



**TUGAS AKHIR - EE 184801**

**STUDI KOORDINASI PROTEKSI DENGAN  
MEMPERTIMBANGKAN ARC FLASH PADA  
PT. INDONESIA POWER UP SURALAYA UNIT 5**

Nur Fauziyah  
NRP 07111745000040

Dosen Pembimbing  
Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.  
Vita Lystianingrum B.P., ST., M.Sc., Ph.D.

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO**  
**Fakultas Teknologi Elektro**  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**  
**Surabaya 2019**



**FINAL PROJECT - EE 184801**

**STUDY OF PROTECTION COORDINATION WITH  
CONSIDERING ARC FLASH IN PT. INDONESIA POWER  
UP SURALAYA UNIT 5**

Nur Fauziyah  
NRP 07111745000040

*Advisor*  
Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.  
Vita Lystianingrum B.P., ST., M.Sc., Ph.D.

*ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTEMENT*  
*Faculty of Electrical Technology*  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019

## **PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR**

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul "**Studi Koordinasi dengan Mempertimbangkan Arc Flash pada PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5**" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan 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 pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juni 2019



Nur Fauziyah

Nrp. 0711174500040

**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember  
**STUDI KOORDINASI PROTEKSI DENGAN  
MEMPERTIMBANGKAN ARC FLASH PADA  
PT. INDONESIA POWER UP SURALAYA UNIT 5**

**ITS**

Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR**



Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada

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



Institut  
Teknologi  
Sepuluh  
Nopember

**Menyetujui:**

**Dosen Pembimbing I**



**Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.**  
NIP. 196603181990101001

**Dosen Pembimbing II**

 4/7/19



**Vita Lystianingrum B.P., ST., M.Sc., Ph.D.**

NIP. 198208292006042001



Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember



Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

# **STUDI KOORDINASI PROTEKSI DENGAN MEMPERTIMBANGKAN ARC FLASH PADA PT. INDONESIA POWER UP SURALAYA UNIT 5**

Nama : Nur Fauziyah

Pembimbing I : Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.

Pembimbing II : Vita Lystianingrum B.P., ST., M.Sc., Ph.D.

## **ABSTRAK**

PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5 merupakan salah satu pembangkit terbesar dengan kapasitas 1x600 MW yang berbahan bakar batubara. Dimana pada sistem kelistrikannya belum pernah dilakukan review mengenai koordinasi proteksi. Koordinasi proteksi memiliki peran yang sangat penting untuk menjaga kontinuitas dan meningkatkan keandalan sistem. Oleh karena itu dibutuhkan koordinasi proteksi yang tepat serta mempertimbangkan *arc flash* untuk mencegah kerusakan peralatan akibat gangguan dan meminimalisir bahaya energi *arc flash* bagi para pekerja.

Pada Tugas Akhir ini dilakukan studi koordinasi proteksi pada PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5. Hal yang akan dilakukan adalah menentukan *setting* koordinasi *Over Current Relay* dan *Ground Fault Relay* yang tepat dan menganalisa besarnya insiden energi *arc flash* yang terjadi pada setiap bus untuk menentukan batas keamanan bagi para pekerja berdasarkan standar IEEE 1584-2002. Serta menentukan alat pelindung diri yang digunakan sesuai kategori insiden energi *arc flash* berdasarkan standar NFPA 70E-2015.

Hasil dari Tugas Akhir ini adalah setelah dilakukan *resetting* terdapat penurunan insiden energi *arc flash* pada bus 10,5 kV SWGR-5A, 10,5 kV SWGR-5B, 3,3 kV SWGR-5A dan 10,5 kV SWGR-5B yang semula 21,814 cal/cm<sup>2</sup>, 21,843 cal/cm<sup>2</sup>, 14,076 cal/cm<sup>2</sup> dan 13,939 cal/cm<sup>2</sup> menjadi 16,906 cal/cm<sup>2</sup>, 16,906 cal/cm<sup>2</sup>, 13,387 cal/cm<sup>2</sup> dan 13,517 cal/cm<sup>2</sup>. Hal ini dikarenakan nilai FCT lebih kecil setelah dilakukan koordinasi proteksi dengan tepat. Nilai FCT saat *existing* 0,55 dan 0,65 detik setelah di *resetting* menjadi 0,4 dan 0,6 detik.

**Kata kunci:** *Arc Flash, Incident Energy, Fault Clearing Time, Standar IEEE 1584-2002, NFPA 70E-2015*

*Halaman Ini sengaja Dikosongkan*

# **STUDY OF PROTECTION COORDINATION WITH CONSIDERING ARC FLASH IN PT. INDONESIA POWER UP SURALAYA UNIT 5**

Name of student : Nur Fauziyah

Advisor I : Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.

Advisor II : Vita Lystianingrum B.P., ST., M.Sc., Ph.D.

## **ABSTRACT**

*PT. Indonesia Power Up Suralaya Unit 5 is one of the largest Coal Power Plant in Indonesia which is has capacity 1 x 600 MW a day. But unfortunately the electrical systems never been reviewed, especially for Protection Coordination. Protection Coordination has very important role to maintain continuity and improve the ability of the electrical systems. Therefore, it is needed appropriate Protection Coordination with considering Arc Flash to protect equipment from any disturbances and minimize the danger of Arc Flash energy that impact to the workers.*

*In this Final Project carried out Study of Protection Coordination in PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5. The main task is to determine the appropriate coordination setting for Over Current Relay and Ground Fault Relay and analyze the magnitude of arc flash energy incidents that occurs on each bus to determine safety limits for workers based on IEEE 1584-2002 standard. And determining the personal protective equipment used in accordance with the arc flash energy categories based on NFPA 70E-2015 standard.*

*The result of this final project is decreased magnitude of arc flash energy incidents after resetting on buses 10,5 kV SWGR-5A, 10,5 kV SWGR-5B, 3,3 kV SWGR-5A and 10,5 kV SWGR-5B from 21,814 cal/cm<sup>2</sup>, 21,843 cal/cm<sup>2</sup>, 14,076 cal/cm<sup>2</sup> dan 13,939 cal/cm<sup>2</sup> become 16,906 cal/cm<sup>2</sup>, 16,906 cal/cm<sup>2</sup>, 13,387 cal/cm<sup>2</sup> and 13,517 cal/cm<sup>2</sup>. This is because the value of FCT become smaller after Protection Coordination carried out. The value of FCT from 0,55 and 0,65 seconds become 0,4 and 0,6 seconds after resetting.*

**Keywords:** Arc Flash, Incident Energy, Fault Clearing Time, Standar IEEE 1584-2002, NFPA 70E-2015

*Halaman Ini sengaja Dikosongkan*

## **KATA PENGANTAR**

Segala puji bagi Allah yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul:

### **“Studi Koordinasi Proteksi Dengan Mempertimbangkan Arc Flash Pada PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5”**

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan menyelesaikan studi di Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Program Studi S1 Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Dalam penyusunan laporan Tugas Akhir ini, penulis banyak mendapatkan bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan banyak terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang memberikan anugerah kesehatan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Dr. Ir. Margo Pujiyantara, M.T. dan ibu Vita Lystianingrum B.P., ST., M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang telah memberi masukan sehingga laporan ini dapat terselesaikan dengan tepat waktu.
3. Kedua orang tua penulis atas doa, semangat, kasih sayang, dan kepercayaan yang diberikan selama ini, serta dukungan baik moril maupun materiil.
4. Bapak Hamdan selaku perwakilan dari PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5 yang telah membantu dalam menyelesaikan laporan tugas akhir ini.
5. Teman-teman LJ Teknik Elektro 2017 yang telah memberikan masukan untuk menunjang laporan Tugas Akhir ini.

Besar harapan bagi penulis agar Tugas Akhir ini dapat menambah ilmu dan wawasan bagi para pembaca. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran demi penyempurnaan laporan Tugas Akhir ini.

Surabaya, Juni 2019

Penulis

*Halaman Ini sengaja Dikosongkan*

## DAFTAR ISI

JUDUL .....	i
PENGESAHAN .....	iii
ABSTRAK .....	v
ABSTRACT .....	vii
KATA PENGANTAR .....	ix
DAFTAR ISI .....	xi
DAFTAR GAMBAR .....	xv
DAFTAR TABEL .....	xvii

### BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	1
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan .....	2
1.5 Metodologi .....	3
1.6 Sistematika Pemulisan .....	4
1.7 Relevansi .....	4

### BAB II KOORDINASI PROTEKSI DAN FENOMENA ARC FLASH PADA SISTEM TENAGA LISTRIK

2.1 Gangguan Pada Sistem Tenaga Listrik .....	5
2.1.1 Gangguan Hubung Singkat .....	6
2.1.1.1 Gangguan Hubung Singkat Simetri .....	7
2.1.1.2 Gangguan Hubung Singkat Asimetri .....	8
2.2 Sistem Pengamanan Tenaga Listrik .....	11
2.2.1 Rele Arus Lebih ( <i>Over Current Relay</i> ) .....	13
2.2.1.1 Rele Arus lebih Waktu Terbalik ( <i>Inverse</i> ) .....	14
2.2.1.2 Rele Arus Lebih Waktu Tertentu ( <i>Definite</i> ) .....	16
2.2.1.3 Rele Arus Lebih Waktu Seketika ( <i>Instantaneous</i> ) .....	16
2.2.2 Rele Gangguan Ke Tanah ( <i>Ground Fault Relay</i> ) .....	18
2.3 Busur Api .....	20
2.3.1 Perhitungan Insiden Energi Arc Flash Berdasarkan IEEE 1584-2002 .....	21

2.3.2 Jarak Aman Perlindunga ( <i>Flash Protection Boundary</i> ) .....	23
2.4 Pengelompokan Kategori Energi Busur Api Dengan Perlengkapan Keselamatan Diri Sesuai Standar NFPA 70E-2015 .....	24

### **BAB III SISTEM KELISTRIKAN PT INDONESIA POWER UP SURALAYA UNIT 5**

3.1 Sistem Kelistrikan PT Indonesia Power UP Suralaya Unit 5 .....	27
3.2 Kapasitas Pembangkit PT Indonesia Power UP Suralaya Unit 5 .....	28
3.3 Data Beban Pembangkit PT Indonesia Power UP Suralaya Unit 5 .....	29

### **BAB IV HASIL SIMULASI DAN ANALISA KOORDINASI PROTEKSI DAN BUSUR API PT. INDONESIA POWER UP SURALAYA UNIT 5**

4.1 Pemodelan Sistem Kelistrikan PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5 .....	31
4.2 Sistem Kelistrikan PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5 .....	31
4.3 Analisa Gangguan Arus Hubung Singkat .....	32
4.3.1 Analisa Hubung Singkat Maksimum.....	32
4.3.2 Analisa Hubung Singkat Minimum .....	33
4.4 Koordinasi Proteksi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa..	34
4.4.1 Koordinasi Rele Gangguan Fasa Tipikal 1 .....	35
4.4.2 Koordinasi Rele Gangguan Fasa Tipikal 2 .....	47
4.4.3 Koordinasi Rele Gangguan Fasa Tipikal 3 .....	56
4.5 Koordinasi Rele Gangguan Ke Tanah .....	65
4.5.1 Koordinasi Rele Gangguan Ke Tanah Tipikal 1	66
4.5.1 Koordinasi Rele Gangguan Ke Tanah Tipikal 1	74
4.6 Perhitungan Energi Busur Api Dengan Standar IEEE 1584-2002 .....	80
4.6.1 Perhitungan Energi Busur Api Kondisi <i>Existing</i> .....	80
4.6.2 Perhitungan Energi Busur Api Kondisi <i>Resetting</i> .....	93

4.7	Perhitungan Energi Busur Api Kondisi <i>Existing</i> dengan <i>Resetting</i> .....	106
4.8	Perhitungan <i>Flash Protection Boundary</i> (FPB) .....	110
4.8.1	Perhitungan <i>Flash Protection Boundary</i> Kondisi <i>Existing</i> .....	110
4.8.2	Perhitungan <i>Flash Protection Boundary</i> Kondisi <i>Resetting</i> .....	114
4.9	Perbandingan <i>Flash Protection Boundary</i> Kondisi <i>Existing</i> Dengan Kondisi <i>Existing</i> .....	119
4.10	<i>Personal Protective Equipment</i> (PPE) Yang Harus Digunakan .....	120
<b>BAB V PENUTUP</b>		
5.1	Kesimpulan .....	123
5.2	Saran .....	124
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....		125
<b>LAMPIRAN 1: Data Sheet Rele Basler Electric BE1-1051</b> .....		A-1
<b>LAMPIRAN 2: Data Sheet Rele GE Multilin 269 Plus</b> .....		B-1
<b>LAMPIRAN 3: Data Sheet Rele Alstom P645</b> .....		C-1
<b>BIODATA PENULIS</b> .....		D-1

*Halaman Ini sengaja Dikosongkan*

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa .....	7
<b>Gambar 2.2</b>	(a) Komponen Urutan Positif; (b) Komponen Urutan Negatif; (c) Komponen Urutan Nol .....	8
<b>Gambar 2.3</b>	Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa Ke Tanah ..	9
<b>Gambar 2.4</b>	Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa .....	10
<b>Gambar 2.5</b>	Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa Ke Tanah ..	10
<b>Gambar 2.6</b>	Skema Konsep Kerja Rele .....	12
<b>Gambar 2.7</b>	Karakteristik <i>Standard Inverse, Very Inverse, Extremely Inverse</i> .....	14
<b>Gambar 2.8</b>	Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Tertentu ..	16
<b>Gambar 2.9</b>	Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Seketika ..	17
<b>Gambar 2.10</b>	Rele Arus Lebih Pengaman Transformator .....	18
<b>Gambar 2.11</b>	Aliran Arus Rele Differensial Kondisi Normal ..	19
<b>Gambar 2.12</b>	Perbedaan <i>Arc Fault</i> dengan <i>Bolted Fault</i> .....	20
<b>Gambar 2.13</b>	Klasifikasi Alat Perlindungan Untuk Tiap Kategori .....	26
<b>Gambar 3.1</b>	<i>Single Line Diagram</i> Kelistrikan PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5 .....	27
<b>Gambar 4.1</b>	Single Line Diagram Tipikal 1 .....	37
<b>Gambar 4.2</b>	<i>Plot Existing</i> Rele Gangguan Fasa Tipikal 1 .....	38
<b>Gambar 4.3</b>	<i>Plot Restting</i> Rele Gangguan Fasa Tipikal 1 .....	46
<b>Gambar 4.4</b>	Single Line Diagram Tipikal 2 .....	49
<b>Gambar 4.5</b>	<i>Plot Existing</i> Rele Gangguan Fasa Tipikal 2 .....	50
<b>Gambar 4.6</b>	<i>Plot Resetting</i> Rele Gangguan Fasa Tipikal 2 .....	55
<b>Gambar 4.7</b>	Single Line Diagram Tipikal 3 .....	58
<b>Gambar 4.8</b>	<i>Plot Existing</i> Rele Gangguan Fasa Tipikal 3 .....	59
<b>Gambar 4.9</b>	<i>Plot Restting</i> Rele Gangguan Fasa Tipikal 3 .....	54
<b>Gambar 4.10</b>	Single Line Diagram Tipikal 1 .....	67
<b>Gambar 4.11</b>	<i>Plot Existing</i> Rele Gangguan Fasa ke Tanah Tipikal 1 .....	68
<b>Gambar 4.12</b>	<i>Plot Restting</i> Rele Gangguan Fasa ke Tanah Tipikal 1 .....	73
<b>Gambar 4.13</b>	Single Line Diagram Tipikal 2 .....	75
<b>Gambar 4.14</b>	<i>Plot Existing</i> Rele Gangguan Fasa ke Tanah Tipikal 2 .....	76
<b>Gambar 4.15</b>	<i>Plot Restting</i> Rele Gangguan Fasa ke Tanah Tipikal 2 .....	79

