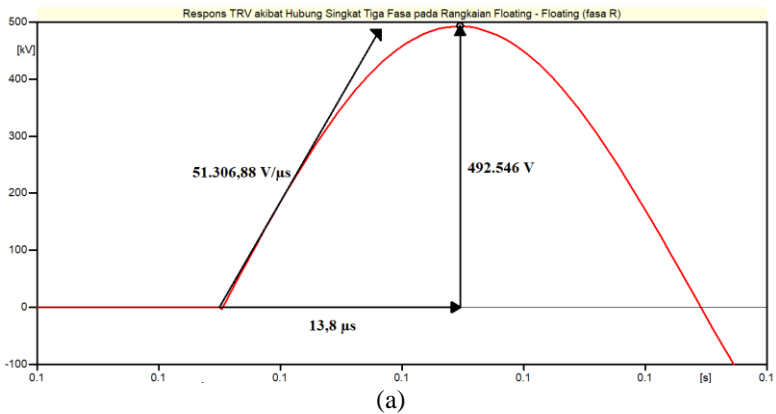
Batas nilai puncak *transient recovery voltage* pada sistem tegangan menengah dengan transformator daya terhubung *Floating - Floating* pada tiap fasa berdasarkan IEEE Std C37.04-1999 adalah:

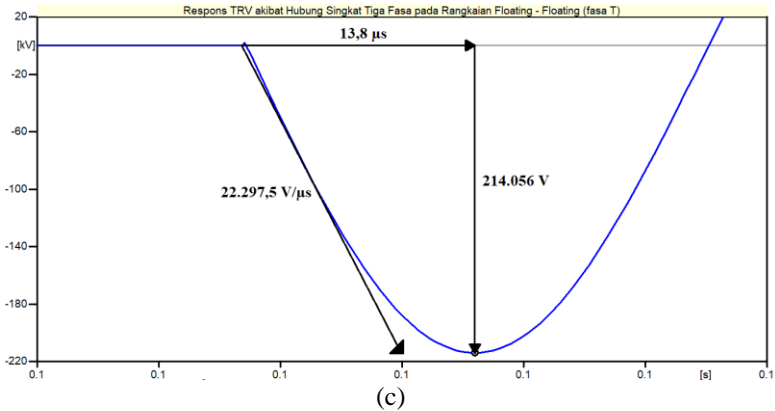
$$V_{peak} = 1,54 \times 1,5 \times 16.329,93 = 37.722,14 \text{ V} = 37,72 \text{ kV} \quad (3.21)$$

Dari perhitungan di atas, dapat terlihat bahwa sistem tegangan menengah dengan transformator daya terhubung *Floating - Floating* menghasilkan nilai puncak *transient recovery voltage* yang melebihi standar nilai puncak *transient recovery voltage* yang telah ditetapkan, yaitu 37,72 kV pada ketiga fasanya. Sedangkan waktu menuju puncak *transient recovery voltage* yang dihasilkan oleh sistem ini masih memenuhi standar, yaitu di bawah 52  $\mu$ s. Sehingga, konfigurasi pentanahan *Floating - Floating* pada transformator daya masih kurang aman untuk digunakan pada sistem ini.

Untuk analisis pengukuran respons tegangan ketika dilakukan operasi hubung singkat tiga fasa ke tanah pada rangkaian simulasi *transient recovery voltage* menggunakan transformator daya dengan konfigurasi pentanahan *Floating - Floating* dapat dilihat pada Gambar 4.16.



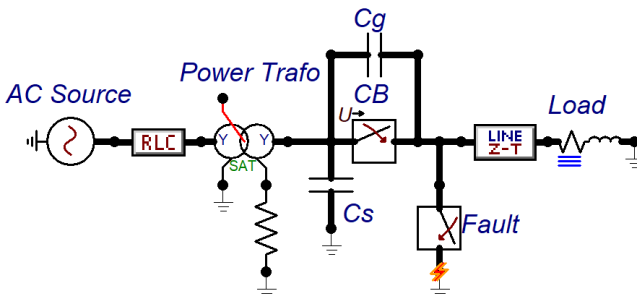




**Gambar 4.16** Analisis Pengukuran Respons Tegangan pada *Circuit Breaker* akibat Hubung Singkat Tiga Fasa pada Rangkaian dengan Konfigurasi Pentanahan *Floating – Floating* pada (a) Fasa R; (b) Fasa S; (c) Fasa T

#### 4.5 Simulasi Rangkaian *Transient Recovery Voltage* dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung *Solid – Resistance*

Pada simulasi rangkaian *transient recovery voltage* ini digunakan transformator daya dengan konfigurasi pentanahan *Solid* pada sisi primer dan terhubung dengan *Resistance* 12  $\Omega$ , 40  $\Omega$  dan 500  $\Omega$  pada sisi sekunder. Simulasi rangkaian *transient recovery voltage* ini dapat dilihat pada Gambar 4.17.



**Gambar 4.17** Rangkaian Simulasi *Transient Recovery Voltage* dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung *Solid – Resistance*

#### 4.5.1 Respons Tegangan Saat Kondisi Normal

Nilai tegangan *line-neutral* ( $V_{L-N \text{ rms}}$ ) pada tiap fasa di sisi primer trafo daya adalah:

$$V_{L-N \text{ rms}} = \frac{150.000}{\sqrt{3}} = 86.602,54 \text{ V} \quad (3.22)$$

Tegangan puncak *line-neutral* ( $V_{L-N \text{ peak}}$ ) pada tiap fasa di sisi primer trafo daya adalah:

$$V_{L-N \text{ peak}} = 86.602,54 \times \sqrt{2} = 122.474,49 \text{ V} \quad (3.23)$$

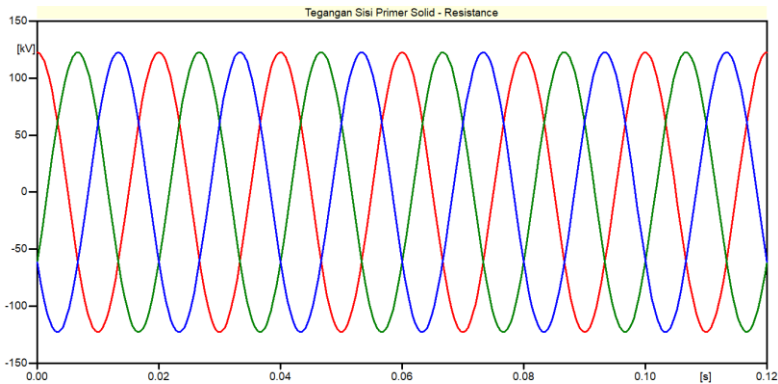
Nilai tegangan *line-neutral* ( $V_{L-N \text{ rms}}$ ) pada tiap fasa di sisi sekunder trafo daya adalah:

$$V_{L-N \text{ rms}} = \frac{20.000}{\sqrt{3}} = 11.547,005 \text{ V} \quad (3.24)$$

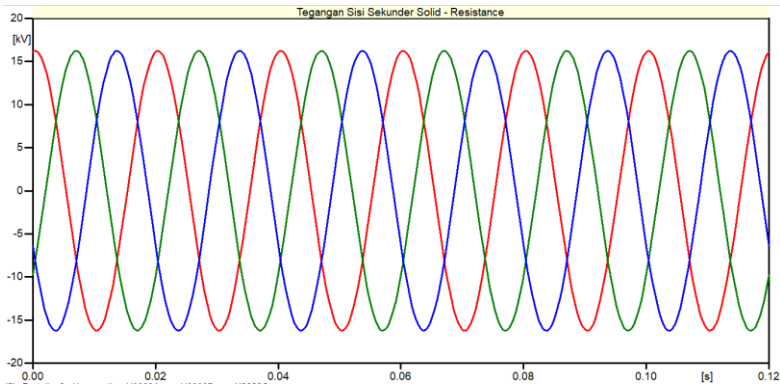
Tegangan puncak *line-neutral* ( $V_{L-N \text{ peak}}$ ) pada tiap fasa di sisi sekunder trafo daya adalah:

$$V_{L-N \text{ peak}} = 11.547,005 \times \sqrt{2} = 16.329,93 \text{ V} \quad (3.25)$$

Respons tegangan pada saat kondisi normal pada konfigurasi pentanahan *Solid - Resistance* diperlihatkan pada Gambar 4.18. Tegangan puncak hasil simulasi sudah sesuai dengan hasil perhitungan sebelumnya.



(a)

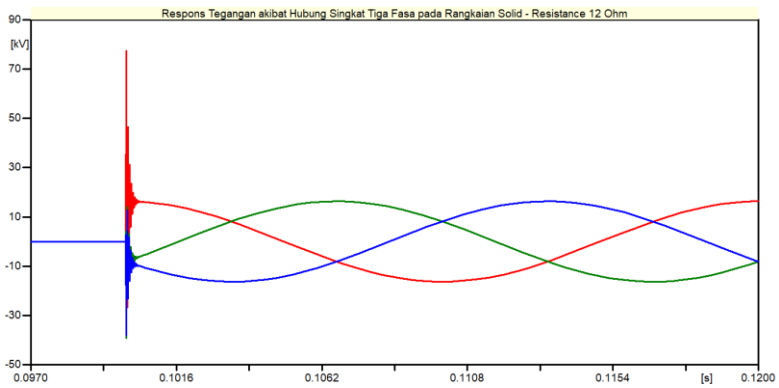


(b)

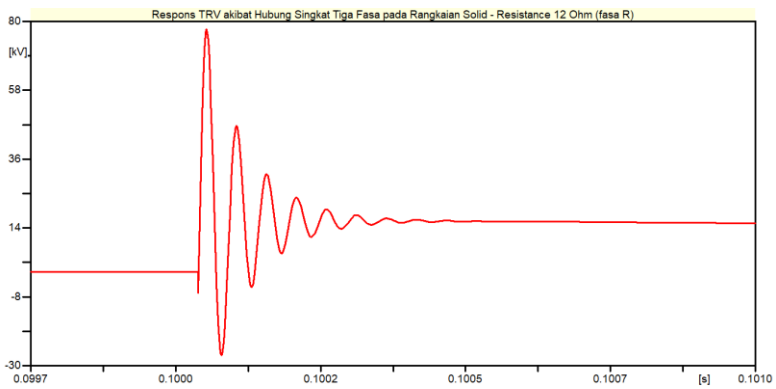
**Gambar 4.18** Respons Tegangan Trafo Daya dengan Konfigurasi Pentanahan *Solid – Resistance* pada Saat Kondisi Normal (a) Tegangan Sisi Primer; (b) Tegangan Sisi Sekunder

#### 4.5.2 Respons Tegangan Saat Operasi Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah

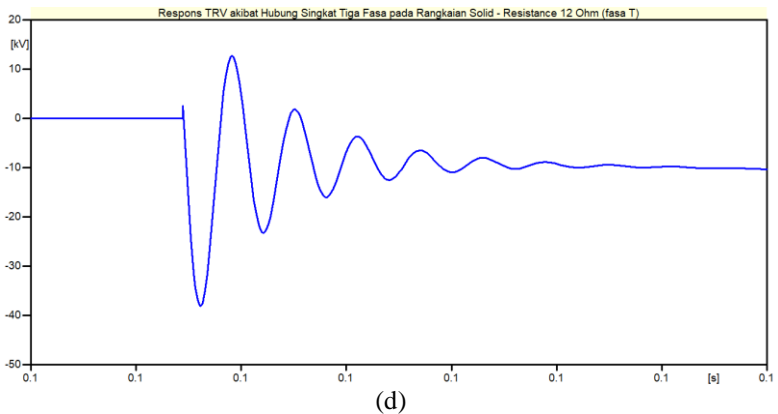
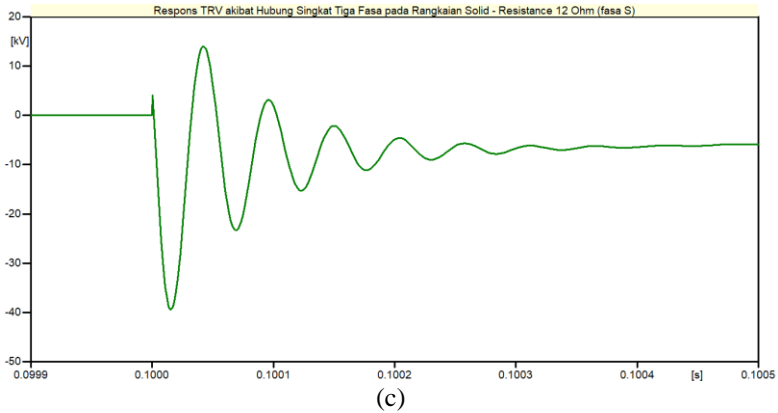
Pada kondisi ini diberikan gangguan berupa operasi hubung singkat tiga fasa ke tanah pada rangkaian simulasi *transient recovery voltage*. Operasi hubung singkat dilakukan pada fasa R, S, dan T pada detik ke-0,05. Variabel yang diamati pada simulasi ini adalah tegangan pada *circuit breaker* sisi sekunder transformator daya yang meliputi puncak tegangan, waktu tegangan untuk mencapai puncak, serta *rate of rise of recovery voltage*. Respons tegangan ketika dilakukan operasi hubung singkat tiga fasa ke tanah pada rangkaian simulasi *transient recovery voltage* menggunakan transformator daya dengan konfigurasi pentanahan *Solid – Resistance* bernilai  $12 \Omega$  dapat dilihat pada Gambar 4.19.



(a)

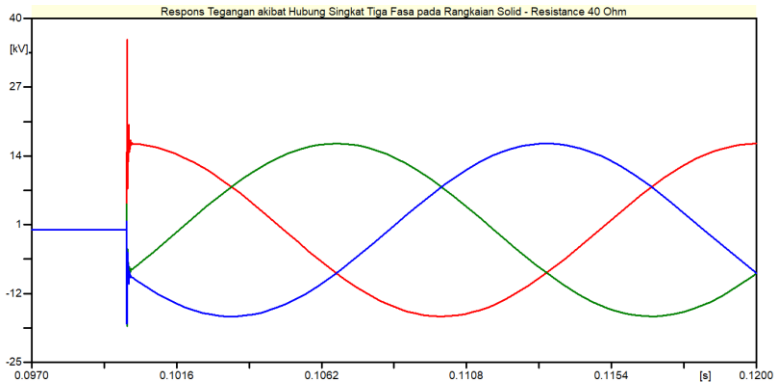


(b)

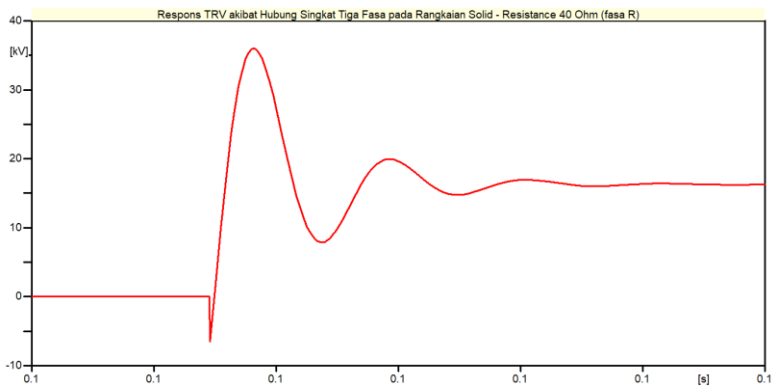


**Gambar 4.19** Respons Tegangan pada *Circuit Breaker* akibat Hubung Singkat Tiga Fasa pada Rangkaian dengan Konfigurasi Pentanahan *Solid – Resistance* bernilai  $12 \Omega$  pada (a) Ketiga Fasa; (b) Fasa R; (c) Fasa S; (d) Fasa T

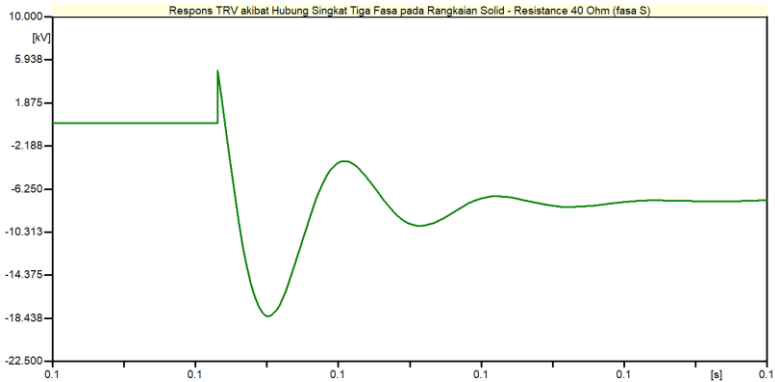
Respons tegangan ketika dilakukan operasi hubung singkat tiga fasa ke tanah pada rangkaian simulasi *transient recovery voltage* menggunakan transformator daya dengan konfigurasi pentanahan *Solid – Resistance* bernilai  $40 \Omega$  dapat dilihat pada Gambar 4.20.



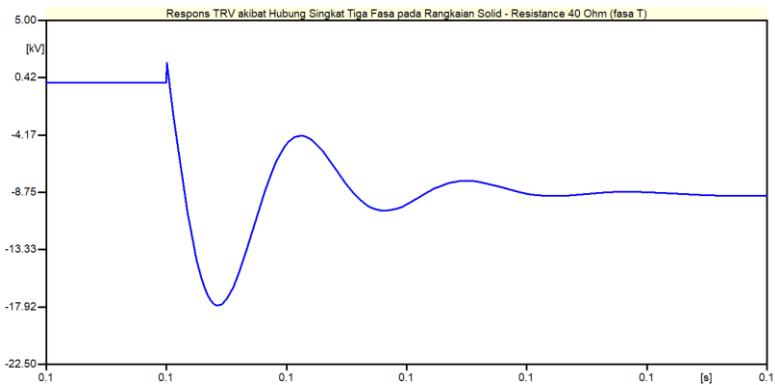
(a)



(b)



(c)

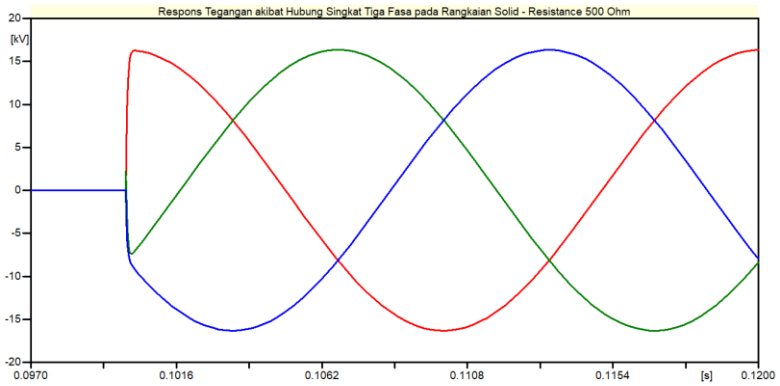


(d)

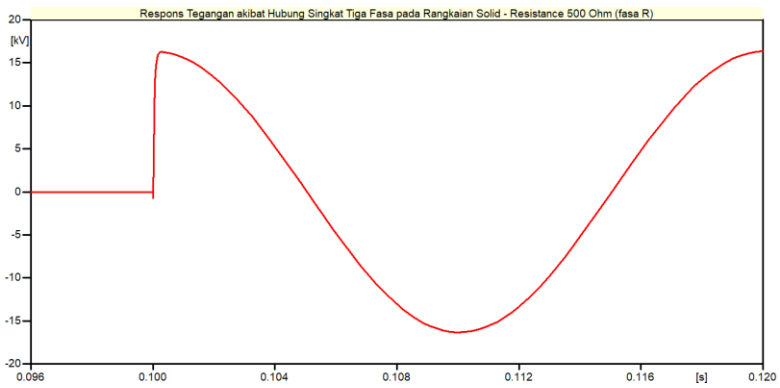
**Gambar 4.20** Respons Tegangan pada *Circuit Breaker* akibat Hubung Singkat Tiga Fasa pada Rangkaian dengan Konfigurasi Pentanahan *Solid* – *Resistance* bernilai  $40 \Omega$  pada (a) Ketiga Fasa; (b) Fasa R; (c) Fasa S; (d) Fasa T

Respons tegangan ketika dilakukan operasi hubung singkat tiga fasa ke tanah pada rangkaian simulasi *transient recovery voltage* menggunakan transformator daya dengan konfigurasi pentanahan *Solid* – *Resistance* bernilai  $500 \Omega$  dapat dilihat pada Gambar 4.21.