*Halaman Ini Sengaja Dikosongkan*

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b>	Koefisien Kurva Rele .....	16
<b>Tabel 2.2</b>	Parameter Untuk Peralatan dan Level Tegangan .....	23
<b>Tabel 2.3</b>	Kelas Peralatan dan Tipikal Jarak Pekerja .....	23
<b>Tabel 2.4</b>	Kategori PPE Berdasarkan Standar NFPA 70E-2015	23
<b>Tabel 3.1</b>	Data Kapasitas Pembangkit dan Transformator pada PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5 .....	28
<b>Tabel 3.2</b>	Data Beban Motor PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5 .....	29
<b>Tabel 3.3</b>	Data Beban <i>Lump Load</i> pada PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5 .....	30
<b>Tabel 4.1</b>	Data Hubung Singkat Maksimum 4 <i>Cycle</i> .....	33
<b>Tabel 4.2</b>	Data Hubung Singkat Maksimum 30 <i>Cycle</i> .....	34
<b>Tabel 4.3</b>	Data <i>Existing</i> Rele Tipikal 1 .....	35
<b>Tabel 4.4</b>	Data <i>Setting</i> Rele Motor RPLV04D .....	39
<b>Tabel 4.5</b>	Data <i>Setting</i> Rele RTIE01 .....	40
<b>Tabel 4.6</b>	Data <i>Setting</i> Rele RXUST03B .....	41
<b>Tabel 4.7</b>	Data <i>Setting</i> Rele RXUST03A .....	43
<b>Tabel 4.8</b>	Data <i>Setting</i> Rele RXUST01 .....	44
<b>Tabel 4.9</b>	Data <i>Existing</i> Rele Tipikal 2 .....	48
<b>Tabel 4.10</b>	Data <i>Setting</i> Rele LTIE01 .....	51
<b>Tabel 4.11</b>	Data <i>Setting</i> Rele RBLR01.....	52
<b>Tabel 4.12</b>	Data <i>Setting</i> Rele RBLR01.....	53
<b>Tabel 4.13</b>	Data <i>Existing</i> Rele Tipikal 3 .....	56
<b>Tabel 4.14</b>	Data <i>Setting</i> Rele Motor RCEP01 .....	60
<b>Tabel 4.15</b>	Data <i>Setting</i> Rele RXSST01B .....	61
<b>Tabel 4.16</b>	Data <i>Setting</i> Rele RXSST01A.....	62
<b>Tabel 4.17</b>	Tegangan dan Pentanahan Peralatan .....	65
<b>Tabel 4.18</b>	Data <i>Existing</i> Rele <i>Ground</i> Tipikal 1 .....	66
<b>Tabel 4.19</b>	Data <i>Setting</i> Rele Motor RPLV04D .....	69
<b>Tabel 4.20</b>	Data <i>Setting</i> Rele RTIE01 .....	69
<b>Tabel 4.21</b>	Data <i>Setting</i> Rele RXUST03B .....	70
<b>Tabel 4.22</b>	Data <i>Setting</i> Rele RXUST03A .....	71
<b>Tabel 4.23</b>	Data <i>Setting</i> Rele RXUST01 .....	71
<b>Tabel 4.24</b>	Data <i>Existing</i> Rele <i>Ground</i> Tipikal 2 .....	74
<b>Tabel 4.25</b>	Data <i>Setting</i> Rele Motor RCEP01 .....	77
<b>Tabel 4.26</b>	Data <i>Setting</i> Rele RXSST01B .....	77
<b>Tabel 4.27</b>	Data <i>Setting</i> Rele RXSST01A.....	78

<b>Tabel 4.28</b>	Data Hasil Simulasi Energi Busur api Kondisi <i>Existing</i> .....	80
<b>Tabel 4.29</b>	Data Hasil Perbandingan Perhitungan Manual dengan Simulasi Energi Busur api Kondisi <i>Existing</i> ..	93
<b>Tabel 4.30</b>	Data Hasil Simulasi Energi Busur api Kondisi <i>Resetting</i> .....	94
<b>Tabel 4.31</b>	Data Hasil Perbandingan Perhitungan Manual dengan Simulasi Energi Busur api Kondisi <i>Resetting</i> 106	
<b>Tabel 4.32</b>	Perbandingan Besar Energi Busur api Kondisi <i>Existing</i> Dengan Kondisi <i>Resetting</i> .....	107
<b>Tabel 4.33</b>	Data Perbandingan FPB Kondisi <i>Existing</i> dan <i>Resetting</i> .....	119
<b>Tabel 4.34</b>	Jenis PPE Berdasarkan Kategori Busur Api Kondisi <i>Resetting</i> .....	120

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5 merupakan salah satu pembangkit terbesar dengan kapasitas 1x600 MW net yang berbahan bakar batu bara. Dengan kapasitas yang besar, maka pembangkit ini dibutuhkan keandalan dan kontinuitas yang sangat tinggi agar tidak mengakibatkan kerugian bagi pembangkit. Pada suatu sistem tenaga listrik yang baik sekalipun, gangguan juga seringkali muncul diberbagai lokasi yang tidak diinginkan. Akibatnya penyaluran daya listrik dari pembangkit kebeban menjadi tidak optimal dan apabila gangguan tidak segera terisolir akan dapat merusak peralatan disekitarnya. Oleh karena itu diperlukan koordinasi proteksi yang tepat dengan perhitungan yang sesuai agar keandalan dan kontinuitas sistem pada pembangkit dapat terjaga dengan baik. Salah satu faktor yang juga perlu diperhitungkan dalam penentuan *setting* koordinasi proteksi adalah adanya bahaya *arc flash* atau busur api yang biasanya sering dilupakan.

*Arc flash* merupakan suatu fenomena percikan api yang diakibatkan adanya arus hubung singkat pada sistem tenaga listrik. Busur api ini sangat berbahaya apabila tidak dipertimbangkan dalam sistem proteksi tenaga listrik. Bahaya yang ditimbulkan dari busur api dapat merusak peralatan dan membahayakan keselamatan bagi para pekerja. Sehingga dengan melakukan perhitungan *arching current* dan *incident energy* akan diketahui level energi bahaya *arc flash* yang mungkin terjadi pada sistem, agar pemilihan peralatan pengaman dapat diperhitungkan untuk mengurangi level bahaya energi *arc flash* tersebut. Selain itu, studi koordinasi proteksi dengan mempertimbangkan *arc flash* pada PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5 ini belum pernah dibahas sebagai topik Tugas Akhir.

### 1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah:

1. Menentukan *setting* koordinasi proteksi *Over Current Relay* (OCR) dan *Ground Fault Relay* (GFR).
2. Menghitung besarnya insiden energi *arc flash* pada kondisi *existing* dan *resetting* berdasarkan standar IEEE 1584-2002.

3. Membandingkan dan menganalisis besarnya insiden energi *arc flash* pada kondisi *existing* dan *resetting*.
4. Membandingkan dan menganalisis jarak aman dari bahaya *arc flash* pada kondisi *existing* dan *resetting*.
5. Mendapatkan kategori insiden energi *arc flash* dan perlengkapan alat pelindung diri yang tepat berdasarkan standar NFPA 70E-2015.

### 1.3 Batasan Masalah

Dalam menyelesaikan permasalahan pada tugas akhir ini, maka perlu diberikan batasan-batasan masalah sebagai berikut:

1. Analisis hanya dilakukan pada koordinasi proteksi *Over Current Relay* (OCR) dan *Ground Fault Relay* (GFR).
2. Perhitungan insiden energi *arc flash* yang dianalisis pada level tegangan 10,5 kV, 3,3 kV dan 0,4 kV.
3. Standar perhitungan insiden energi *arc flash* berdasarkan standar IEEE 1584-2002.
4. Standar *Personal Protection Equipment* (PPE) berdasarkan standar NFPA 70E-2015.
5. Simulasi dan analisis sistem kelistrikan PT. Indoneisa Power UP Suralaya Unit 5 dilakukan dengan menggunakan *software* ETAP 12.6.0.

### 1.4 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah:

1. Mengetahui *setting* rele yang tepat agar sistem terkoordinasi dengan baik.
2. Mengetahui insiden energi *arc flash* yang mungkin terjadi berdasarkan standar IEEE 1584-2002.
3. Mensimulasikan dan menganalisis sistem kelistrikan berdasarkan permasalahan bahaya *arc flash*.
4. Mendapatkan kategori insiden energi *arc flash* dan perlengkapan alat pelindung diri yang tepat berdasarkan standar NFPA 70E-2015.
5. Mengetahui jarak aman bagi pekerja untuk meminimalisir kecelakaan akibat bahaya *arc flash*.

## **1.5 Metodologi**

Metode yang digunakan dalam penyusunan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- 1. Pengumpulan Data dan Studi Literatur**

Pengumpulan data dan studi literatur dilakukan untuk menambah pemahaman mengenai permasalahan yang dihadapi. Data yang diperlukan adalah spesifikasi generator, transformator, motor, kapasitas busbar, dan *single line diagram* PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5. Literatur yang digunakan adalah beberapa buku, jurnal ilmiah, dan *user manual* peralatan.

- 2. Pemodelan dan Simulasi**

Pemodelan dan simulasi dilakukan untuk mengetahui besarnya daya yang mengalir ke beban dan arus hubung singkat yang terjadi pada sistem kelistrikan PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5. Pemodelan sistem kelistrikan dengan menggunakan *software* simulasi ETAP 12.6.0. Dalam tugas akhir ini dilakukan pemodelan *single line diagram* pada *software* simulasi. Selanjutnya dilakukan simulasi aliran daya dan hubung singkat.

- 3. Analisis**

Dilakukan analisis hubung singkat untuk mengetahui besarnya arus hubung singkat pada tiap bus. Selanjutnya melakukan studi koordinasi proteksi dan menganalisisnya, serta melakukan *resetting* apabila koordinasi proteksi belum sesuai. Setelah itu melakukan studi busur api dengan melihat besar insiden energi busur api dan waktu pemutusan CB berdasarkan *setting* koordinasi proteksi sehingga dapat ditentukan *Personal Protection Equipment* (PPE) yang digunakan dan menentukan jarak aman bagi pekerja.

- 4. Kesimpulan**

Langkah akhir dari penyusunan tugas akhir ini adalah pembuatan kesimpulan dari hasil analisis dan simulasi yang telah dilakukan. Selain itu juga akan diberikan saran dan rekomendasi tentang penelitian yang telah dilakukan.

## **1.6 Sistematika Penulisan**

Penulisan tugas akhir ini dibagi menjadi lima bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut:

BAB I : Pendahuluan

Bab ini terdiri dari latar belakang, perumusan masalah, tujuan, metodologi penggerjaan tugas akhir, sistematika penulisan dan relevansi dari penulis.

BAB II : Koordinasi Proteksi dan Fenomena *Arc Flash* Pada Sistem Tenaga Listrik

Bab ini menjelaskan mengenai teori-teori penunjang yang digunakan dalam penggerjaan tugas akhir, seperti gangguan yang terjadi pada sistem kelistrikan, analisis hubung singkat, penjelasan sistem pengaman, koordinasi proteksi OCR dan GFR. Selanjutnya akan dibahas mengenai energi busur api berdasarkan standar IEEE 1584-2002 dan *Personal Protection Equipment* (PPE) berdasarkan standar NFPA 70E-2015.

BAB III : Sistem Kelistrikan PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5

Bab ini menjelaskan mengenai sistem kelistrikan pada PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5 yang meliputi data dan spesifikasi peralatan yang digunakan, serta konfigurasi sistem kelistrikan.

BAB IV : Hasil Simulasi dan Analisis Koordinasi Proteksi dan Busur Api Pada PT. Indonesia power UP Suralaya Unit 5

Bab ini menjelaskan mengenai koordinasi proteksi pada kondisi *existing* dan *resetting*, selanjutnya menghitung insiden energi *arc flash*, *flash protection boundary* untuk mendapatkan jarak batas seseorang menggunakan alat pelindung diri yang tepat sesuai level energi busur api.

BAB V : Penutup

Bab ini berisi kesimpulan dan saran dari keseluruhan pembahasan yang telah dilakukan dari tugas akhir.

## **1.7 Relevansi**

Penulisan tugas akhir ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5 dalam penggunaan Alat Pelindung Diri (APD) yang tepat sesuai level energi busur api dan dapat menjadi referensi untuk penelitian berikutnya mengenai besarnya insiden *arc flash* dengan Metode Modifikasi Perhitungan.

## **BAB II**

### **KOORDINASI PROTEKSI DAN FENOMENA ARC FLASH PADA SISTEM TENAGA LISTRIK**

#### **2.1 Gangguan Pada Sistem Tenaga Listrik**

Gangguan pada sistem tenaga listrik merupakan suatu ketidaknormalan sistem sehingga dapat mengakibatkan arus yang mengalir menjadi tidak seimbang dalam sistem tiga fasa [1]. Pada suatu sistem tenaga listrik yang baik sekalipun, gangguan juga seringkali muncul diberbagai lokasi yang tidak diinginkan. Akibatnya keandalan dan kontinuitas suatu sistem mengalami penurunan dikarenakan penyaluran daya listrik dari sumber kebeban tidak optimal. Gangguan dapat juga dikatakan semua kecacatan yang mengganggu aliran arus yang normal dari sumber menuju ke beban, sehingga mengakibatkan kondisi pada sistem tenaga listrik menjadi tidak normal dikarenakan semua arus akan mengalir menuju ketik gangguan [1]. Arus gangguan ini bernilai besar dari nilai arus maksimum suatu peralatan, sehingga mengakibatkan kenaikan temperatur dan dapat merusak peralatan.

Berikut ini merupakan klasifikasi gangguan pada sistem tenaga listrik antara lain:

a. Berdasarkan Asalnya

Berdasarkan asalanya, terdapat dua macam gangguan pada sistem tenaga listrik yaitu [2]:

1. Gangguan Internal [2]

Gangguan internal merupakan gangguan yang berasal dari dalam sistem. Penyebab gangguan yang berasal dari dalam sistem antara lain beban yang melebihi kapasitas sistem (*overload*), tegangan dan arus tidak normal, pemasangan peralatan yang kurang baik, kesalahan mekanis akibat proses penuaan, serta kerusakan material seperti isolator pecah, retaknya bearing, kawat putus, kabel isolasi yang cacat, dan lain sebagainya.