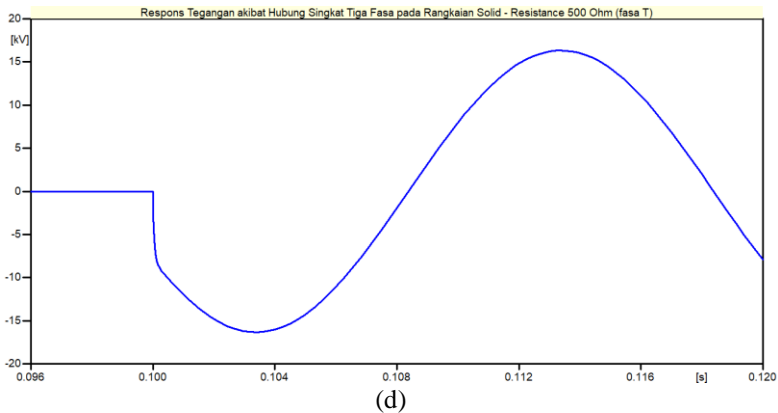
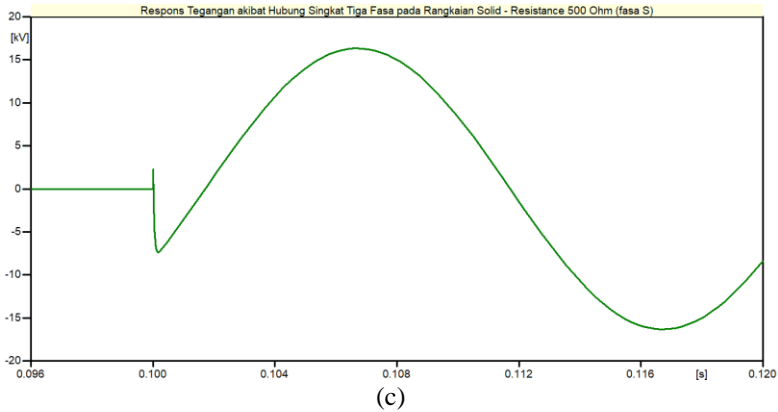




(a)



(b)



**Gambar 4.21** Respons Tegangan pada *Circuit Breaker* akibat Hubung Singkat Tiga Fasa pada Rangkaian dengan Konfigurasi Pentanahan *Solid – Resistance* bernilai  $500 \Omega$  pada (a) Ketiga Fasa; (b) Fasa R; (c) Fasa S; (d) Fasa T

#### 4.5.3 Hasil Pengukuran *Transient Recovery Voltage* dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung *Solid – Resistance* $12 \Omega$

Hasil pengukuran *transient recovery voltage* akibat hubung singkat tiga fasa pada sistem tegangan menengah dengan transformator daya terhubung *Solid – Resistance*  $12 \Omega$  pada tiap fasanya diperlihatkan pada Tabel 4.5.

**Tabel 4.5** Hasil Pengukuran *TRV* pada Sistem dengan Konfigurasi Pentanahan *Solid – Resistance* 12 Ω

Tegangan Puncak (kV)			Waktu untuk Mencapai Puncak Tegangan (μs)			Rate of Rise of Recovery Voltage (kV/ μs)		
R	S	T	R	S	T	R	S	T
77,51	39,41	38,11	15,7	15,8	15,6	6,74	3,37	3,38

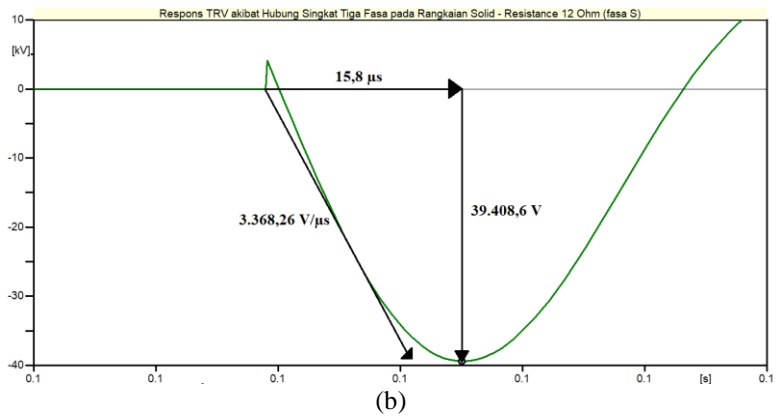
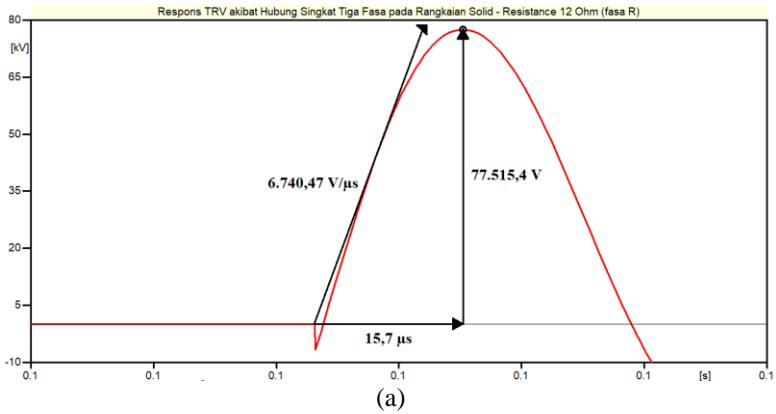
Dapat terlihat bahwa gangguan hubung singkat tiga fasa pada sistem tegangan menengah dengan konfigurasi pentanahan *Solid – Resistance* 12 Ω menyebabkan munculnya *transient recovery voltage* pada *circuit breaker* di setiap fasanya.

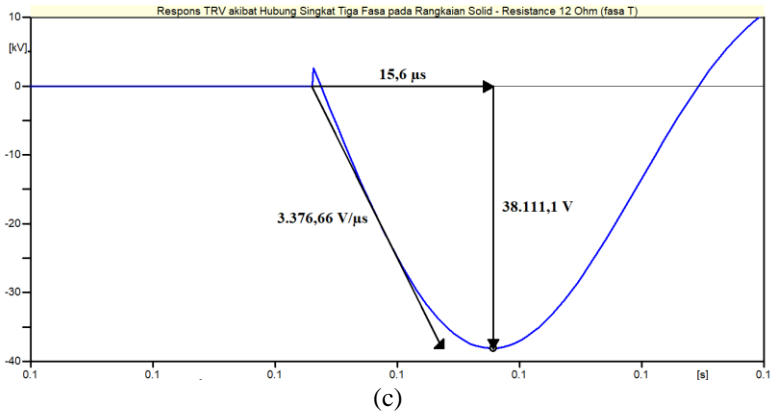
Batas nilai puncak *transient recovery voltage* pada sistem tegangan menengah dengan transformator daya terhubung *Solid – Resistance* 12 Ω pada tiap fasa berdasarkan IEEE Std C37.04-1999 adalah:

$$V_{peak} = 1,54 \times 1,5 \times 16.329,93 = 37.722,14 \text{ V} = 37,72 \text{ kV} \quad (3.26)$$

Dari perhitungan di atas, dapat terlihat bahwa sistem tegangan menengah dengan transformator daya terhubung *Solid – Resistance* 12 Ω menghasilkan nilai puncak *transient recovery voltage* yang melebihi standar nilai puncak *transient recovery voltage* yang telah ditetapkan, yaitu 37,72 kV pada ketiga fasanya. Sedangkan waktu menuju puncak *transient recovery voltage* yang dihasilkan oleh sistem ini masih memenuhi standar, yaitu di bawah 52 μs. Sehingga, konfigurasi pentanahan *Solid – Resistance* 12 Ω pada transformator daya masih kurang aman untuk digunakan pada sistem ini.

Untuk analisis pengukuran respons tegangan ketika dilakukan operasi hubung singkat tiga fasa ke tanah pada rangkaian simulasi *transient recovery voltage* menggunakan transformator daya dengan konfigurasi pentanahan *Solid – Resistance* 12 Ω dapat dilihat pada Gambar 4.22.