2. Gangguan Eksternal [2]

Gangguan eksternal merupakan gangguan yang berasal dari luar sistem. Penyebab gangguan yang berasal dari luar sistem antara lain pengaruh cuaca seperti surja petir, angina, hujan. Gangguan surja petir dapat mengakibatkan terjadi gangguan hubung singkat karena tembusnya isolasi pada peralatan (*breakdown*). Pengaruh lingkungan

seperti benda asing jatuh, pohon tumbang, serta akibat kecerobohan manusia.

b. Berdasarkan Sifat Gangguan

Berdasarkan sifat gangguan, terdapat dua macam gangguan pada sistem tenaga listrik yaitu [2]:

1. Gangguan Permanen (*Stationary*) [2]

Gangguan permanen merupakan gangguan yang tidak hilang atau tetap ada meskipun pemutus tenaga telah terbuka. Untuk menghilangkan gangguan permanen pada sistem tenaga listrik diperlukan tindakan perbaikan pada titik bagian penyebab gangguan tersebut terjadi.

2. Gangguan Sementara (*Temporary*) [2]

Gangguan sementara merupakan gangguan yang dapat hilang dengan sendirinya atau pada bagian yang terganggu diputus dalam waktu yang singkat dari sumber tegangannya, setelah itu sistem dihubungkan kembali sehingga dapat beroperasi secara normal lagi.

### 2.1.1 Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat merupakan salah satu penyebab gangguan pada sistem tenaga listrik. Gangguan ini terjadi karena terdapat saluran fasa yang terhubung dengan ground atau terhubung dengan saluran fasa lainnya [3]. Gangguan ini dapat mengakibatkan aliran arus yang menuju ke titik gangguan bernilai sangat besar dari nilai arus maksimum peralatan sehingga mengakibatkan kenaikan temperatur dan dapat merusak peralatan listrik yang berada disekitar titik gangguan. Aliran arus ini berasal dari arus kontribusi yaitu berasal dari grid, generator, dan motor listrik AC yang mengakibatkan nilai arus gangguan tersebut sangat besar. Gangguan hubung singkat digolongkan menjadi dua yaitu gangguan hubung singkat simetri dan gangguan hubung singkat asimetri [2].

Fase peralihan dalam hubung singkat dibagi menjadi tiga bagian sebagai berikut [4]:

1. Fase Peralihan Subtransien [4]

Dalam menentukan arus hubung singkat pada subtransien, maka digunakan reaktansi subtransien ( $X_d''$ ). Reaktansi ini terdapat pada mesin sinkron dan motor induksi. Nilai reaktansi subtransien akan bertambah besar menjadi reaktansi transien.

2. Fase Peralihan Transien [4]

Dalam menentukan arus hubung singkat pada transien, maka digunakan reaktansi transien ( $X_d'$ ). Reaktansi ini terdapat pada mesin sinkron saja, tidak pada motor induksi. Nilai reaktansi transien akan bertambah besar menjadi reaktansi sinkron.

### 3. Fase Peralihan *Steady State* [4]

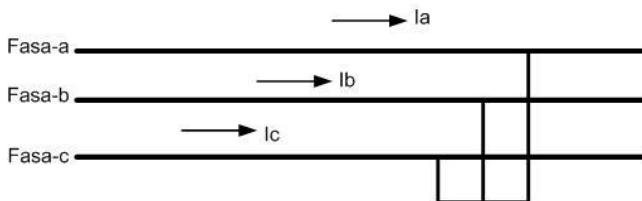
Dalam menentukan arus hubung singkat yang mengalir setelah keadaan *steady state* tercapai, maka digunakan reaktansi sinkron ( $X_d$ ). Reaktansi ini terdapat pada generator sinkron saja.

Berikut ini merupakan tujuan dilakukan analisa hubung singkat antara lain [4]:

1. Menentukan kapasitas daya hubung singkat (dalam MVA) pada setiap bus dan yang mengalir pada saluran terhubung dengan bus tersebut, sehingga dapat menentukan kapasitas dari pemutus daya (*circuit breaker*).
2. Menentukan *setting* rele serta koordinasi proteksi pada sistem untuk mengamankan dari keadaan ketidaknormalan sistem akibat gangguan dalam waktu yang secepat mungkin.
3. Menentukan arus dan tegangan maksimum maupun minimum pada titik gangguan dalam sistem kelistrikan untuk setiap jenis gangguan yang mungkin terjadi.

#### 2.1.1.1 Gangguan Hubung Singkat Simetri

Gangguan hubung singkat simetri atau gangguan hubung singkat seimbang merupakan gangguan yang terjadi pada semua fasanya, sehingga arus maupun tegangan setiap fasanya tetap seimbang setelah gangguan terjadi. Gangguan hubung singkat simetri sangat jarang terjadi, hanya sekitar 3% - 5% gangguan ini terjadi dilapangan [1]. Gambar 2.1 merupakan rangkaian hubung singkat tiga fasa.



**Gambar 2.1** Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa [1]

Gangguan simetri ini dapat dianalisa dengan menggunakan komponen urutan positif. Besarnya arus hubung singkat tiga fasa dapat dihitung menggunakan persamaan 2.1 berikut:

$$I_{sc\ 3\emptyset} = \frac{V_{LN}}{Z_1} \dots \quad (2.1)$$

dimana:

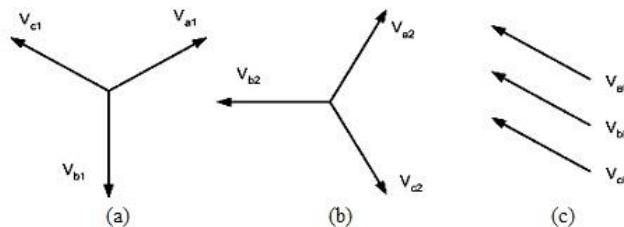
I<sub>SC 3Ø</sub>: arus hubung singkat 3 fasa

$V_{LN}$  : tegangan nominal *line to neutral*

$Z_1$  : impedansi urutan positif dilihat dari titik gangguan

### **2.1.1.2 Gangguan Hubung Singkat Asimetri**

Gangguan hubung singkat asimetri atau gangguan hubung singkat tidak seimbang merupakan gangguan yang menyebabkan arus dan tegangan yang mengalir disetiap fasanya menjadi tidak seimbang atau tidak sama, sehingga arus kontribusi hanya berasal dari salah satu fasa atau dua fasanya. Gangguan ini sering terjadi pada sistem tenaga listrik. Gangguan asimetri dapat disederhanakan dengan menggunakan tiga komponen simetris yaitu komponen urutan positif, komponen urutan negatif, dan komponen urutan nol. Gambar 2.1 merupakan rangkaian hubung singkat tiga fasa [1]. Gambar 2.2 merupakan komponen urutan positif, komponen urutan negatif, dan komponen urutan nol.



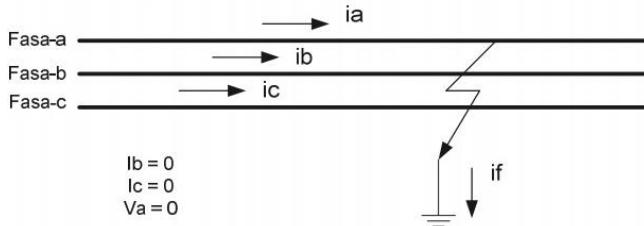
**Gambar 2.2** (a) Komponen Urutan Positif; (b) Komponen Urutan Negatif; (c) Komponen Urutan Nol [1]

Gangguan hubung singkat asimetri terdiri dari tiga macam gangguan antara lain:

### 1. Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa Ke Tanah

Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah merupakan gangguan hubung singkat yang terjadi ketika salah satu fasa terhubung

ke *ground*. Gangguan ini sering terjadi di lapangan sekitar 65% - 70%. Gambar 2.3 merupakan rangkaian hubung singkat satu fasa ke tanah.



**Gambar 2.3** Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa Ke Tanah [1]

Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah ini dapat dianalisa dengan menggunakan metode komponen simetris. Besarnya arus hubung singkat satu fasa ke tanah dapat dihitung menggunakan persamaan 2.2 berikut:

$$I_{sc\ 1\phi} = \frac{3V_{LN}}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad \dots \dots \dots \quad (2.2)$$

dimana:

$I_{sc\ 1\phi}$  : arus hubung singkat 1 fasa ke tanah

$V_{LN}$  : tegangan nominal *line to neutral*

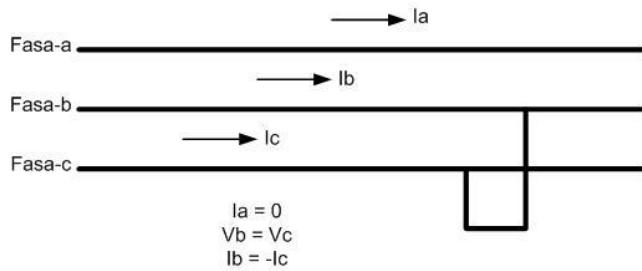
$Z_0$  : impedansi urutan nol

$Z_1$  : impedansi urutan positif

$Z_2$  : impedansi urutan negatif

## 2. Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa

Gangguan hubung singkat dua fasa merupakan gangguan hubung singkat yang terjadi ketika antara kedua fasa terhubung atau bersentuhan. Gangguan ini tidak mengandung urutan nol karena tidak terjadi gangguan yang terhubung ke *ground*. Sekitar 20% - 25% gangguan ini terjadi di lapangan. Gambar 2.4 merupakan rangkaian hubung singkat dua fasa.



**Gambar 2.4** Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa [1]

Besarnya arus hubung singkat dua fasa dapat dihitung menggunakan persamaan 2.3 berikut:

$$I_{sc\ 2\phi} = \frac{V_{LL}}{Z_1 + Z_2} = \frac{\sqrt{3} \times V_{LN}}{2 \times Z_1} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times I_{sc\ 3\phi} \approx 0,866 \times I_{sc\ 3\phi} \dots\dots\dots (2.3)$$

dimana:

$I_{sc\ 3\phi}$  : arus hubung singkat 3 fasa

$I_{sc\ 2\phi}$  : arus hubung singkat 2 fasa

$V_{LN}$  : tegangan nominal *line to neutral*

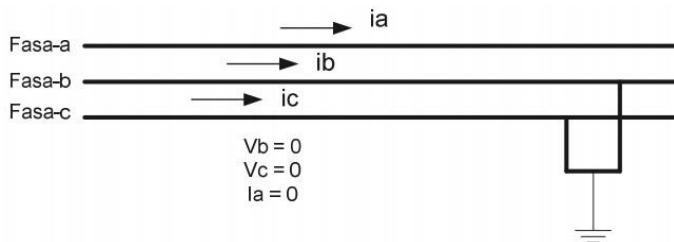
$V_{LL}$  : tegangan nominal *line to line*

$Z_1$  : impedansi urutan positif

$Z_2$  : impedansi urutan negatif

### 3. Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa Ke Tanah

Gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah merupakan gangguan hubung singkat yang terjadi ketika kedua fasa terhubung ke *ground*. Sekitar 10% - 15% gangguan ini terjadi di lapangan. Gambar 2.5 merupakan rangkaian hubung singkat dua fasa ke tanah.



**Gambar 2.5** Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa Ke Tanah [1]

Gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah dapat dianalisa dengan menggunakan metode komponen simetris. Besarnya arus hubung singkat dua fasa ke tanah dapat dihitung menggunakan persamaan 2.4 berikut:

$$I_{A1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0 / (Z_3 + Z_0)} \dots \quad (2.4)$$

dimana:

$I_{A1}$  : arus hubung singkat 2 fasa ke tanah

$V_f$  : tegangan bus saat gangguan

$Z_0$  : impedansi urutan nol

$Z_1$  : impedansi urutan positif

$Z_2$  : impedansi urutan negatif

### **2.1.2 Gangguan Beban Lebih**

Gangguan beban lebih (*overload*) merupakan gangguan yang terjadi ketika arus hubung singkat bernilai lebih besar daripada arus nominal ( $I > I_{NOM}$ ) atau dapat dikatakan konsumsi daya listrik melebihi batas dari daya listrik yang dihasilkan oleh pembangkit [2]. Apabila gangguan ini berlangsung secara terus menerus, maka akan dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan tersebut. Beban lebih (*overload*) dapat terjadi pada trafo maupun saluran dikarenakan pasokan beban yang terus meningkat atau adanya perubahan aliran beban setelah adanya gangguan pada jaringan listrik.

## **2.2 Sistem Pengaman Tenaga Listrik**

Sistem pengaman tenaga listrik merupakan suatu sistem pengaman pada peralatan-peralatan yang terpasang pada sistem tenaga listrik, seperti generator, bus bar, transformator, dan lain sebagainya terhadap adanya gangguan operasi pada sistem tenaga listrik. Pada suatu sistem tenaga listrik yang baik sekalipun, gangguan seringkali muncul diberbagai lokasi yang tidak diinginkan. Akibatnya penyaluran daya listrik dari sumber kebeban menjadi tidak optimal dan apabila gangguan tidak segera terisolir akan dapat merusak peralatan disekitarnya. Gangguan utama pada sistem tiga fasa antara lain hubung singkat tiga fasa, dua fasa, dua fasa ke tanah, dan satu fasa ke tanah. Gangguan ini menyebabkan arus yang mengalir menuju titik gangguan bernilai besar, oleh karena itu suatu sistem pengaman harus dapat mengidentifikasi dan memisahkan bagian yang terganggu secepat mungkin.

Rele merupakan peralatan pengaman pada sistem tenaga listrik yang dapat mendeteksi arus gangguan, kemudian secara otomatis memerintahkan pemutus tenaga untuk memisahkan aliran daya antara area yang terkena gangguan dengan area yang tidak terkena gangguan (normal) secepat mungkin. Gambar 2.6 merupakan skema kerja pada rele pengaman.



**Gambar 2.6** Skema Konsep Kerja Rele [2]

Pada dasarnya rele pengaman terdiri dari sebuah elemen operasi dan seperangkat kontak. Elemen operasi akan menerima masukan dari transformator arus atau transformator tegangan ataupun kombinasi dari keduanya. Keadaan keluaran dari rele adalah pada saat posisi kontak menutup (*close*) dan ditahan (*block*). Pada keadaan kontak rele menutup, rele akan memberikan sinyal kepada pemutus tenaga untuk membuka dan mengisolasi sistem tenaga listrik dari gangguan [4]. Rele pengaman sebagai komponen utama pada sistem pengaman tenaga listrik dalam mengidentifikasi gangguan harus memenuhi persyaratan keandalan (*reliability*) sebagai berikut:

1. Sensitifitas

Kemampuan rele pengaman untuk merespon adanya gangguan yang berada di dalam area yang diproteksinya. Rele harus peka dalam mengidentifikasi gangguan yang bernilai minimum.

2. Selektifitas

Kemampuan rele pengaman untuk menentukan titik gangguan dan memerintahkan pemutus tenaga secepat mungkin dalam mengisolasi gangguan. Rele hanya membuka pemutus tenaga yang diperlukan saja (tidak menyebabkan pemadaman jaringan yang lebih luas).

3. Kecepatan Bereaksi

Kecepatan rele dalam memutus arus gangguan secara cepat dapat mengurangi dampak gangguan seperti kerusakan pada peralatan dan juga dapat menjaga kestabilan sistem tenaga listrik.

4. Keandalan

Kemampuan sistem pengaman untuk dapat bekerja dengan baik dalam mengisolasi gangguan dan menghindari operasi yang tidak diperlukan (tidak akan bekerja jika tidak ada gangguan).

## 5. Ekonomis

Dalam pemilihan rele pengaman harus disesuaikan dengan harga peralatan yang akan diamankan. Sehingga harga rele pengaman yang digunakan tidak melebihi dari harga peralatan tersebut.

### 2.2.1 Rele Arus Lebih (*Over Current Relay*)

Rele arus lebih merupakan rele yang digunakan untuk mengamankan dari gangguan beban lebih (*overload*) dan gangguan hubung singkat (*short circuit*). Rele arus lebih bekerja berdasarkan besarnya arus masukan, apabila besarnya arus masukan melebihi suatu harga tertentu yang dapat diatur ( $I_{pp}$ ) maka rele akan bekerja. Sedangkan apabila besarnya arus masukan kurang dari suatu harga tertentu yang dapat diatur ( $I_{pp}$ ) maka rele tidak akan bekerja.

Penggunaan rele arus lebih pada sistem kelistrikan industri harus disesuaikan berdasarkan koordinasi rele yang telah di *setting* dengan benar, sehingga apabila terjadi gangguan rele ini dapat bekerja dengan cepat. Rele ini akan bekerja ketika arus yang mengalir pada rangkaian melebihi batas *setting* yang telah diijinkan dan memenuhi keadaan sebagai berikut:

$$I_f > I_{pp} \quad \text{rele bekerja} \quad (\text{trip})$$

$$I_f < I_{pp} \quad \text{rele tidak bekerja} \quad (\text{blok})$$

dimana:

$I_f$  : arus gangguan

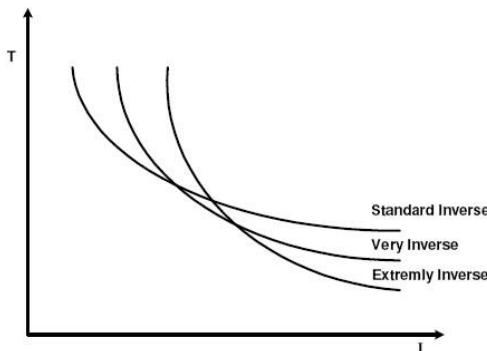
$I_{pp}$  : arus kerja

Rele arus lebih dapat mengamankan bagian-bagian peralatan pada sistem tenaga listrik, seperti generator, motor, transformator, jaringan transmisi, dan lain sebagainya. Saat *setting* rele arus lebih tidak boleh bekerja ketika beban maksimum, oleh karena itu arus *setting* harus melebihi dari arus beban maksimum. Sesuai standar IEEE 1584-2002 mengenai koordinasi proteksi rele arus lebih yaitu rele analog akan bekerja dengan waktu 0,3 – 0,4 detik, sendangkan rele digital berbasis mikroprosesor akan bekerja dengan waktu 0,2 – 0,3 detik [1]. Dengan adanya standar waktu kerja rele ini dapat memastikan pengaman cadangan akan beroperasi apabila pengaman utama gagal beroperasi dalam mengisolir gangguan pada sistem, sehingga tidak terjadi trip secara bersamaan. Karakteristik waktu rele arus lebih terbagi menjadi tiga antara lain rele arus lebih waktu terbalik (*inverse*), rele arus lebih waktu tertentu (*definite*), dan rele arus lebih waktu seketika (*instantaneous*).

### 2.2.1.1 Rele Arus Lebih Waktu Terbalik (*Inverse*)

Rele arus lebih waktu terbalik merupakan rele yang mempunyai karakteristik waktu operasi yang berbanding terbalik dengan besarnya arus gangguan. Semakin besar arus gangguan maka semakin cepat waktu operasi rele dan juga sebaliknya apabila arus gangguan kecil maka waktu operasi rela semakin lama. Rele ini memiliki batas *setting* yaitu tidak boleh bekerja ketika beban maksimum, sehingga *setting* arus dari rele ini harus melebihi daripada arus beban penuh dari peralatan yang akan diamankan.

Sesuai standar IEC 60255-3 dan BS 142, karakteristik waktu *inverse* terbagi menjadi tiga kurva yaitu *standard inverse*, *very inverse*, dan *extremely inverse*. Pada standar IEEE 1584-2002, karakteristik kurva *inverse* terbagi menjadi empat yaitu *standart inverse*, *very inverse*, *extremely inverse*, dan *long time inverse*. Gambar 2.7 merupakan kurva karakteristik waktu *inverse*.



**Gambar 2.7** Karakteristik *Standard Inverse*, *Very Inverse*, *Extremely Inverse* [1]

Dalam *setting* rele arus lebih waktu terbalik dibutuhkan dua parameter yang harus di *setting* yaitu *setting pickup* dan *setting time dial*. Kegunaan *setting pickup* untuk membatasi arus beban maksimum pada peralatan agar tidak melebihi batas arus maksimum beban. Besarnya arus *pickup* dapat ditentukan berdasarkan pemilihan *tap*. Besarnya nilai *tap* dapat dihitung menggunakan persamaan 2.5 berikut:

$$\text{tap} = \frac{I_{\text{set}}}{CT_{\text{rasio}}} \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (2.5)$$

dimana:

$I_{set}$  : arus pickup (Ampere)

Berdasarkan British Standart BS-142, penentuan setting rele arus lebih dapat dihitung menggunakan persamaan 2.6 berikut:

dimana:

$I_{FL,A}$  : arus beban maksimum peralatan

Pada rele arus lebih waktu terbalik selalu mempunyai *time dial* atau kelengkungan kurva (TMS). Kegunaan *setting time dial* untuk menentukan waktu operasi dari rele. Pada tugas akhir ini, rele yang digunakan di PT. Indonesia Power UP Suralaya merupakan produk Basler Electric dari *manufacture* Basler Electric dengan tipe BE 1051 dan produk GE Industrial Sistem dari *manufacture* GE Multilin dengan tipe 269 Plus. Besarnya *time dial* pada rele Basler Electric dapat dihitung menggunakan persamaan 2.7 berikut:

dimana;

T : waktu operasi (detik)

D : time dial

**I** : nilai arus (Ampere)

$I_{set}$  : arus pickup (Ampere)

A : koefisien 1 (lihat Table 2.1)

B : koefisien 2 (lihat Table 2.1)

C : koefisien 3 (lihat Table 2.1)

N : koefisien 4 (lihat Table 2.1)

Tabel 2.1 merupakan nilai koefisien untuk menghitung *time dial* dari berbagai macam kurva. Pada Tugas Akhir ini kurva yang digunakan adalah *linear time dial*.

**Tabel 2.1** Koefisien Kurva Rele

Tipe Kurva	Koefisien				
	A	B	C	N	K
Very Inverse	5.46780	0.10814	1.00000	2.04690	0.02800
Definite Time	0.47970	0.21359	1.00000	1.56250	0.02800
Extremely Inverse	7.76240	0.02758	1.00000	2.09380	0.02800
Long Time Inverse	5.61430	2.18592	1.00000	1.00000	0.02800

### 2.2.1.2 Rele Arus Lebih Waktu Tertentu (*Definite*)

Rele arus lebih waktu terbatas merupakan rele yang mempunyai karakteristik kerja sesuai waktu tunda (*time delay*) yang telah ditentukan dan dapat diatur waktu operasinya berdasarkan level arus yang berbeda. Rele ini bekerja apabila besarnya arus gangguan melebihi *pickup setpoint* yang ditentukan, maka rele akan bekerja memutus gangguan pada waktu yang sama (*definite*). Gambar 2.8 merupakan karakteristik dari rele arus lebih waktu tertentu.

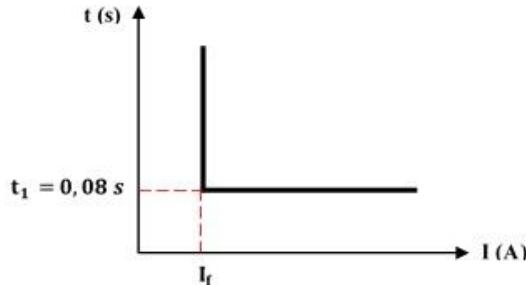


Gambar 2.8 Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Tertentu

### 2.2.1.3 Rele Arus Lebih Waktu Seketika (*Instantaneous*)

Rele arus lebih waktu seketika merupakan rele yang mempunyai karakteristik kerja seketika atau tanpa adanya waktu tunda (*time delay*) ketika arus yang mengalir melebihi nilai *setting* rele. Rele ini bekerja pada waktu kurang dari 0,08 detik, tetapi rele ini masih dapat bekerja pada waktu 0,1 detik. Pada umumnya rele ini dikombinasikan dengan rele arus

lebih lainnya dikarenakan rele ini jarang berdiri sendiri. Gambar 2.9 merupakan karakteristik dari rele arus lebih waktu seketika.

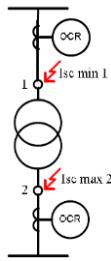


**Gambar 2.9** Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Seketika

Rele ini akan bekerja secara seketika apabila arus yang mengalir melebihi *setting* yang telah ditentukan. Dalam menentukan *setting* arus *pickup instant* yaitu dengan menggunakan nilai arus hubung singkat dua fasa minimum ( $I_{sc\ 2\phi\ min}$ ). Oleh karena itu *setting* arus harus lebih kecil dari nilai arus hubung singkat dua fasa minimum agar pemutus tenaga dapat trip secepat mungkin ketika terdapat gangguan hubung singkat. Besarnya nilai *setting* arus *pickup instant* dapat dihitung menggunakan persamaan 2.8 berikut:

$I_{set}$  : arus *pickup* atau *setting* arus rele (Ampere)  
 $I_{sc\ min}$  : arus hubung singkat minimum (Ampere)

Kondisi yang perlu diperhatikan dalam *setting* rele arus lebih waktu seketika adalah kondisi khusus pada pengaman feeder yang dipisahkan oleh sebuah transformator, dimana dalam koordinasi proteksinya dibedakan menjadi dua daerah yaitu *low voltage* dan *high voltage*. Gambar 2.10 merupakan rele arus lebih pengaman pada sebuah transformator.



**Gambar 2.10 Rele Arus Lebih Pengaman Transformator**

Besarnya nilai *setting arus pickup* pada kasus tersebut dapat dihitung menggunakan persamaan 2.9 berikut:

$$I_{sc \max \text{ bus } 2} \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc \min \text{ bus } 1} \quad \dots \dots \dots \dots \quad (2.9)$$

dimana:

$I_{sc \max \text{ bus } 2}$  : arus hubung singkat 3 fasa maksimum pada titik 2

$I_{sc \min \text{ bus } 1}$  : arus hubung singkat minimum pada titik 1

Jika persamaan 2.9 terpenuhi maka *setting time delay* pada rele di atas transformator boleh kembali pada *time delay* 0,1 detik.

### 2.2.2 Rele Gangguan Ke Tanah (*Ground Fault Relay*)

Rele gangguan ke tanah merupakan rele yang mempunyai karakteristik kerja yang sama dengan rele arus lebih, namun mempunyai kegunaan yang berbeda. Rele ini mendeteksi adanya arus hubung singkat ke tanah yaitu saat arus urutan nol melewati rele tersebut. Selanjutnya rele akan memberikan sinyal kepada pemutus tenaga untuk mengisolir area yang mengalami gangguan ke tanah. Pertimbangan pada *setting* koordinasi rele arus lebih gangguan ke tanah yaitu arus urutan nol akan terisolasi pada trafo belitan delta dan arus urutan nol akan mengalir dari sumber gangguan trafo belitan wye.

Setting rele gangguan ke tanah adalah:

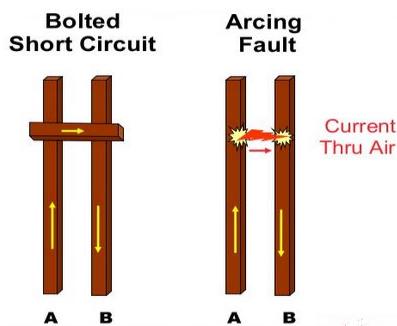
$$5 - 10\% \times I_{sc L-G} \leq I_{set} \leq 50\% \times I_{sc L-G} \quad \dots \dots \dots \dots \quad (2.10)$$

dimana:

$I_{sc L-G}$  : arus hubung singkat satu fasa ke tanah

## 2.3 Busur Api

Busur api atau *arc flash* merupakan pelepasan muatan listrik antara beberapa elektroda. Menurut NFPA 70E-2015, *arc flash* terjadi karena adanya arus yang mengalir melalui udara antara konduktor fasa ke fasa atau konduktor fasa ke konduktor *ground*. Adanya *arc flash* dapat menimbulkan radiasi panas disekitarnya hingga mencapai *temperature* 35000 °F. Proses terjadinya *arc flash* juga diikuti oleh kilatan cahaya yang dapat mengganggu penglihatan dan dapat merusak mata seseorang. Selain itu, *arc flash* juga dapat menimbulkan ledakan yang sangat keras dan dapat mengakibatkan luka bakar bagi pekerja yang terpapar didaerah kejadian. *Arc flash* juga dapat disebabkan karena adanya kegagalan mekanik, kegagalan isolasi, debu, korosi dan akibat kesalahan operator. Nilai energi *arc flash* dipengaruhi oleh beberapa parameter diantaranya arus hubung singkat maksimum atau arus *bolted fault*, waktu operasi peralatan proteksi, jarak antar konduktro, level tegangan, *grounding system* dan jarak pekerja dengan titik gangguan. *Arc fault* merupakan arus gangguan yang mengalir melalui udara antara konduktor satu dengan konduktor lainnya atau konduktor dengan tanah, sedangkan *bolted fault* merupakan perantara konduktor sebagai jalur arus gangguannya [5]. Gambar 2.12 merupakan perbedaan *arc fault* dengan *bolted fault*.



Gambar 2.12 Perbedaan *Arc Fault* dengan *Bolted Fault* [6]

### 2.3.1 Perhitungan Insiden Energi Arc Flash Berdasarkan Standar IEEE 1584-2002

Perhitungan insiden energi *arc flash* menggunakan standar IEEE 1584-2002 yang berdasarkan arus hubung singkat yang terjadi pada level tegangan menengah dan tegangan rendah. Sebelum melakukan perhitungan besarnya nilai insiden energi *arc flash*, hal pertama yang dilakukan mendapatkan nilai dari arus *arcing* yang dihasilkan. Persamaan dalam menentukan nilai arus *arcing* terbagi menjadi dua bagian yaitu untuk sistem dengan tegangan kurang dari 1 kV dan untuk sistem dengan tegangan 1 kV – 15 kV.

Persamaan nilai arus *arcing* berdasarkan standar IEEE 1584-2002 untuk sistem dengan tegangan kurang dari 1 kV sebagai berikut:

$$\log(I_a) = K + 0,662 \log(I_{bf}) + 0,0966V + 0,000526G + \\ 0,5588V(\log I_{bf}) - 0,00304G(\log I_{bf}) \dots\dots\dots(2.14)$$

Persamaan nilai arus *arcing* berdasarkan standar IEEE 1584-2002 untuk sistem dengan tegangan kurang dari 1 kV sebagai berikut:

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_{bf}) \dots\dots\dots(2.15)$$

Persamaan dari  $I_a$  sebagai berikut:

$$I_a = 10^{\log I_a} \dots\dots\dots(2.15)$$

dimana:

$\log$  : log 10

$I_a$  : arus *arcing* (kA)

$I_{bf}$  : arus *bolted* gangguan tiga fasa simetris RMS (kA)

K : -0,153 untuk konfigurasi peralatan terbuka (*no enclosure*)  
-0,097 dengan konfigurasi bos (*enclosure equipment*)

V : tegangan sistem (kV)

G : jarak celah antar konduktor (mm)

Setelah mendapatkan nilai arus *arcing*, selanjutnya dilakukan perhitungan nilai insiden energi *arc flash*. Pada keadaan normal, referensi waktu *arcing* dengan durasi 0,2 detik dan jarak dari titik kemungkinan terjadi *arcing* ke manusia 610 mm.