**Gambar 4.22** Analisis Pengukuran Respons Tegangan pada *Circuit Breaker* akibat Hubung Singkat Tiga Fasa pada Rangkaian dengan Konfigurasi Pentanahan *Solid – Resistance 12 Ω* pada (a) Fasa R; (b) Fasa S; (c) Fasa T

#### 4.5.4 Hasil Pengukuran *Transient Recovery Voltage* dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung *Solid – Resistance 40 Ω*

Hasil pengukuran *transient recovery voltage* akibat hubung singkat tiga fasa pada sistem tegangan menengah dengan transformator daya terhubung *Solid – Resistance 40 Ω* pada tiap fasanya diperlihatkan pada Tabel 4.6.

**Tabel 4.6** Hasil Pengukuran *TRV* pada Sistem dengan Konfigurasi Pentanahan *Solid – Resistance 40 Ω*

Tegangan Puncak (kV)			Waktu untuk Mencapai Puncak Tegangan (μs)			Rate of Rise of Recovery Voltage (kV/ μs)		
R	S	T	R	S	T	R	S	T
35,98	18,25	17,8	18,4	19	17,7	2,57	1,22	1,41

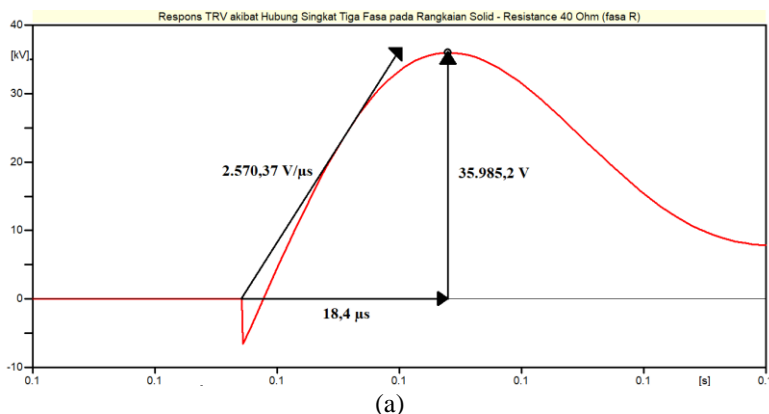
Dapat terlihat bahwa gangguan hubung singkat tiga fasa pada sistem tegangan menengah dengan konfigurasi pentanahan *Solid – Resistance 40 Ω* menyebabkan munculnya *transient recovery voltage* pada *circuit breaker* di setiap fasanya.

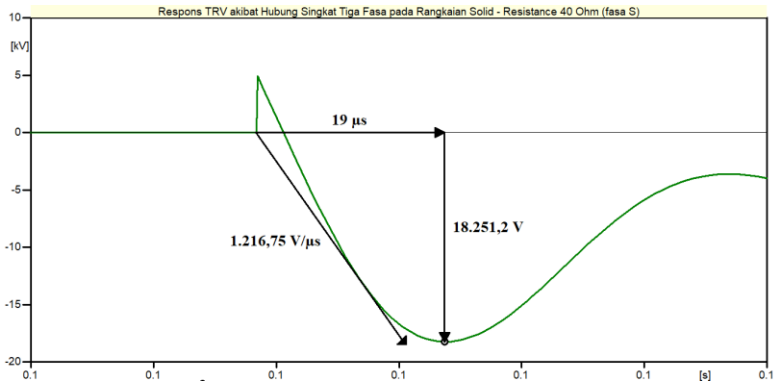
Batas nilai puncak *transient recovery voltage* pada sistem tegangan menengah dengan transformator daya terhubung *Solid – Resistance* 40 Ω pada tiap fasa berdasarkan IEEE Std C37.04-1999 adalah:

$$V_{peak} = 1,54 \times 1,5 \times 16.329,93 = 37.722,14 \text{ V} = 37,72 \text{ kV} \quad (3.27)$$

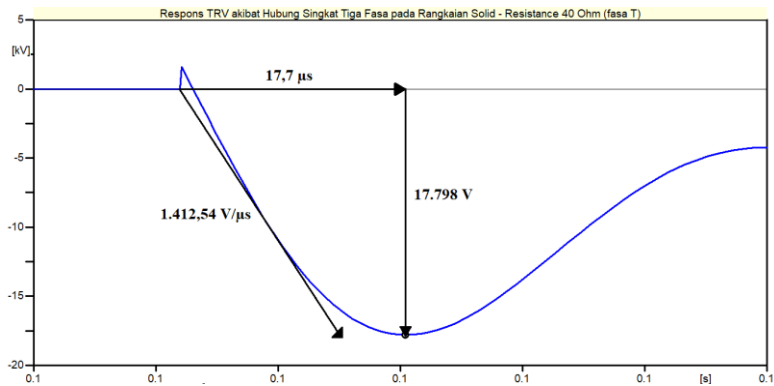
Dari perhitungan di atas, dapat terlihat bahwa sistem tegangan menengah dengan transformator daya terhubung *Solid – Resistance* 40 Ω menghasilkan nilai puncak *transient recovery voltage* yang sudah sesuai dengan standar nilai puncak *transient recovery voltage* yang telah ditetapkan, yaitu 37,72 kV pada ketiga fasanya. Begitu juga dengan waktu menuju puncak *transient recovery voltage* yang dihasilkan oleh sistem ini masih memenuhi standar, yaitu di bawah 52 μs. Sehingga, konfigurasi pentanahan *Solid – Resistance* 40 Ω pada transformator daya sudah aman untuk digunakan pada sistem ini.

Untuk analisis pengukuran respons tegangan ketika dilakukan operasi hubung singkat tiga fasa ke tanah pada rangkaian simulasi *transient recovery voltage* menggunakan transformator daya dengan konfigurasi pentanahan *Solid – Resistance* 40 Ω dapat dilihat pada Gambar 4.23.





(b)



(c)

**Gambar 4.23** Analisis Pengukuran Respons Tegangan pada *Circuit Breaker* akibat Hubung Singkat Tiga Fasa pada Rangkaian dengan Konfigurasi Pentanahan *Solid – Resistance 40 Ω* pada (a) Fasa R; (b) Fasa S; (c) Fasa T

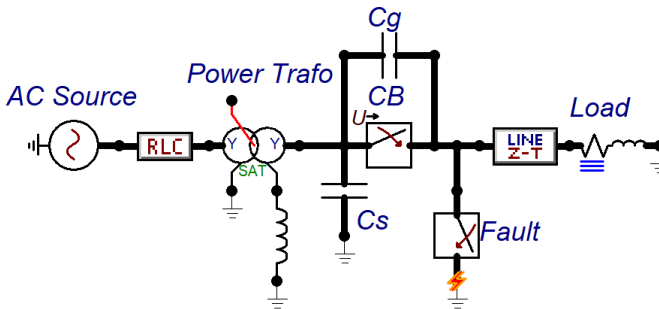
#### 4.5.5 Hasil Pengukuran *Transient Recovery Voltage* dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung *Solid – Resistance 500 Ω*

Respons tegangan hasil operasi hubung singkat tiga fasa yang dilakukan pada sistem tegangan menengah dengan transformator daya terhubung *Solid – Resistance 500 Ω* yang diperlihatkan pada Gambar 4.21 menunjukkan bahwa tidak adanya *transient recovery voltage* pada ketiga

fasanya. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi pentanahan *Solid – Resistance* 500 Ω pada transformator daya sangat aman untuk digunakan pada sistem ini.

#### 4.6 Simulasi Rangkaian *Transient Recovery Voltage* dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung *Solid – Reactor*

Pada simulasi rangkaian *transient recovery voltage* ini digunakan transformator daya dengan konfigurasi pentanahan *Solid* pada sisi primer dan terhubung dengan *Reactor* 10 mH dan 95 mH pada sisi sekunder. Simulasi rangkaian *transient recovery voltage* ini dapat dilihat pada Gambar 4.24.



**Gambar 4.24** Rangkaian Simulasi *Transient Recovery Voltage* dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung *Solid – Reactor*

##### 4.6.1 Respons Tegangan Saat Kondisi Normal

Nilai tegangan *line-neutral* ( $V_{L-N \text{ rms}}$ ) pada tiap fasa di sisi primer trafo daya adalah:

$$V_{L-N \text{ rms}} = \frac{150.000}{\sqrt{3}} = 86.602,54 \text{ V} \quad (3.28)$$

Tegangan puncak *line-neutral* ( $V_{L-N \text{ peak}}$ ) pada tiap fasa di sisi primer trafo daya adalah:

$$V_{L-N \text{ peak}} = 86.602,54 \times \sqrt{2} = 122.474,49 \text{ V} \quad (3.29)$$

Nilai tegangan *line-neutral* ( $V_{L-N \text{ rms}}$ ) pada tiap fasa di sisi sekunder trafo daya adalah:

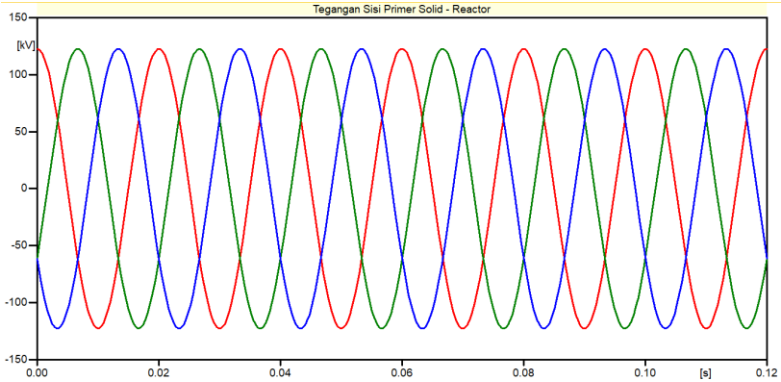
$$V_{L-N \text{ rms}} = \frac{20.000}{\sqrt{3}} = 11.547,005 \text{ V} \quad (3.30)$$