Persamaan insiden energi normalisasi sebagai berikut:

$$\log E_n = K_1 + K_2 + (1,081 \times \log(I_a)) + (0,0011 \times G) \dots\dots\dots\dots\dots (2.16)$$

Atau dapat ditulis menjadi persamaan:

$$E_n = I_a^{1,081} \times 10^{K_1+K_2+(0,0011\times G)} \dots\dots\dots\dots\dots (2.17)$$

dimana:

$E_n$  : insiden energi normalisasi ( $J/cm^2$ )

$K_1$  : -0,792 untuk konfigurasi peralatan terbuka (*no enclosure*)  
-0,555 dengan konfigurasi bos (*enclosure equipment*)

$K_2$  : 0 untuk sistem *ungrounded* dan *high resistance grounded*  
-0,113 untuk sistem *grounded*

$G$  : jarak celah antar konduktor (mm) dapat dilihat pada Tabel 2.2

Setelah mendapatkan energi normalisasi ( $E_n$ ), maka persamaan untuk menghitung nilai insiden energi *arc flash* sebagai berikut:

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \dots\dots\dots\dots\dots (2.18)$$

dimana:

$E$  : insiden energi ( $cal/cm^2$ )

$C_f$  : faktor pengali

1,0 untuk tegangan diatas 1 kV  
1,5 untuk tegangan dibawah 1kV

$t$  : waktu *arcing* (detik)

$D$  : jarak kerja dari titik *arc flash* ke pekerja (mm) dapat dilihat pada Tabel 2.3

$x$  : jarak eksponen dapat dilihat pada Tabel 2.2

Pada level tegangan lebih dari lebih dari 15 kV, jarak celah antar konduktor berada diluar batasan dari model yang ada, sehingga Metode Lee dapat digunakan untuk menentukan nilai insiden energi *arc flash* dengan persamaan sebagai beriku:

$$E = 2,142 \times 10^6 \times V \times I_{bf} \times \left(\frac{t}{D^2}\right) \dots\dots\dots\dots\dots (2.19)$$

**Tabel 2.2** Parameter untuk Peralatan dan Level Tegangan

Lvel Tegangan (kV)	Jenis Peralatan	Tipikal gap antar konduktor (mm)	Eksponen Jarak (x)
0,208 – 1	<i>Open air</i>	10 – 40	2,000
	<i>Switchgear</i>	32	1,473
	<i>MCC and panels</i>	25	1,641
	<i>Cables</i>	13	2,000
>1 – 5	<i>Open air</i>	102	2,000
	<i>Switchgear</i>	13 – 102	0,973
	<i>Cables</i>	13	2,000
>5 – 155	<i>Open air</i>	13 – 153	2,000
	<i>Switchgear</i>	153	0,973
	<i>Cables</i>	13	2,000

**Tabel 2.3** Kelas Peralatan dan Tipikal Jarak Pekerja

Kelas Peralatan	Tipikal jarak pekerja (mm)
15 kV <i>Switchgear</i>	910
5 kV <i>Switchgear</i>	910
<i>Low Voltage Switchgear</i>	610
<i>Low Voltage Switchgear and Panelboards</i>	455
<i>Cables</i>	455
<i>Other</i>	<i>to be determined in field</i>

### 2.3.2 Jarak Aman Perlindungan (*Flash Protection Boundary*)

*Flash Protection Boundary* merupakan batas jarak perlindungan terhadap titik *arc flash*. NFPA 70E-2015 mengembangkan sebuah pendekatan mengenai batas kemungkinan seseorang akan mengalami luka bakar tingkat dua akibat *arc flash hazard*. Insiden energi *arc flash* memiliki beberapa zona seperti bentuk lapisan bola, dimana lapisan paling dalam menghasilkan bahaya yang paling besar. Apabila seseorang berada pada daerah lapisan dalam tersebut maka akan terpapar *arc flash* dan mengalami luka bakar tingkat dua. Batasan jarak aman perlindungan (*Flash Protection Boundary*) dapat dikategorikan setelah mengetahui insiden energi *arc flash* yang terjadi.

Persamaan untuk mengitung *Flash Protection Boundary* berdasarkan standar IEEE 1584-2002 sebagai berikut:

$$DB = [4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_b}\right)]^{\frac{1}{x}} \dots \dots \dots \dots \dots \quad (2.20)$$

dimana:

$DB$  : jarak batasan dari titik *arcing* (mm)

$C_f$  : faktor pengali

1,0 untuk tegangan diatas 1 kV

1,5 untuk tegangan dibawah 1kV

$E_n$  : insiden energi normalisasi ( $J/cm^2$ )

$E_b$  : insiden energi dalam  $J/cm^2$  pada batas jarak

$t$  : waktu *arcing* (detik)

$x$  : jarak eksponen dapat dilihat pada Tabel 2.2

Persamaan untuk mengitung *Flash Protection Boundary* menggunakan Metode Leeberdasarkan standar IEEE 1584-2002 sebagai berikut:

$$DB = 2,142 \times 10^6 \times V \times I_{bf} \times \left(\frac{t}{E_b}\right) \dots \dots \dots \dots \dots \quad (2.21)$$

Niali  $E_b$  dapat diatur  $5,0 J/cm^2$  atau  $1,195 cal/cm^2$  untuk *bare skin (no hood)* atau sesuai dengan rating dari PPE (*Personal Protective Equipment*) dengan catatan  $5,0 J/cm^2$  sama dengan  $1,2 cal/cm^2$ .

## 2.4 Pengelompokan Kategori Energi Busur Api dengan Perlengkapan Keselamatan Diri Sesuai Standar NFPA 70E-2015

Setelah mengatahi insiden energi *arc flash* yang terjadi pada setiap bus, selanjutnya dapat dikelompokkan kategori bahayanya berdasarkan dari energi yang dihasilkan dan dampak yang ditimbulkan bagi tubuh manusia. Berdasarkan standar NFPA 70E-2015 menjelaskan mengenai kategori insiden energi dan *Personal Protective Equipment* yang digunakan dalam meminimalisir bahaya *arc flash*. Dalam menentukan kategori PPE didasarkan pada minimum insiden energi [6]. Tabel 2.4 merupakan kategori PPE menggunakan standar NFPA 70E-2015.

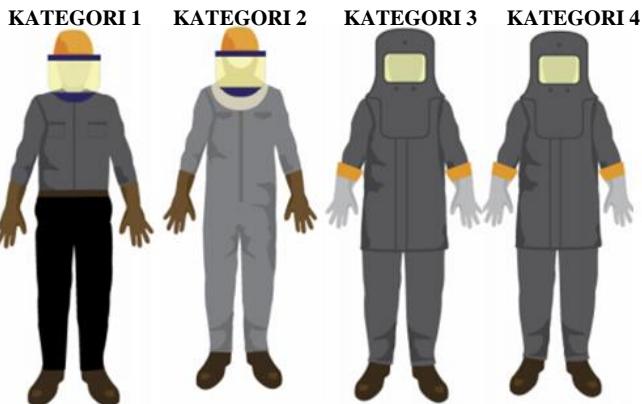
**Tabel 2.4** Kategori PPE Berdasarkan Standar NFPA 70E-2015

Kategori PPE	Minimum Insiden Energi (cal/cm <sup>2</sup> )	Alat Pelindung Diri / PPE	
		Pakaian	Peralatan Pelindung
1	4	<ul style="list-style-type: none"><li>- Kemeja lengan panjang dan celana panjang dengan <i>arc rating</i></li><li>- Pelindung wajah dengan <i>arc rating</i></li><li>- Jaket dan jas hujan dengan <i>arc rating</i></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Pelindung kepala</li><li>- Pelindung mata</li><li>- Pelindung telinga (sisipan saluran telinga)</li><li>- Sarung tangan kulit</li><li>- Sepatu kulit</li></ul>
2	8	<ul style="list-style-type: none"><li>- Kemeja lengan panjang dan celana panjang dengan <i>arc rating</i></li><li>- Pelindung wajah dan balaclava dengan <i>arc rating</i></li><li>- Jaket dan jas hujan dengan <i>arc rating</i></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Pelindung kepala</li><li>- Pelindung mata</li><li>- Pelindung telinga (sisipan saluran telinga)</li><li>- Sarung tangan kulit</li><li>- Sepatu kulit</li></ul>
3	25	<ul style="list-style-type: none"><li>- <i>Flash Suit Hood</i></li><li>- Kemeja lengan panjang dan celana panjang dengan <i>arc rating</i></li><li>- Pelindung wajah dengan <i>arc rating</i></li><li>- Sarung tangan dengan <i>arc rating</i></li><li>- Jaket dan jas hujan dengan <i>arc rating</i></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Pelindung kepala</li><li>- Pelindung mata</li><li>- Pelindung telinga (sisipan saluran telinga)</li><li>- Sepatu kulit</li></ul>

**Tabel 2.4** Kategori PPE Berdasarkan Standar NFPA 70E-2015 (lanjutan)

Kategori PPE	Minimum Insiden Energi (cal/cm <sup>2</sup> )	Alat Pelindung Diri / PPE	
		Pakaian	Peralatan Pelindung
4	40	<ul style="list-style-type: none"><li>- Kemeja lengan panjang dan celana panjang dengan <i>arc rating</i></li><li>- Celana <i>arc suit flash</i></li><li>- Jaket <i>arc suit flash Hood suit flash</i> dengan <i>arc rating</i></li><li>- Jaket dan jas hujan dengan <i>arc rating</i></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Pelindung kepala</li><li>- Pelindung mata</li><li>- Pelindung telinga (sisipan saluran telinga)</li><li>- Sarung tangan kulit</li><li>- Sepatu kulit</li></ul>

Klasifikasi alat perlindungan atau *Personal Protective Equipment* untuk tiap kategori sebagai berikut.



**Gambar 2.13** Kalasifikasi Alat Perlindungan Untuk Tiap Kategori

*Halaman Ini Sengaja Dikosongkan*

## **BAB III**

### **SISTEM KELISTRIKAN PT. INDONESIA POWER UP SURALAYA UNIT 5**

#### **3.1 Sistem Kelistrikan PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5**

PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5 merupakan salah satu pembangkit terbesar dengan kapasitas 1x600 MW net yang berbahan bakar batu bara. Sistem kelistrikan pada PT. Indonesia Power UP selain disalurkan menuju transmisi 500 kV, juga digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik pemakaian sendiri untuk operasional perusahaan. Pada sistem kelistrikannya memiliki level tegangan menengah dan tegangan rendah. Level tegangan menengah terdiri dari tegangan 10,5 kV dan 3,3 kV yang terdapat beban motor berkapasitas besar. Pada tegangan 10,5 kV antara lain: motor *Primary Air Fan*, *Induced Draft Fan*, *Forced Draft Fan*, *Condensate Water Pump* dan *Circulating Water Pump*. Pada tegangan 3,3 kV antara lain: motor *Boiler Feed Pump*, *Pulverizer*, *Closed Cycle Cooling Water Pump* dan *Ash Blower*. Level tegangan rendah digunakan level 0,4 kV yang terdapat motor berkapasitas kecil. Dalam Tugas Akhir ini pada bagian tegangan rendah dimodelkan dengan *lump load* dengan asumsi beban motor 80%.

#### **3.2 Kapasitas Pembangkitan PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5**

PT. Indonesia Power UP Suralaya unit 5 memiliki satu pembangkit untuk memenuhi kebutuhan listrik pada sistem utility dan untuk mentransmisikan daya ke grid PLN 500 kV. Sistem *utility* ini *disupply* dari grid PLN 150 kV. Dengan kapasitas pembangkit utama menggunakan level tegangan 23 kV, maka dibutuhkan transformator untuk menurunkan level tegangan 10,5 kV, tegangan 3,3 kV dan tegangan 0,4 kV. Tabel 3.1 merupakan data kapasitas pembangkitan dan transformator PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5 pada tegangan menengah dan tegangan rendah.

**Tabel 3.1** Data Kapasitas Pembangkit dan Transformator pada PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5

ID	Tegangan (kV)	Daya (MVA)
Generator	23	767
Trafo XGT	23/500	767
Trafo XSST01	150/10,5	67
Trafo XSST02	150/10,5	67
Trafo XUST01	23/10,5	56
Trafo XUST02	23,10,5	56
Trafo XUST03	10,5/3,3	8
Trafo XUST04	10,5/3,3	8
Trafo XBLR01	10,5/0,4	2
Trafo XBLR02	10,5/0,4	2
Trafo XASH01	10,5/0,4	0,5
Trafo XASH02	10,5/0,4	0,5
Trafo XTRB01	10,5/0,4	2
Trafo XTRB02	10,5/0,4	2
Trafo XPCP01	10,5/0,4	1,5
Trafo XPCP02	10,5/0,4	1,5
Trafo XCWL01	10,5/0,4	2
Trafo XAUI02	10,5/0,4	2

### 3.3 Data Beban PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5

Terdapat beberapa beban listrik pada PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5 yaitu beban motor dan beban *lump load*. Motor yang digunakan kebanyakan menggunakan motor induksi untuk tegangan menengah. Pada tegangan rendah dimodelkan dengan *lump load* dengan asumsi beban motor 80%. Tabel 3.2 merupakan data beban motor yang terdapat pada PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5.

**Tabel 3.2 Data Beban Motor PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5**

ID Motor	Lokasi	Rating Tegangan (kV)	Rating Daya (kW)
MCEP01	10,5 kV SWGR 5A	10,5	2126
MCWP01		10,5	2835
MPAF01		10,5	1824
MFDF01		10,5	1728
MIDF01		10,5	4302
MCEP02		10,5	2126
MCWP02		10,5	2835
MPAF02		10,5	1824
MFDF02		10,5	1728
MIDF02		10,5	4302
MPLV01A	3,3 kV SWGR 5A	3,3	634
MPLV02B		3,3	634
MPLV03C		3,3	634
MBFP01A		3,3	370
MC3WP01A		3,3	290
MASB01A		3,3	200
MASB02B		3,3	200
MPLV04A		3,3	634
MPLV05B		3,3	634
MPLV06C		3,3	634
MBFP02B	3,3 kV SWGR 5B	3,3	370
MC3WP02B		3,3	290
MC3WP03C		3,3	290
MASB03C		3,3	200

**Tabel 3.3** Data Beban *Lump Load* pada PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5

ID <i>Lump Load</i>	Lokasi	Rating Tegangan (kV)	Rating Daya (MW)
MBLR01	0,4 kV BLR SWGR 5A	0,4	1,6
MASH01	0,4 kV ASH SWGR 5A	0,4	0,4
MTRB01	0,4 kV TRB SWGR 5A	0,4	1,6
MPCP01	0,4 kV PCP SWGR 5A	0,4	1,2
MCWL01	0,4 kVCWL SWGR 5A	0,4	1,6
MBLR02	0,4 kV BLR SWGR 5B	0,4	1,6
MASH02	0,4 kV ASH SWGR 5B	0,4	0,4
MTRB02	0,4 kV TRB SWGR 5B	0,4	1,6
MPCP02	0,4 kV PCP SWGR 5B	0,4	1,2
MAUI01	0,4 kV AUI SWGR 5B	0,4	1,6

## **BAB IV**

# **HASIL SIMULASI DAN ANALISIS KOORDINASI PROTEKSI DAN BUSUR API PADA PT. INDONESIA POWER UP SURALAYA UNIT 5**

### **4.1 Pemodelan Sistem Kelistrikan PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5**

Pada bab ini akan dibahas mengenai simulasi dan analisis sistem kelistrikan PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5. Pemodelan sistem kelistrikan PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5 dilakukan dengan menggambar *single line diagram* menggunakan *software ETAP 12.6*. Data-data yang diperlukan dalam membuat *single line diagram* diantaranya data *existing* peralatan seperti generator, transformator, motor, *circuit breaker*, *ratio current transformer*, rele, *bus* dan grid PLN dari data lapangan. Setelah memasukkan data-data tersebut, maka didapatkan data analisis aliran daya dan koordinasi proteksi pada kondisi *existing*. Langkah selanjutnya adalah melakukan simulasi hubung singkat tiga fasa dan hubung singkat fasa ke tanah pada kondisi 4 *cycle* dan 30 *cycle* yang bertujuan untuk mengetahui besarnya arus yang mengalir melewati rele serta melakukan simulasi busur api yang bertujuan untuk mengetahui nilai insiden energi yang terjadi, kategori *Personal Protective Equipment*, jarak aman perlindungan dan rekomendasi yang tepat untuk mengurangi bahaya busur api. Setelah mensimulasikan hubung singkat dan busur api dilakukan koordinasi proteksi dengan pemilihan rele pengaman, sehingga didapatkan hasil *resetting* yang tepat.

### **4.2 Sistem Kelistrikan PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5**

Dalam melakukan koordinasi proteksi rele arus lebih diperlukan pemilihan tipikal yang bertujuan untuk mempermudah dalam melakukan *setting* pada rele. Pemilihan tipikal yang digunakan harus dapat mewakili keseluruhan sistem kelistrikan PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5. Pada studi koordinasi proteksi PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5 dipilih 3 tipikal untuk rele arus lebih gangguan fasa dan rele arus lebih gangguan ke tanah.

Tiga tipikal tersebut antara lain:

1. Tipikal 1: Tipikal ini dimulai dari beban motor MPLV04D menuju trafo XUST01. Dimana terdapat beberapa rele arus lebih antara lain RPLV04D, RTIE01, RXUST03B, RXUST03A dan RXUST01.
2. Tipikal 2: Tipikal ini dimulai dari *lump load* MBLR02 menuju trafo XBLR01. Dima terdapat beberapa rele arus lebih antara lain LTIE01, LBLR01 dan RBLR01.
3. Tipikal 3: Tipikal ini dimulai dari beban motor MPEP01 menuju trafo XSST01. Dimana terdapat beberapa rele arus lebih antara lain RCEP01, RXSST01B dan RXSST01A.

### 4.3 Analisis Arus Gangguan Hubung Singkat

Analisis ini digunakan untuk mengetahui nilai arus hubung singkat yang mengalir disetiap *bus* pada tipikal yang telah ditentukan. Terdapat dua parameter yang digunakan untuk perhitungan arus hubung singkat yaitu arus hubung singkat minimum dan arus hubung singkat maksimum. Hubung singkat minimum adalah hubung singkat antar fasa pada saat 30 *cycle*. Sedangkan hubung singkat maksimum adalah hubung singkat 3 fasa pada saat 4 *cycle*. Dalam mencari hubung singkat minimum dan maksimum digunakan arus kontribusi yang menuju ke *bus* atau melihat arah dari sumber menuju beban. Dengan menggunakan nilai arus hubung singkat tersebut dapat ditentukan *setting* rele arus lebih gangguan fasa.

#### 4.3.1 Analisis Hubung Singkat Maksimum

Hubung singkat maksimum adalah hubung singkat tiga fasa pada saat 4 *cycle*. Pada analisis digunakan hubung singkat ketika 4 *cycle* karena rele arus lebih akan bekerja saat 3 – 5 *cycle*. Arus hubung singkat maksimum digunakan untuk *setting* rele arus lebih dengan *time delay* antara 0,08-0,5 *second* dan membatasi arus hubung singkat terbesar yang mungkin terjadi. Pada Tabel 4.1 merupakan data hasil simulasi arus gangguan hubung singkat maksimum.

**Tabel 4.1** Data Hubung Singkat Maksimum 4 Cycle

NO.	ID Bus	Tegangan (kV)	Arus Hubung Singkat Minimum (kA)
1.	BLR SWGR 5A	0.4	46.913
2.	BLR SWGR 5B	0.4	46.915
3.	ASH SWGR 5A	0.4	13.617

**Tabel 4.1** Data Hubung Singkat Maksimum 4 Cycle (lanjutan)

NO.	ID Bus	Tegangan (kV)	Arus Hubung Singkat Minimum (kA)
4.	ASH SWGR 5B	0.4	13.617
5.	TRB SWGR 5A	0.4	46.913
6.	TRB SWGR 5B	0.4	46.915
7.	PCP SWGR 5A	0.4	35.773
8.	PCP SWGR 5B	0.4	35.774
9.	CWL SWGR 5A	0.4	46.913
10.	AUI SWGR 5B	0.4	46.915
11.	3.3 SWGR 5A	3.3	15.309
12.	3.3 SWGR 5B	3.3	15.309
13.	10.5 SWGR 5A	10.5	24.208
14.	10.5 SWGR 5B	10.5	24.208
15.	10.5 SST 5A	10.5	27.538
16.	10.5 SST 5B	10.5	27.538

#### 4.3.2 Analisis Hubung Singkat Minimum

Hubung singkat minimum adalah hubung singkat antar fasa pada saat 30 *cycle*. Nilai arus hubung singkat minimum akan digunakan sebagai batasan nilai *pickup* rele arus lebih *instant*. Sehingga saat terjadi hubung singkat minimum rele akan bekerja sesuai *time delay* yang telah ditentukan. Pada Tabel 4.2 merupakan data hasil simulasi arus gangguan hubung singkat minimum.

**Tabel 4.2** Data Hubung Singkat Minimum 30 Cycle

NO.	ID Bus	Tegangan (kV)	Arus Hubung Singkat Minimum (kA)
1.	BLR SWGR 5A	0.4	40.152
2.	BLR SWGR 5B	0.4	40.152
3.	ASH SWGR 5A	0.4	11.752
4.	ASH SWGR 5B	0.4	11.752
5.	TRB SWGR 5A	0.4	40.152
6.	TRB SWGR 5B	0.4	40.152
7.	PCP SWGR 5A	0.4	30.701
8.	PCP SWGR 5B	0.4	30.701

**Tabel 4.2** Data Hubung Singkat Minimum 30 Cycle (lanjutan)

NO.	ID Bus	Tegangan (kV)	Arus Hubung Singkat Minimum (kA)
9.	CWL SWGR 5A	0.4	40.152
10.	AUI SWGR 5B	0.4	40.152
11.	3.3 SWGR 5A	3.3	12.875
12.	3.3 SWGR 5B	3.3	12.875
13.	10.5 SWGR 5A	10.5	20.914
14.	10.5 SWGR 5B	10.5	20.914
15.	10.5 SST 5A	10.5	23.849
16.	10.5 SST 5B	10.5	23.849

#### 4.4 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa

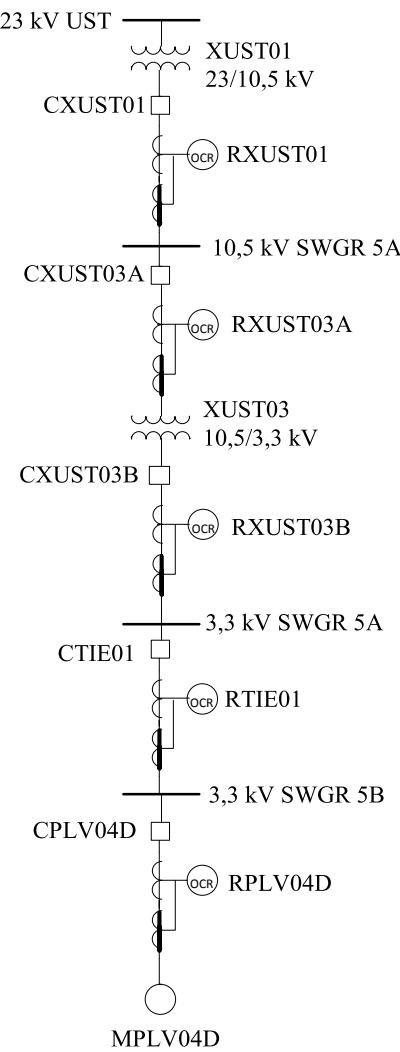
Koordinasi rele arus lebih gangguan fasa digunakan untuk mengamankan sistem akibat gangguan beban lebih maupun gangguan hubung singkat 3 fasa dan 2 fasa. Pada koordinasi arus lebih dilakukan *setting* arus dan waktu pada rele (50/51). Sesuai standar IEEE 1584-2002, perhitungan waktu operasi atau *time delay* disesuaikan dengan rentang waktu atau *grading time* sebesar 0,2 detik sampai dengan 0,4 detik, untuk tugas akhir ini digunakan *grading time* sebesar 0,2 detik. Dalam melakukan koordinasi rele arus lebih hal pertama yang dilakukan adalah menganalisis kondisi *existing* PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5 menggunakan kurva TCC (*Time Current Curve*). Apabila terdapat rele yang tidak terkoordinasi dengan baik, maka dilakukan *restting*. Selanjutnya melakukan *resetting* dengan dilakukan perhitungan untuk menentukan nilai *pick up lowset*, *pick up high set*, *time delay* dan *time dial*. Setelah itu dilakukan *plotting* ulang kurva TCC pada *Star Protective Device Coordination*. *Plotting* ini bertujuan untuk melihat kurva TCC pada rele arus lebih, sehingga didapatkan koordinasi rele yang tepat.

##### 4.4.1 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa Tipikal 1

Koordinasi rele arus lebih Tipikal 1 dimulai dari beban motor MPLV04D menuju trafo XUST01. Dimana terdapat beberapa rele arus lebih antara lain RPLV04D, RTIE01, RXUST03B, RXUST03A dan RXUST01. Tipikal ini terdiri dari dua level tegangan yaitu 10,5 kV dan 3,3 kV. Gambar 4.1 merupakan koordinasi rele arus lebih tipikal 1 pada kondisi *existing*.

**Tabel 4.3 Data Existing Rele Tipikal 1**

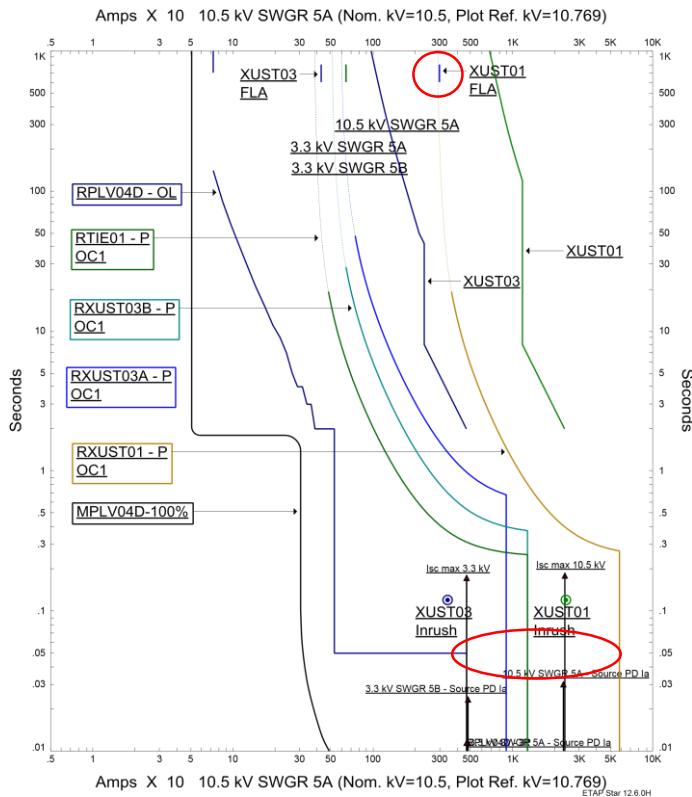
ID Rele	CT Rasio	Setting	
RPLV04D	200/5	<i>Curve Type</i>	<i>Curve 2</i>
		<i>Overcurrent</i>	
		<i>Pickup Range x FLA</i>	1,05 – 1,8
		<i>Pickup Lowset</i>	1,05
		<i>Instantaneous</i>	
		<i>Pickup Range x FLA</i>	4-12
		<i>Pickup Highset</i>	11
		<i>Time delay</i>	0,04
RTIE01	2000/5	<i>Curve Type</i>	<i>V1-Very Inverse</i>
		<i>Overcurrent</i>	
		<i>Pickup Range Sec</i>	0,5 – 9,99
		<i>Pickup Lowset</i>	3
		<i>Time dial</i>	2
		<i>Instantaneous</i>	
		<i>Pickup Range Sec</i>	10 – 99,9
		<i>Pickup Highset</i>	99
RXUST03B	2000/5	<i>Time delay</i>	0
		<i>Curve Type</i>	<i>V1-Very Inverse</i>
		<i>Overcurrent</i>	
		<i>Pickup Range Sec</i>	0,5 – 9,99
		<i>Pickup Lowset</i>	4
		<i>Time dial</i>	4
		<i>Instantaneous</i>	
		<i>Pickup Range Sec</i>	10 – 99,9
RXUST03A	600/5	<i>Pickup Highset</i>	99
		<i>Curve Type</i>	<i>V1-Very Inverse</i>
		<i>Overcurrent</i>	
		<i>Pickup Range Sec</i>	0,5 – 9,99
		<i>Pickup Lowset</i>	5
		<i>Time dial</i>	5
		<i>Instantaneous</i>	
		<i>Pickup Range Sec</i>	10 – 99,9



**Gambar 4.1** Single Line Diagram Tipikal 1

Sebelum melakukan *resetting* rele pengaman, pertama yang harus dilakukan adalah analisis pada kurva TCC (*Time Current Curve*) sesuai standar IEEE 242-2001. Dalam analisis kurva TCC, maka dilakukan

plotting pada Single Line Diagram Tipikal 1 pada kondisi *existing*. Gambar 4.2 merupakan Time Current Curve Tipikal 1 pada kondisi *existing*.



**Gambar 4.2 Plot Existing Rele Gangguan Fasa Tipikal 1**

Dari hasil *plot* kurva pengaman *existing* Tipikal 1 terdapat beberapa koordinasi yang kurang tepat yaitu:

1. Pada kurva *instantaneous* rele RTIE01, RXUST03B, RXUST03A dan RXUST01 tidak mempunyai *time delay*. Dalam hal ini tidak sesuai dengan standar IEEE 242-2001 dan apabila terjadi gangguan hubung

singkat mengakibatkan *trip* dalam waktu yang lama sesuai dengan besar arus gangguannya.