Tegangan puncak *line-neutral* ( $V_{L-N \text{ peak}}$ ) pada tiap fasa di sisi sekunder trafo daya adalah:

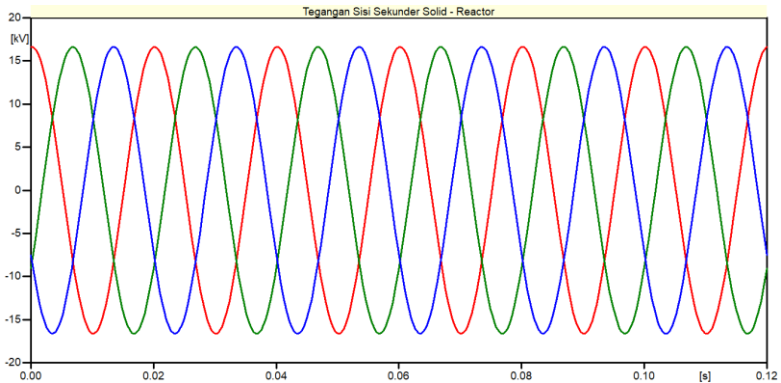


$$V_{L-N\ peak} = 11.547,005 \times \sqrt{2} = 16.329,93\text{ V} \quad (3.31)$$

Respons tegangan pada saat kondisi normal pada konfigurasi pentanahan *Solid – Reactor* diperlihatkan pada Gambar 4.25. Tegangan puncak hasil simulasi sudah sesuai dengan hasil perhitungan sebelumnya.



(a)



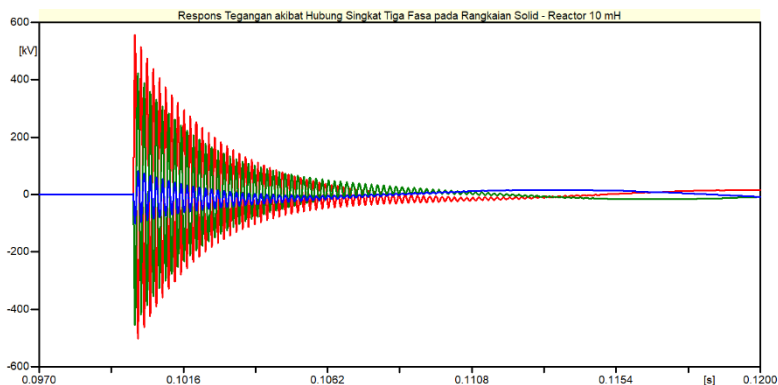
(b)

**Gambar 4.25** Respons Tegangan Trafo Daya dengan Konfigurasi Pentanahan *Solid – Reactor* pada Saat Kondisi Normal (a) Tegangan Sisi Primer; (b) Tegangan Sisi Sekunder

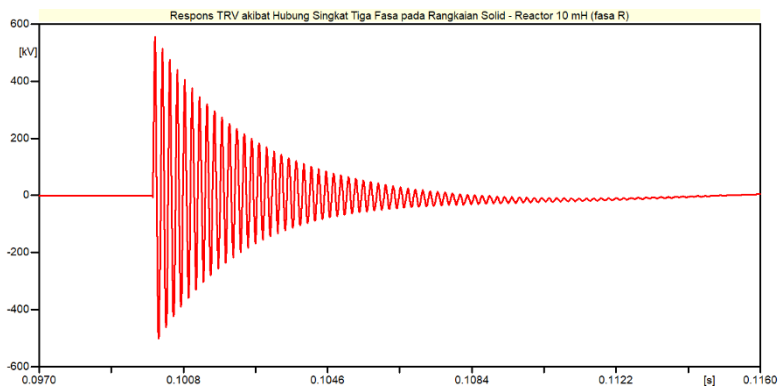
#### 4.6.2 Respons Tegangan Saat Operasi Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah

Pada kondisi ini diberikan gangguan berupa operasi hubung singkat tiga fasa ke tanah pada rangkaian simulasi *transient recovery*

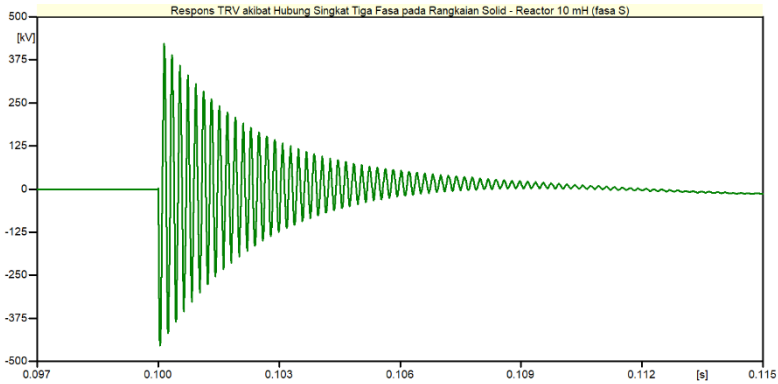
*voltage*. Operasi hubung singkat dilakukan pada fasa R, S, dan T pada detik ke-0,05. Variabel yang diamati pada simulasi ini adalah tegangan pada *circuit breaker* sisi sekunder transformator daya yang meliputi puncak tegangan, waktu tegangan untuk mencapai puncak, serta *rate of rise of recovery voltage*. Respons tegangan ketika dilakukan operasi hubung singkat tiga fasa ke tanah pada rangkaian simulasi *transient recovery voltage* menggunakan transformator daya dengan konfigurasi pentanahan *Solid – Reactor* bernilai 10 mH dapat dilihat pada Gambar 4.26.



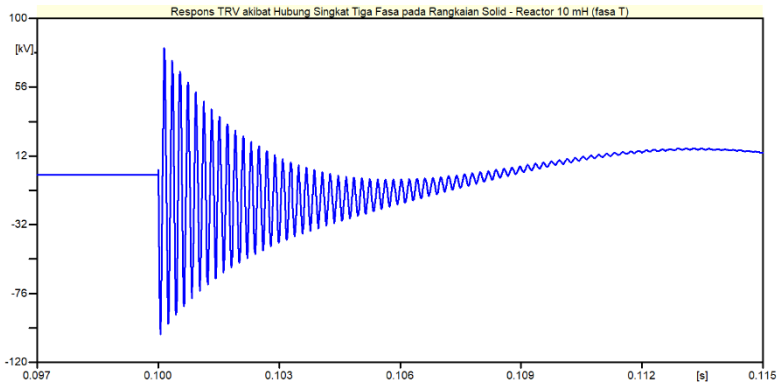
(a)



(b)



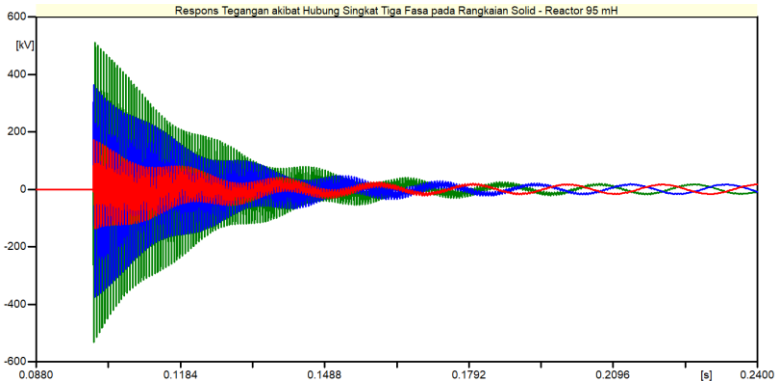
(c)



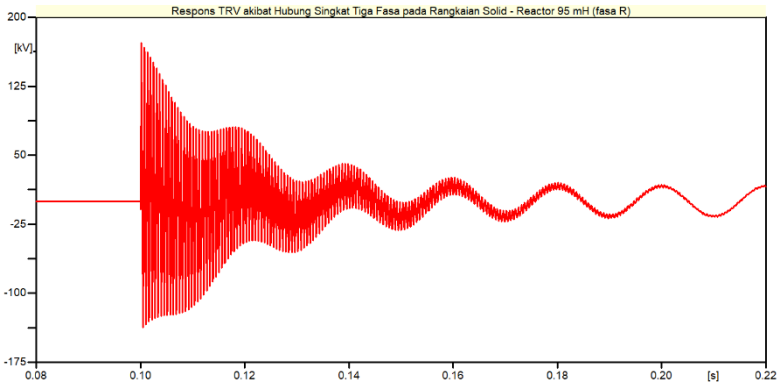
(d)

**Gambar 4.26** Respons Tegangan pada *Circuit Breaker* akibat Hubung Singkat Tiga Fasa pada Rangkaian dengan Konfigurasi Pentanahan *Solid – Reactor* bernilai 10 mH pada (a) Ketiga Fasa; (b) Fasa R; (c) Fasa S; (d) Fasa T

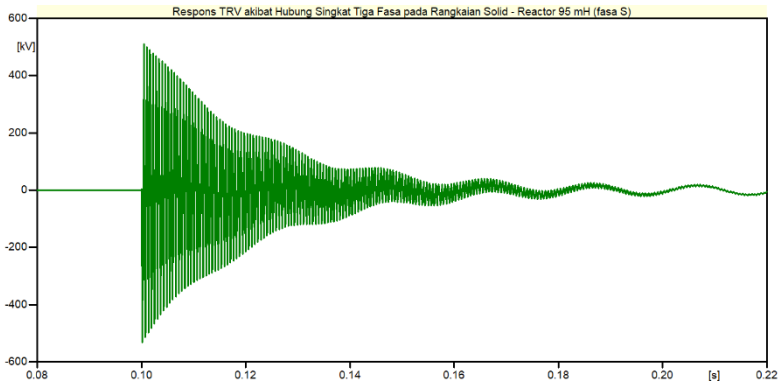
Respons tegangan ketika dilakukan operasi hubung singkat tiga fasa ke tanah pada rangkaian simulasi *transient recovery voltage* menggunakan transformator daya dengan konfigurasi pentanahan *Solid – Reactor* bernilai 95 mH dapat dilihat pada Gambar 4.27.