- Pada kurva rele RXUST01 arus *pickup* nya berada disebelah kiri FLA trafo yang diamankan. Dalam hal ini tidak diperbolehkan karena dapat menyebabkan rele merasakan arus gangguan dan memerintahkan CB untuk *open* sehingga trafo XUST01 tidak dapat bekerja.

Selanjutnya akan dilakukan *resetting* pada Tipikal 1 dengan melakukan perhitungan manual. Berikut perhitungan manual yang telah dilakukan

### **Rele RPLV04D**

**Tabel 4.4 Data Setting Rele Motor RPLV04D**

<b>RPLV04D</b>	
Manufaktur	<i>General Electric</i>
Model	Multilin 269 Plus
Kurva	<i>Curve 2</i>
Rasio CT	200/5
FLA Motor Pulverizer	158 A
LRC Motor	600,6 %
I Starting Motor	948,9 A
Isc Max Kontribusi Bus 3,3 kV	15,309 kA
Isc Min Kontribusi Bus 3,3 kV	12,875 kA

### **Thermal**

Dipilih:

$\text{Tap} = 1,5$  (sesuai GE Multilin *Standard Curve Number*)

$$I_{\text{set}} = 1,5 \times \text{FLA} = 1,3 \times 158 = 237 \text{ A}$$

### **Instantaneous Pickup**

$I_{\text{start motor}} < I_{\text{set}} < 0,8 \times \text{Isc Min Kontribusi } 3,3 \text{ kV}$

$$948,9 < I_{\text{set}} < 0,8 \times 12875$$

$$948,9 < I_{\text{set}} < 10300$$

$$\frac{948,9}{158} < \text{Tap} < \frac{10300}{158}$$

$$6,006 < \text{Tap} < 65,19$$

Dipilih:

$$\text{Tap} = 11$$

$$I_{\text{set}} = 11 \times 158 = 1738 \text{ A}$$

### **Time Delay**

Dipilih *time delay* = 0,1 detik

### **Rele RTIE01**

**Tabel 4.5** Data Setting Rele RTIE01

<b>RTIE01</b>	
Manufaktur	<i>Basler Electric</i>
Model	BE1-1051
Kurva	<i>Very Inverse (V1)</i>
Rasio CT	2000/5
FLA 3,3 kV SWGR 5A	720 A
Isc Max Kontribusi Bus 3,3 kV	15,309 kA
Isc Min Kontribusi Bus 3,3 kV	12,875 kA

#### ***Time Overcurrent Pickup***

$$1,05 \times \text{FLA } 3,3 \text{ kV SWGR 5A} < I_{\text{set}} < 1,4 \times \text{FLA } 3,3 \text{ kV SWGR 5A}$$

$$1,05 \times 720 < I_{\text{set}} < 1,4 \times 720$$

$$756 < I_{\text{set}} < 1008$$

$$\frac{756}{2000/5} < \text{Tap} < \frac{1008}{2000/5}$$

$$1,89 < \text{Tap} < 2,52$$

Dipilih:

$$\text{Tap} = 2,2$$

$$I_{\text{set}} = 2,2 \times \frac{2000}{5} = 880 \text{ A}$$

#### ***Time Dial***

Dipilih waktu operasi ( $t$ ) = 0,3 detik

$$D = \frac{t - K}{\left( \frac{A}{\left( \frac{I}{I_{\text{set}}} \right)^N} - C \right) + B}$$

$$D = \frac{0,3 - 0,028}{\left( \frac{5,4678}{\left( \frac{15309}{880} \right)^{2,0469}} - 1 \right) + 0,10814}$$

$$D = 2,19$$

$D \geq 2,19$  dipilih  $D = 3$  (Range 0,5 – 9,99 dengan step 0,01)

### Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA} \ 3,3 \text{ kV SWGR} \ 5\text{A} < I_{\text{set}} < 0,8 \times I_{\text{sc Min Kontribusi}} \ 3,3 \text{ kV}$$

$$1,6 \times 720 < I_{\text{set}} < 0,8 \times 12875$$

$$1152 < I_{\text{set}} < 10300$$

$$\frac{1152}{2000/5} < \text{Tap} < \frac{12875}{2000/5}$$

$$2,88 < \text{Tap} < 32,19$$

Dipilih:

$$\text{Tap} = 10$$

$$I_{\text{set}} = 10 \times \frac{2000}{5} = 4000 \text{ A}$$

### Time Delay

Dipilih *time delay* = 0,3 detik

### **Rele RXUST03B**

**Tabel 4.6** Data Setting Rele RXUST03B

<b>RXUST03B</b>	
Manufaktur	<i>Basler Electric</i>
Model	BE1-1051
Kurva	<i>Very Inverse (V1)</i>
Rasio CT	2000/5
FLA Sekunder XUST03	1400 A
Isc Max Kontribusi Bus 3,3 kV	15,309 kA
Isc Min Kontribusi Bus 3,3 kV	12,875 kA

### Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA Sekunder XUST03} < I_{\text{set}} < 1,4 \times \text{FLA Sekunder XUST03}$$

$$1,05 \times 1400 < I_{\text{set}} < 1,4 \times 1400$$

$$1470 < I_{\text{set}} < 1960$$

$$\frac{1470}{2000/5} < \text{Tap} < \frac{1960}{2000/5}$$

$$3,68 < \text{Tap} < 4,9$$

Dipilih:

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

$$I_{\text{set}} = 4,2 \times \frac{2000}{5} = 1680 \text{ A}$$

### Time Dial

Dipilih waktu operasi ( $t$ ) = 0,5 detik

$$D = \frac{t - K}{\left( \frac{A}{\left( \frac{I}{I_{set}} \right)^N} - C \right) + B}$$

$$D = \frac{0.5 - 0,028}{\left( \frac{5,4678}{\left( \frac{15309}{1680} \right)^{2,0469}} - 1 \right) + 0,10814}$$

$$D = 2,81$$

$D \geq 2,81$  dipilih  $D = 2,8$  (Range 0,5 – 9,99 dengan step 0,01)

### Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA Sekunder XUST03} < I_{set}$$

$$< 0,8 \times I_{sc} \text{ Min Kontribusi } 3,3 \text{ kV}$$

$$1,6 \times 1400 < I_{set} < 0,8 \times 12875$$

$$2240 < I_{set} < 10300$$

$$\frac{2240}{2000/5} < \text{Tap} < \frac{10300}{2000/5}$$

$$5,6 < \text{Tap} < 295,75$$

Dipilih:

$$\text{Tap} = 15$$

$$I_{set} = 15 \times \frac{2000}{5} = 6000 \text{ A}$$

### Time Delay

Dipilih time delay = 0,5 detik

### Rele RXUST03A

Tabel 4.7 Data Setting Rele RXUST03A

<b>RXUST03A</b>	
Manufaktur	<i>Basler Electric</i>
Model	BE1-1051
Kurva	<i>Very Inverse (V1)</i>
Rasio CT	600/5

**Tabel 4.7** Data Setting Rele RXUST03A (lanjutan)

RXUST03A	
Isc Max Kontribusi Bus 3,3 kV Konversi ke <i>High Voltage</i>	15,309 kA $\frac{3,3}{10,5} \times 15,309$ = 4,811 kA
Isc Min Kontribusi Bus 3,3 kV	12,875 kA
Isc Max Kontribusi Bus 10,5 kV	24,208 kA
Isc Min Kontribusi Bus 10,5 kV	20,914 kA

**Time Overcurrent Pickup**

$$1,05 \times \text{FLA Primer XUST03} < I_{\text{set}} < 1,4 \times \text{FLA Primer XUST03}$$

$$1,05 \times 439,9 < I_{\text{set}} < 1,4 \times 439,9$$

$$461,895 < I_{\text{set}} < 615,86$$

$$\frac{461,895}{600/5} < \text{Tap} < \frac{615,86}{600/5}$$

$$3,85 < \text{Tap} < 5,13$$

Dipilih:

$$\text{Tap} = 4,68$$

$$I_{\text{set}} = 4,68 \times \frac{600}{5} = 562 \text{ A}$$

**Time Dial**

Dipilih waktu operasi ( $t$ ) = 0,1 detik  
 $t - K$

$$D = \frac{A}{\left( \frac{I}{I_{\text{set}}}^N - C \right) + B}$$

$$D = \frac{0,1 - 0,028}{\left( \frac{5,4678}{\left( \frac{4811}{562} \right)^{2,0469}} - 1 \right) + 0,10814}$$

$$D = 0,41$$

$D \geq 0,41$  dipilih  $D = 3,8$  (Range 0,5 – 9,99 dengan step 0,01)

### Instantaneous Pickup

Isc Max Kontribusi (3,3) <  $I_{set}$  <  $0,8 \times$  Isc Min Kontribusi (10,5)

$$4811 < I_{set} < 0,8 \times 20914$$

$$4811 < I_{set} < 16731,2$$

$$\frac{4811}{600/5} < \text{Tap} < \frac{9784,96}{600/5}$$

$$40,10 < \text{Tap} < 139,43$$

Dipilih:

$$\text{Tap} = 50$$

$$I_{set} = 50 \times \frac{600}{5} = 6000 \text{ A}$$

### Time Delay

Dipilih *time delay* = 0,1 detik, karena memenuhi syarat Isc max kontribusi (3,3) lebih kecil dari pada Isc min kontribusi (10,5).

### Rele RXUST01

Tabel 4.8 Data Setting Rele RXUST01

<b>RXUST01</b>	
Manufaktur	<i>Basler Electric</i>
Model	BE1-1051
Kurva	<i>Very Inverse (V1)</i>
Rasio CT	3000/5
FLA Sekunder XUST01	3079 A
Isc Max Kontribusi Bus 10,5 kV	24,208 kA
Isc Min Kontribusi Bus 10,5 kV	20,914 kA

### Time Overcurrent Pickup

$1,05 \times$  FLA Sekunder XUST01 <  $I_{set}$  <  $1,4 \times$  FLA Sekunder XUST01

$$1,05 \times 3079 < I_{set} < 1,4 \times 3079$$

$$3232,95 < I_{set} < 4310,6$$

$$\frac{3232,95}{3000/5} < \text{Tap} < \frac{4310,6}{3000/5}$$

$$5,39 < \text{Tap} < 7,18$$

Dipilih:

$$\text{Tap} = 6,2$$

$$I_{set} = 6,2 \times \frac{3000}{5} = 3720 \text{ A}$$

### **Time Dial**

Dipilih waktu operasi ( $t$ ) = 0,3 detik

$$D = \frac{t - K}{\left( \frac{A}{\left( \frac{I}{I_{set}} \right)^N} - C \right) + B}$$

$$D = \frac{0,3 - 0,028}{\left( \frac{5,4678}{\left( \frac{24208}{3720} \right)^{2,0469}} - 1 \right) + 0,10814}$$

$$D = 1$$

$D \geq 1$  dipilih  $D = 2$  (Range 0,5 – 9,99 dengan step 0,01)

### **Instantaneous Pickup**

$$1,6 \times \text{FLA Sekunder XUST01} < I_{set}$$

$$< 0,8 \times I_{sc} \text{ Min Kontribusi } 10,5 \text{ kV}$$

$$1,6 \times 3079 < I_{set} < 0,8 \times 20914$$

$$4926,4 < I_{set} < 16731,2$$

$$\frac{4926,4}{3000/5} < \text{Tap} < \frac{19283,2}{3000/5}$$

$$8,21 < \text{Tap} < 27,89$$

Dipilih:

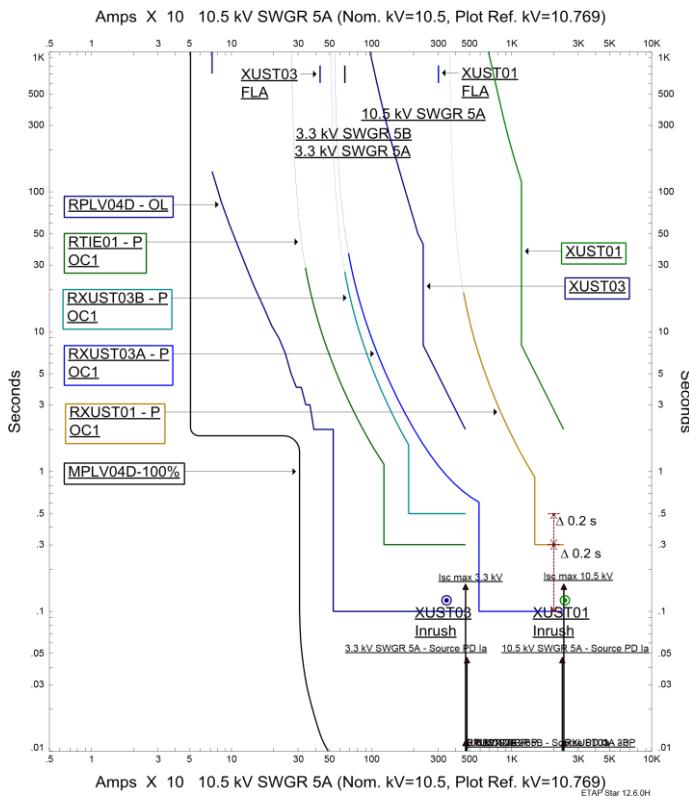
$$\text{Tap} = 25$$

$$I_{set} = 25 \times \frac{3000}{5} = 15000 \text{ A}$$

### **Time Delay**

Dipilih time delay = 0,3 detik

Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan, maka didapatkan kurva koordinasi pengaman Tipikal 1 kondisi *restting*. Gambar 4.3 merupakan *Time Current Curve* Tipikal 1 pada kondisi *resetting*.



**Gambar 4.3 Plot Restting Rele Gangguan Fasa Tipikal 1**

Dari hasil *plot* kurva pengaman *resetting* Tipikal 1 dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Rele RPLV04D berfungsi sebagai pelindung motor Pulverizer 04D terhadap arus lebih beban penuh dan arus lebih hubung singkat.
2. Rele RTIE01 berfungsi sebagai *supply* pada bus 3,3 kV SWGR 5B sehingga motor pada bus tersebut tetap bisa bekerja apabila terjadi gangguan pada bus 10,5 kV SWGR 5B.
3. Rele RXUST03B berfungsi sebagai pelindung trafo XUST03 pada sisi sekunder terhadap arus lebih beban penuh dan arus hubung singkat maksimum pada bus 3,3 kV SWGR 5A. Selain itu rele ini berfungsi juga sebagai *backup* rele RPLV01A apabila motor *pulverizer* 01A

gagal bekerja. Rele ini berfungsi juga sebagai pelindung *bus* 3,3 kV SWGR 5A, apabila terjadi hubung singkat maksimum pada *bus* tersebut maka rele ini akan bekerja terlebih dahulu.