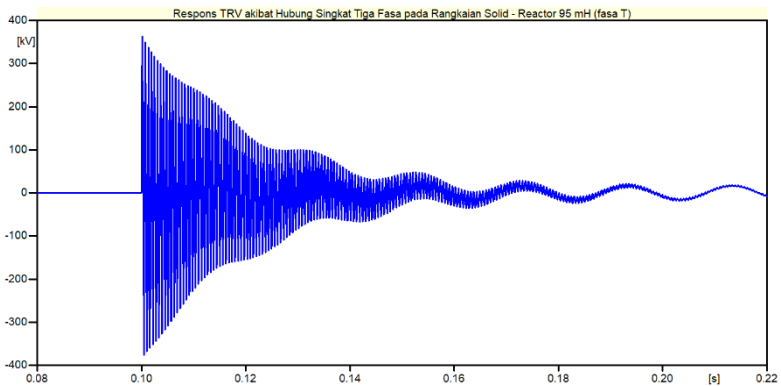
(a)



(b)



(c)



(d)

**Gambar 4.27** Respons Tegangan pada *Circuit Breaker* akibat Hubung Singkat Tiga Fasa pada Rangkaian dengan Konfigurasi Pentanahan *Solid – Reactor* bernilai 95 mH pada (a) Ketiga Fasa; (b) Fasa R; (c) Fasa S; (d) Fasa T

#### 4.6.3 Hasil Pengukuran *Transient Recovery Voltage* dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung *Solid – Reactor* 10 mH

Hasil pengukuran *transient recovery voltage* akibat hubung singkat tiga fasa pada sistem tegangan menengah dengan transformator daya terhubung *Solid – Reactor* 10 mH pada tiap fasanya diperlihatkan pada Tabel 4.7.

**Tabel 4.7** Hasil Pengukuran *TRV* pada Sistem dengan Konfigurasi Pentanahan *Solid – Reactor* 10 mH

Tegangan Puncak (kV)			Waktu untuk Mencapai Puncak Tegangan ( $\mu$ s)			<i>Rate of Rise of Recovery Voltage</i> (kV/ $\mu$ s)		
R	S	T	R	S	T	R	S	T
556,49	454,9	101,94	50,5	50	52,8	16,32	13,66	2,73

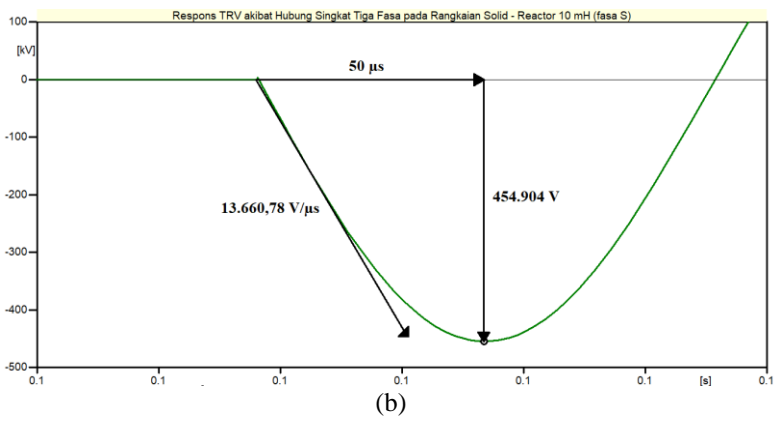
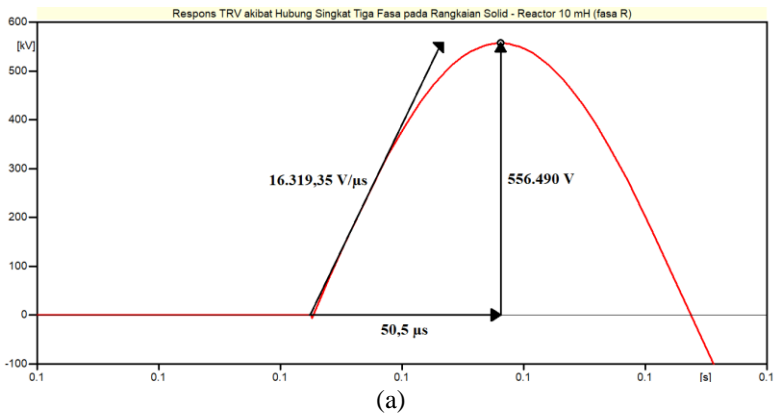
Dapat terlihat bahwa gangguan hubung singkat tiga fasa pada sistem tegangan menengah dengan konfigurasi pentanahan *Solid – Reactor* 10 mH menyebabkan munculnya *transient recovery voltage* pada *circuit breaker* di setiap fasanya.

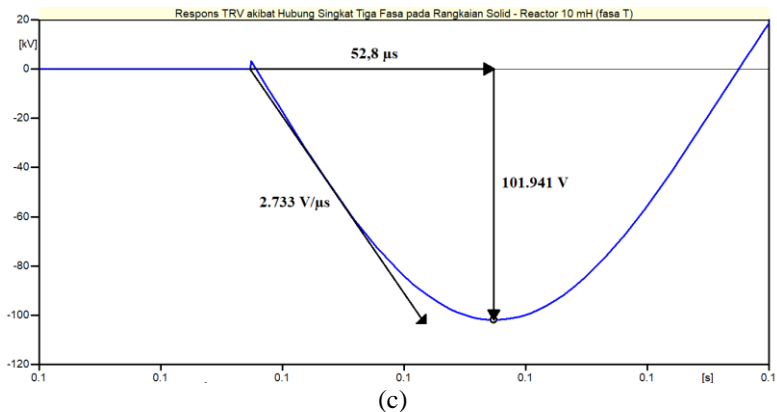
Batas nilai puncak *transient recovery voltage* pada sistem tegangan menengah dengan transformator daya terhubung *Solid – Reactor* 10 mH pada tiap fasa berdasarkan IEEE Std C37.04-1999 adalah:

$$V_{peak} = 1,54 \times 1,5 \times 16.329,93 = 37.722,14 \text{ V} = 37,72 \text{ kV} \quad (3.32)$$

Dari perhitungan di atas, dapat terlihat bahwa sistem tegangan menengah dengan transformator daya terhubung *Solid – Reactor* 10 mH menghasilkan nilai puncak *transient recovery voltage* yang melebihi standar nilai puncak *transient recovery voltage* yang telah ditetapkan, yaitu 37,72 kV pada ketiga fasanya. Sedangkan waktu menuju puncak *transient recovery voltage* yang dihasilkan oleh sistem ini memenuhi standar, yaitu di bawah 52  $\mu$ s untuk fasa R dan S serta melebihi standar yang telah ditetapkan pada fasa T. Sehingga, konfigurasi pentanahan *Solid – Reactor* 10 mH pada transformator daya masih kurang aman untuk digunakan pada sistem ini.

Untuk analisis pengukuran respons tegangan ketika dilakukan operasi hubung singkat tiga fasa ke tanah pada rangkaian simulasi *transient recovery voltage* menggunakan transformator daya dengan konfigurasi pentanahan *Solid – Reactor* 10 mH dapat dilihat pada Gambar 4.28.





**Gambar 4.28** Analisis Pengukuran Respons Tegangan pada *Circuit Breaker* akibat Hubung Singkat Tiga Fasa pada Rangkaian dengan Konfigurasi Pentanahan *Solid – Reactor 10 mH* pada (a) Fasa R; (b) Fasa S; (c) Fasa T

#### 4.6.4 Hasil Pengukuran *Transient Recovery Voltage* dengan Konfigurasi Pentanahan Transformator Daya Terhubung *Solid – Reactor 95 mH*

Hasil pengukuran *transient recovery voltage* akibat hubung singkat tiga fasa pada sistem tegangan menengah dengan transformator daya terhubung *Solid – Reactor 95 mH* pada tiap fasanya diperlihatkan pada Tabel 4.8.

**Tabel 4.8** Hasil Pengukuran *TRV* pada Sistem dengan Konfigurasi Pentanahan *Solid – Reactor 95 mH*

Tegangan Puncak (kV)			Waktu untuk Mencapai Puncak Tegangan ( $\mu\text{s}$ )			<i>Rate of Rise of Recovery Voltage</i> (kV/ $\mu\text{s}$ )		
			R	S	T	R	S	T
556,49	454,9	101,94	50,5	50	52,8	16,32	13,66	2,73

Dapat terlihat bahwa gangguan hubung singkat tiga fasa pada sistem tegangan menengah dengan konfigurasi pentanahan *Solid – Reactor 95 mH* menyebabkan munculnya *transient recovery voltage* pada *circuit breaker* di setiap fasanya.

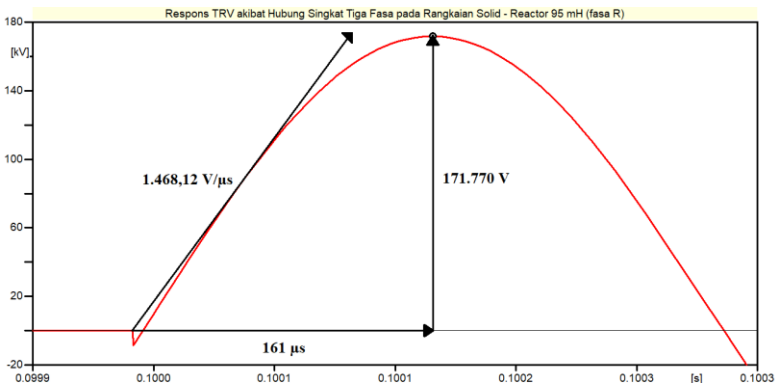


Batas nilai puncak *transient recovery voltage* pada sistem tegangan menengah dengan transformator daya terhubung *Solid – Reactor* 95 mH pada tiap fasa berdasarkan IEEE Std C37.04-1999 adalah:

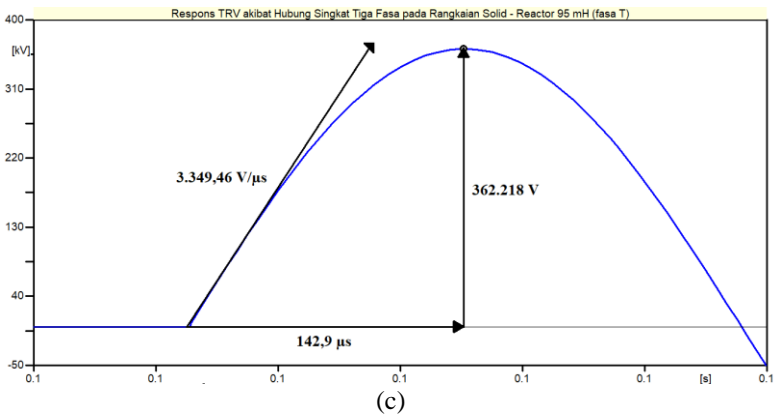
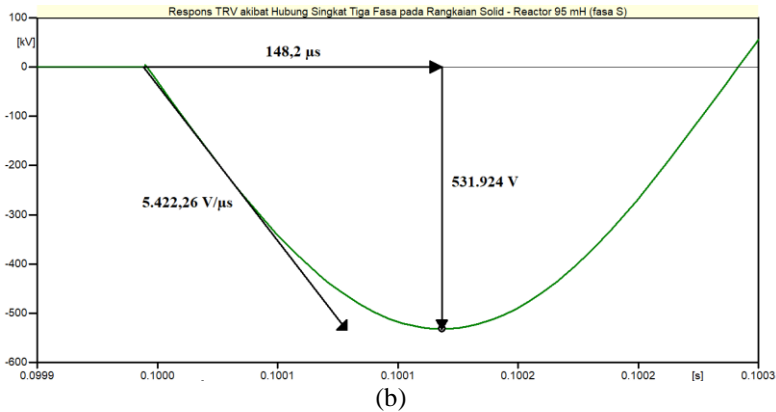
$$V_{peak} = 1,54 \times 1,5 \times 16.329,93 = 37.722,14 \text{ V} = 37,72 \text{ kV} \quad (3.33)$$

Dari perhitungan di atas, dapat terlihat bahwa sistem tegangan menengah dengan transformator daya terhubung *Solid – Reactor* 95 mH menghasilkan nilai puncak *transient recovery voltage* yang melebihi standar nilai puncak *transient recovery voltage* yang telah ditetapkan, yaitu 37,72 kV pada ketiga fasanya. Sedangkan waktu menuju puncak *transient recovery voltage* yang dihasilkan oleh sistem ini memenuhi standar, yaitu di bawah 52  $\mu\text{s}$  untuk fasa R dan S serta melebihi standar yang telah ditetapkan pada fasa T. Sehingga, konfigurasi pentanahan *Solid – Reactor* 95 mH pada transformator daya masih kurang aman untuk digunakan pada sistem ini.

Untuk analisis pengukuran respons tegangan ketika dilakukan operasi hubung singkat tiga fasa ke tanah pada rangkaian simulasi *transient recovery voltage* menggunakan transformator daya dengan konfigurasi pentanahan *Solid – Reactor* 95 mH dapat dilihat pada Gambar 4.29.



(a)

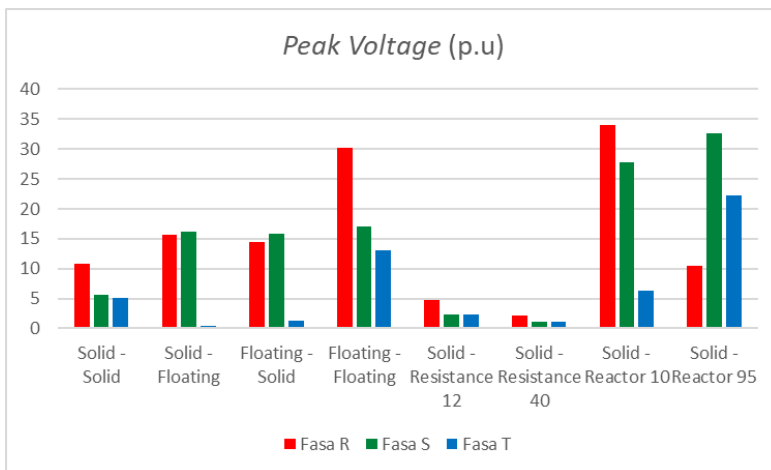


**Gambar 4.29** Analisis Pengukuran Respons Tegangan pada *Circuit Breaker* akibat Hubung Singkat Tiga Fasa pada Rangkaian dengan Konfigurasi Pentanahan *Solid* – *Reactor* 95 mH pada (a) Fasa R; (b) Fasa S; (c) Fasa T

#### 4.7 Analisis *Transient Recovery Voltage* pada *Circuit Breaker* Tegangan Menengah berdasarkan Hasil Simulasi

Hasil pengukuran *transient recovery voltage* pada simulasi yang telah dilakukan memiliki nilai yang berbeda-beda di setiap perbedaan konfigurasi pentanahan pada transformator daya ketika diberikan operasi hubung singkat tiga fasa ke tanah. Gambar 4.30 dan Tabel 4.9 merupakan

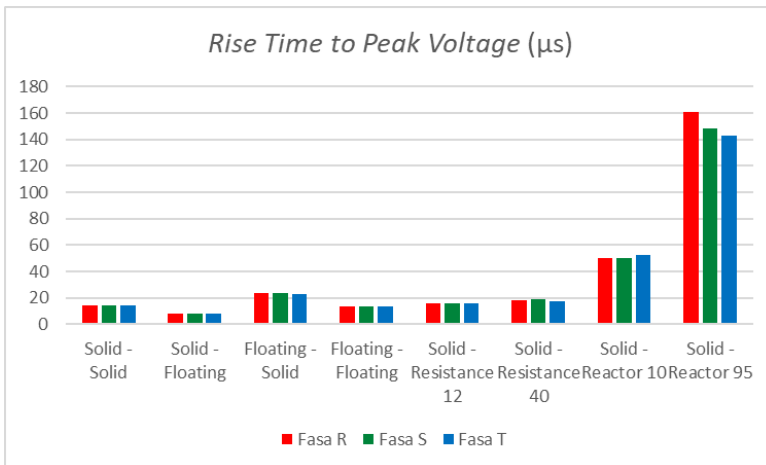
grafik dan tabel yang menunjukkan nilai tegangan puncak dari berbagai macam konfigurasi pentanahan pada tiap fasanya. Tegangan puncak tersebut dalam satuan per unit yang dibandingkan dengan tegangan normalnya. Berdasarkan grafik dan tabel tersebut, terlihat tegangan puncak terbesar terjadi ketika transformator daya dengan konfigurasi pentanahan *Solid – Reactor* 10 mH, tepatnya pada fasa R. Kemudian untuk grafik dan tabel yang menunjukkan lamanya waktu yang dibutuhkan untuk mencapai puncak tegangan dari berbagai macam konfigurasi pentanahan pada tiap fasanya diperlihatkan pada Gambar 4.31 dan Tabel 4.10. Berdasarkan grafik dan tabel tersebut, terlihat bahwa waktu untuk menuju puncak tegangan terlama terjadi ketika transformator daya dengan konfigurasi pentanahan *Solid – Reactor* 95 mH. Dan yang terakhir, untuk grafik dan tabel yang menunjukkan besarnya nilai *rate of rise of recovery voltage (rrrv)* dari berbagai macam konfigurasi pentanahan pada tiap fasanya diperlihatkan pada Gambar 4.32 dan Tabel 4.11. Berdasarkan grafik dan tabel tersebut, terlihat bahwa nilai *rrrv* terbesar terjadi ketika transformator daya dengan konfigurasi pentanahan *Floating - Floating*.



**Gambar 4.30** Nilai Tegangan Puncak dalam Satuan Per Unit pada Berbagai Konfigurasi Pentanahan

**Tabel 4.9** Nilai Tegangan Puncak dalam Satuan Per Unit pada Berbagai Konfigurasi Pentanahan

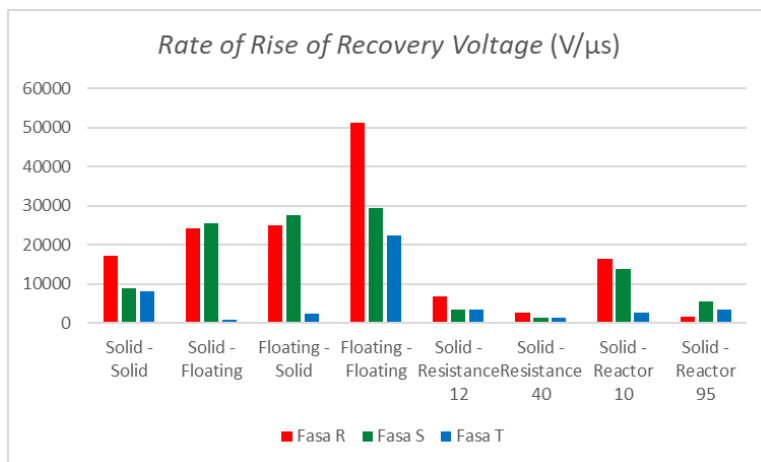
Konfigurasi Pentanahan	Tegangan Puncak (p.u)		
	Fasa R	Fasa S	Fasa T
<i>Solid - Solid</i>	10,74	5,6	5,13
<i>Solid - Floating</i>	15,7	16,19	0,49
<i>Floating - Solid</i>	14,53	15,82	1,29
<i>Floating - Floating</i>	30,16	17,05	13,11
<i>Solid - Resistance 12 Ω</i>	4,75	2,41	2,33
<i>Solid - Resistance 40 Ω</i>	2,2	1,12	1,1
<i>Solid - Reactor 10 mH</i>	34,08	27,86	6,24
<i>Solid - Reactor 95 mH</i>	10,52	32,57	22,18



**Gambar 4.31** Waktu yang Dibutuhkan untuk Mencapai Puncak Tegangan pada Berbagai Konfigurasi Pentanahan

**Tabel 4.10** Waktu yang Dibutuhkan untuk Mencapai Puncak Tegangan pada Berbagai Konfigurasi Pentanahan

Konfigurasi Pentanahan	Waktu Menuju Puncak ( $\mu$ s)		
	Fasa R	Fasa S	Fasa T
<i>Solid - Solid</i>	14,7	14,7	14,7
<i>Solid - Floating</i>	8,5	8,5	8,2
<i>Floating - Solid</i>	23,8	23,7	22,8
<i>Floating - Floating</i>	13,8	13,7	13,8
<i>Solid - Resistance 12 <math>\Omega</math></i>	15,7	15,8	15,6
<i>Solid - Resistance 40 <math>\Omega</math></i>	18,4	19	17,7
<i>Solid - Reactor 10 mH</i>	50,5	50	52,8
<i>Solid - Reactor 95 mH</i>	161	148,2	142,9



**Gambar 4.32** Nilai *Rate of Rise of Recovery Voltage* pada Berbagai Konfigurasi Pentanahan

**Tabel 4.11** Nilai *Rate of Rise of Recovery Voltage* pada Berbagai Konfigurasi Pentanahan

Konfigurasi Pentanahan	RRRV (V/ $\mu$ s)		
	Fasa R	Fasa S	Fasa T
<i>Solid - Solid</i>	17.023,98	8.884,35	8.061,36
<i>Solid - Floating</i>	24.273,11	25.444,16	808,49
<i>Floating - Solid</i>	24.914,60	27.455,28	2.356,03
<i>Floating - Floating</i>	51.306,88	29.315,89	22.297,50
<i>Solid - Resistance 12 <math>\Omega</math></i>	6.740,47	3.368,26	3.376,66
<i>Solid - Resistance 40 <math>\Omega</math></i>	2.570,37	1.216,75	1.412,54
<i>Solid - Reactor 10 mH</i>	16.319,35	13.660,78	2.733,00
<i>Solid - Reactor 95 mH</i>	1.468,12	5.422,26	3.349,46

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berikut adalah kesimpulan berdasarkan hasil simulasi dan analisis mengenai pengaruh jenis pentanahan transformator daya tegangan tinggi terhadap *transient recovery voltage* akibat *switching* beban induktif :

- a. Sistem dengan transformator daya berkonfigurasi pentanahan *Solid – Reactor* bernilai 10 mH menghasilkan nilai tegangan puncak paling besar dengan nilai mencapai 34,08 p.u. pada fasa R.
- b. Sistem dengan transformator daya berkonfigurasi pentanahan *Solid – Reactor* bernilai 95 mH menghasilkan waktu untuk mencapai puncak tegangan paling lama dengan waktu mencapai 161  $\mu\text{s}$  pada fasa R; 148,2  $\mu\text{s}$  pada fasa S; dan 142,9  $\mu\text{s}$  pada fasa T.
- c. Sistem dengan transformator daya berkonfigurasi pentanahan *Floating - Floating* menghasilkan nilai *rate of rise of recovery voltage (rrrv)* paling besar dengan nilai mencapai 51,31 kV/ $\mu\text{s}$  pada fasa R; 29,32 kV/ $\mu\text{s}$  pada fasa S; dan 22,23 kV/ $\mu\text{s}$  pada fasa T.
- d. Sistem dengan transformator daya berkonfigurasi pentanahan *Solid – Resistance* bernilai 40  $\Omega$  menghasilkan *transient recovery voltage* yang sesuai dengan standar IEEE Std C37.04-1999.
- e. Sistem dengan transformator daya berkonfigurasi pentanahan *Solid – Resistance* bernilai 500  $\Omega$  tidak menghasilkan *transient recovery voltage*. Sehingga, semakin besar nilai resistansi pada konfigurasi sistem pentanahan *Solid – Resistance*, maka semakin meredam keberadaan *transient recovery voltage*.
- f. Konfigurasi sistem pentanahan pada transformator daya 150/20 kV paling efektif untuk bertahan dari keberadaan *transient recovery voltage* pada *circuit breaker* 20 kV adalah konfigurasi sistem pentanahan *Solid – Resistance* dengan nilai resistansi  $\geq 40 \Omega$ .

#### **5.2 Saran**

Saran yang dapat diberikan dari studi ini untuk di masa yang akan datang adalah melakukan studi atau simulasi terkait dengan pengaruh besarnya nilai resistansi pada sistem pentanahan terhadap nilai *transient*

*recovery voltage* yang dihasilkan serta studi atau simulasi terkait besarnya nilai resistansi pada sistem pentanahan yang paling efektif untuk peredaman *transient recovery voltage* yang terjadi pada *circuit breaker*. Studi ini merupakan tahap awal identifikasi munculnya *transient recovery voltage* pada sistem tenaga listrik yang dapat dikembangkan lebih lanjut dan dijadikan acuan sebagai pengambilan kebijakan terhadap perancangan komponen-komponen yang dapat meredam *transient recovery voltage*.



## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Zuhal, "Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya", Penerbit PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 2000.
- [2] Berahim, Hamzah, "Teknik Tenaga Listrik Dasar", Graha Ilmu, Yogyakarta, 2011.
- [3] Tobing, Bonggas L., "Peralatan Tegangan Tinggi", Penerbit Erlangga, Jakarta, 2012.
- [4] Electropedia, "*International Electrotechnical Vocabulary (IEV)*" <URL:<http://www.electropedia.org/...441-14-20>>, Juli, 2000.
- [5] Dokumen PT PLN (Persero), "Buku Pedoman Pemeliharaan Pemutus Tenaga (PMT)", Jakarta, 2014.
- [6] Alexander, R.W. dan Dufournet, D., "*Transient Recovery Voltage (TRV) for High-Voltage Circuit Breakers*", IEEE Tutorial, Oktober, 2008.
- [7] Swindler, D.L.; Schwartz, P.; Hamer, P.S.; Lambert, S.R., "*Transient Recovery Voltage Considerations in The Application of Medium-Voltage Circuit Breakers*", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.33, No.2, pp.383-388, Maret/April, 1997.
- [8] PSCAD Guide, "*Transient Recovery Voltage (TRV) Study*", Manitoba HVDC Research Centre.
- [9] Greenwood, A., "*Electrical Transients in Power Systems*", New York: Wiley, 1991.
- [10] "*IEEE standard rating structure for AC high-voltage circuit breakers*", IEEE Std C37.04-1999, 1999.
- [11] "*American National Standard AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis - Preferred Ratings and Related Required Capabilities*", ANSI C37.06-2000, pp.0\_1-A\_6, 2000.
- [12] Supriyadi, Ali, "Hubungan pada Transformator Tiga Fasa", Swara Patra, Vol.07, No.1, pp.45-52, Desember, 2017.
- [13] Moses, Paul S., Masoum, Mohammad A. S., Toliyat, Hamid A., "*Impact of Hysteresis and Magnetic Couplings on the Stability Domain of Feroresonansi in Asymmetric Three-Phase Three-Leg Transformer*", IEEE, USA, 2011.
- [14] Hutauruk, T.S., "Pengetanahan Netral Sistem Tenaga & Pengetanahan Peralatan", Erlangga, Jakarta, 1999.

- [15] Aslimeri; Ganefri; Hamdi, Zaenal, "Teknik Transmisi Tenaga Listrik", Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Jakarta, 2008.
- [16] Suswanto, Daman, "Sistem Distribusi Tenaga Listrik", Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang, 2009.

## BIOGRAFI PENULIS



Penulis bernama lengkap Fachrul Dwi Cahyo Utomo, lahir di Surakarta pada tanggal 6 Juni 1997. Penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Penulis memiliki beberapa hobi untuk mengisi waktu luangnya, seperti membaca buku, menonton film, mendengarkan musik, bermain gim, serta berolahraga. Selama berkuliah, penulis aktif dalam kegiatan organisasi yaitu sebagai Sekretaris Departemen pada Departemen Manajemen Sumber Daya Mahasiswa HIMATEKTRO ITS 2017/2018, sebagai Staf pada Departemen Manajemen Sumber Daya Mahasiswa HIMATEKTRO ITS periode

2016/2017 serta menjadi Koordinator *Counselling and Organizing Committee* pada Tim Unit Kaderisasi HIMATEKTRO ITS periode 2016/2017. Saat ini penulis sedang menempuh pendidikan sarjana teknik elektro di Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Pendidikan formal yang telah ditempuh penulis yaitu:

1. SDN Cengklik I Surakarta
2. SMP Negeri 7 Surakarta
3. SMA Negeri 1 Surakarta

Penulis dapat dihubungi melalui surel :  
[fachruldwicahyoutomo@gmail.com](mailto:fachruldwicahyoutomo@gmail.com)