4. Rele RXUST03A berfungsi sebagai pelindung trafo XUST03 pada sisi primer terhadap arus lebih beban penuh dan arus hubung singkat pada terminal trafo XUST03 sisi primer. Selain itu rele ini berfungsi sebagai backup rele RXUST03B apabila terjadi arus lebih beban penuh dan hubung singkat pada terminal trafo XUST03 sisi sekunder. Rele ini juga berfungsi sebagai pelindung *bus* 10,5 kV SWGR 5A apabila terjadi hubung singkat pada terminal trafo XUST03 sisi primer. Pada saat trafo XUST03 mengalami *inrush*, maka rele ini tidak bekerja.
5. Rele RXUST01 berfungsi sebagai pelindung trafo XUST01 pada sisi sekunder terhadap arus lebih beban penuh dan arus hubung singkat pada *bus* 10,5 kV SWGR 5A. Selain itu rele ini berfungsi sebagai backup rele RXUST03A apabila terjadi hubung singkat pada terminal trafo XUST03 sisi primer. Rele ini berfungsi juga sebagai pelindung *bus* 10,5 kV SWGR 5A, apabila terjadi hubung singkat maksimum pada *bus* tersebut maka rele ini akan bekerja terlebih dahulu.
6. *Setting time delay* setiap rele sudah tepat dan *setting grading time* setiap rele 0,2 detik sesuai standar IEEE 242-2001.

#### 4.4.2 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa Tipikal 2

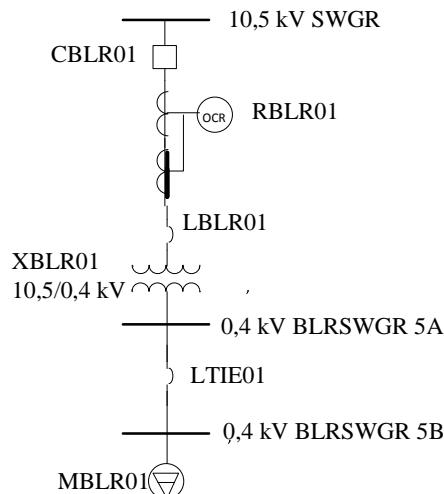
Koordinasi rele arus lebih Tipikal 2 dimulai dari *lump load* MBLR02 menuju trafo XBLR01. Dima terdapat beberapa rele arus lebih antara lain LTIE01, LBLR01 dan RBLR01. Tipikal ini terdiri dari dua level tegangan yaitu 0,4 kV dan 10,5 kV.

**Tabel 4.9** Data Existing Rele Tipikal 2

ID Rele	CT Rasio	Setting	
LTIE01		<i>Continuous Ampere</i>	4000
		<i>Rating Plug</i>	2000
		<i>LT Pickup</i>	1
		<i>LT Band</i>	14
		<i>ST Pickup</i>	3
		<i>ST Band</i>	0,3
		<i>Instantaneous</i>	<i>Disable</i>

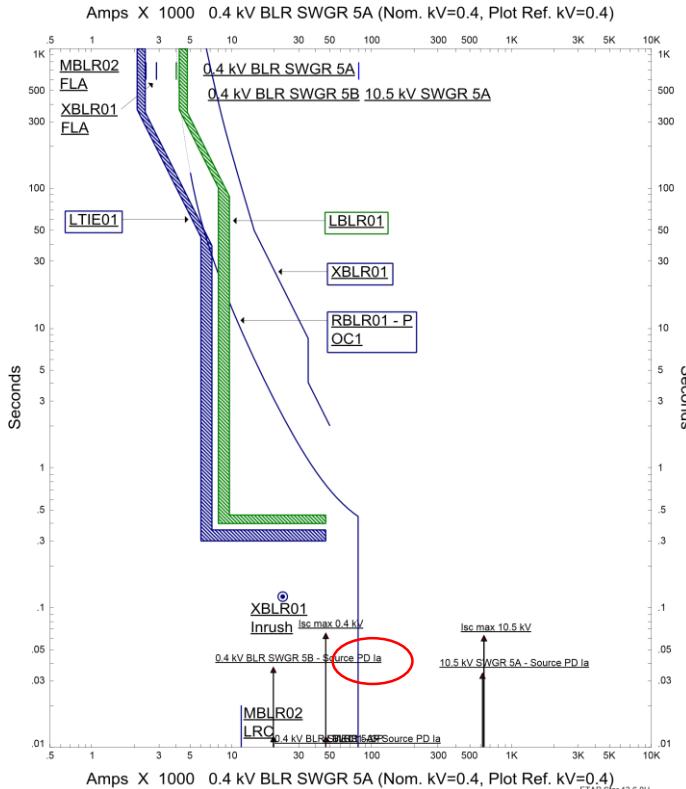
**Tabel 4.9 Data Existing Rele Tipikal 2 (lanjutan)**

ID Rele	CT Ratio	Setting	
LBLR		<i>Continuous Ampere</i>	4000
		<i>Rating Plug</i>	4000
		<i>LT Pickup</i>	1
		<i>LT Band</i>	14
		<i>ST Pickup</i>	2
		<i>ST Band</i>	0,4
		<i>Instantaneous</i>	<i>Disable</i>
RBLR01	150/5	<i>Curve Type</i>	<i>E1-Extremely Inverse</i>
		<i>Overcurrent</i>	
		<i>Pickup Range Sec</i>	0,5 – 9,99
		<i>Pickup Lowset</i>	5
		<i>Time dial</i>	9,9
		<i>Instantaneous</i>	
		<i>Pickup Range Sec</i>	10 – 99,9
		<i>Pickup Highset</i>	99
		<i>Time delay</i>	0



**Gambar 4.4 Single Line Diagram Tipikal 2**

Sebelum melakukan *resetting* rele pengaman, pertama yang harus dilakukan adalah analisis pada kurva TCC (*Time Current Curve*) sesuai standar IEEE242-2001. Dalam analisis kurva TCC, maka dilakukan *plotting* pada *Single Line Diagram* Tipikal 2 pada kondisi *existing*. Gambar 4.6 merupakan *Time Current Curve* Tipikal 2 pada kondisi *existing*.



**Gambar 4.5 Plot Existing Rele Gangguan Fasa Tipikal 2**

Dari hasil *plot* kurva pengaman *existing* tipikal 2 terdapat beberapa koordinasi yang kurang tepat yaitu pada kurva *instantaneous* rele BLR01 tidak mempunyai *time delay*. Dalam hal ini tidak sesuai dengan standar IEEE 242-2001 dan apabila terjadi gangguan hubung singkat

mengakibatkan *trip* dalam waktu yang lama sesuai dengan besar arus gangguannya.

Selanjutnya akan dilakukan *resetting* pada tipikal 2 dengan melakukan perhitungan manual. Berikut perhitungan manual yang telah dilakukan.

### **Rele LTIE01**

**Tabel 4.10** Data *Setting* Rele LTIE01

<b>LTIE01</b>	
Manufaktur	<i>Siemens</i>
Model	3WL53H
I Plug	2000
FLA Bus 0,4 kV SWGR 5A	2309 A
Isc Max Kontribusi Bus 0,4 kV	46,913 kA
Isc Min Kontribusi Bus 0,4 kV	40,152 kA

### **Long Time**

LT Pickup:

$$1,05 \times \text{FLA } 0,4 \text{ kV SWGR 5A} < I_{\text{set}} < 1,4 \times \text{FLA } 0,4 \text{ kV SWGR 5A}$$

$$1,05 \times 2309 < I_{\text{set}} < 1,4 \times 2309$$

$$2424,45 < I_{\text{set}} < 3232,6$$

$$\frac{2424,45}{2000} < \text{Tap} < \frac{3232,6}{2000}$$

$$1,01 < \text{Tap} < 1,61$$

Dipilih:

$$\text{Tap} = 1$$

$$I_{\text{set}} = 1 \times 2000 = 2000 \text{ A}$$

LT Band = 2

### **Short Time**

ST Pickup:

$$1,6 \times \text{FLA } 0,4 \text{ kV SWGR 5A} < I_{\text{set}} < 0,8 \times \text{Isc Min Kontribusi } 0,4 \text{ kV}$$

$$1,6 \times 2309 < I_{\text{set}} < 0,8 \times 40152$$

$$3694,4 < I_{\text{set}} < 32121,6$$

$$\frac{3694,4}{2000} < \text{Tap} < \frac{32121,6}{2000}$$

$$1,85 < \text{Tap} < 16,06$$

Dipilih:

$$\text{Tap} = 3$$

$$I_{\text{set}} = 3 \times 2000 = 6000 \text{ A}$$

ST Band = 0,2

### **Rele LBLR01**

**Tabel 4.11 Data Setting Rele RBLR01**

<b>LBLR01</b>	
Manufaktur	<i>Siemens</i>
Model	3WL53H
I Plug	4000
FLA Sekunder XBLR01	2887 A
Isc Max Kontribusi Bus 0,4 kV	46,913 kA
Isc Min Kontribusi Bus 0,4 kV	40.152 kA

#### ***Long Time***

LT Pickup:

$$1,05 \times \text{FLA sekunder XBLR01} < I_{\text{set}} < 1,4 \times \text{FLA sekunder XBLR01}$$

$$1,05 \times 2887 < I_{\text{set}} < 1,4 \times 2887$$

$$3031,35 < I_{\text{set}} < 4041,8$$

$$\frac{3031,35}{4000} < \text{Tap} < \frac{4041,8}{4000}$$

$$0,76 < \text{Tap} < 1,01$$

Dipilih:

$$\text{Tap} = 0,8$$

$$I_{\text{set}} = 0,8 \times 4000 = 3200 \text{ A}$$

$$\text{LT Band} = 2$$

#### ***Short Time***

ST Pickup:

$$1,6 \times \text{FLA sekunder XBLR01} < I_{\text{set}}$$

$$< 0,8 \times \text{Isc Min Kontribusi } 0,4 \text{ kV}$$

$$1,6 \times 2887 < I_{\text{set}} < 0,8 \times 40152$$

$$4619,2 < I_{\text{set}} < 32121,6$$

$$\frac{4619,2}{4000} < \text{Tap} < \frac{32121,6}{4000}$$

$$1,85 < \text{Tap} < 8,03$$

Dipilih:

$$\text{Tap} = 2,5$$

$$I_{\text{set}} = 2,5 \times 4000 = 10000 \text{ A}$$

$$\text{ST Band} = 0,4$$

### **Rele RBLR01**

**Tabel 4.12 Data Setting Rele RBLR01**

<b>RBLR01</b>	
Manufaktur	<i>Basler Electric</i>
Model	BE1-1051
Kurva	<i>Extremely Inverse (E1)</i>
Rasio CT	150/5
FLA Primer XBLR01	110 A
Isc Max Kontribusi Bus 0,4 kV Konversi ke High Voltage	$\frac{0,4}{10,5} \times 46,913 = 1,787 \text{ kA}$
Isc Min Kontribusi Bus 0,4 kV	40,152 kA
Isc Max Kontribusi Bus 10,5 kV	24,208 kA
Isc Min Kontribusi Bus 10,5 kV	20,914 kA

#### **Time Overcurrent Pickup**

$$1,05 \times \text{FLA Primer XBLR01} < I_{\text{set}} < 1,4 \times \text{FLA Primer XBLR01}$$

$$1,05 \times 110 < I_{\text{set}} < 1,4 \times 110$$

$$115,5 < I_{\text{set}} < 154$$

$$\frac{115,5}{150/5} < \text{Tap} < \frac{154}{150/5}$$

$$3,85 < \text{Tap} < 5,13$$

Dipilih:

$$\text{Tap} = 5,2$$

$$I_{\text{set}} = 5,2 \times \frac{150}{5} = 156 \text{ A}$$

#### **Time Dial**

Dipilih waktu operasi ( $t$ ) = 0,1 detik

$$D = \frac{t - K}{\left( \frac{A}{\left( \frac{I}{I_{\text{set}}} \right)^N} - C \right) + B}$$

$$D = \frac{0,1 - 0,028}{\left( \frac{7,7624}{\left( \frac{1787}{156} \right)^{2,0938}} - 1 \right) + 0,02758}$$

$$D = 0,96$$

$D \geq 0,96$  dipilih  $D = 8,59$  (Range  $0,5 - 9,99$  dengan step  $0,01$ )

### **Instantaneous Pickup**

Isc Max Kontribusi ( $0,4$ )  $< I_{set} < 0,8 \times$  Isc Min Kontribusi ( $10,5$ )

$$1787 < I_{set} < 0,8 \times 20914$$

$$1787 < I_{set} < 16731,2$$

$$\frac{1787}{150/5} < Tap < \frac{16731,2}{150/5}$$

$$59,57 < Tap < 557,71$$

Dipilih:

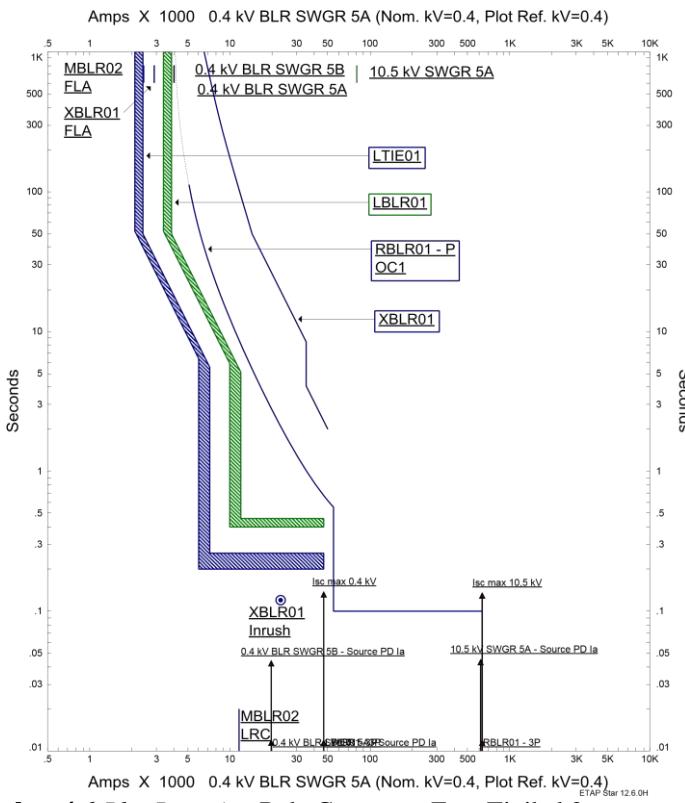
$$Tap = 70$$

$$I_{set} = 70 \times \frac{150}{5} = 2100 \text{ A}$$

### **Time Delay**

Dipilih *time delay* =  $0,1$  detik, karena memenuhi syarat Isc max kontribusi ( $0,4$ ) lebih kecil dari pada Isc min kontribusi ( $10,5$ ).

Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan, maka didapatkan kurva koordinasi pengaman Tipikal 2 kondisi *restting*. Gambar 4.7 merupakan *Time Current Curve* Tipikal 2 pada kondisi *resetting*.



**Gambar 4.6 Plot Resetting Rele Gangguan Fasa Tipikal 2**

Dari hasil *plot* kurva pengaman *resetting* Tipikal 2 dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. LVCB LTIE01 berfungsi sebagai *supply* pada bus 0,4 kV SWGR 5B sehingga beban pada bus tersebut tetap bisa bekerja apabila terjadi gangguan pada bus 10,5 kV SWGR 5B.
2. LVCB LBLR01 berfungsi sebagai pelindung trafo XBLR01 pada sisi sekunder terhadap arus lebih beban penuh dan arus hubung singkat maksimum pada bus 0,4 kV SWGR 5A. Rele ini berfungsi juga sebagai pelindung bus 0,4 kV SWGR 5A, apabila terjadi hubung singkat maksimum pada bus tersebut maka rele ini akan bekerja terlebih dahulu.

3. Rele RBLR01 berfungsi sebagai pelindung trafo XBLR01 pada sisi primer terhadap arus lebih beban penuh dan arus hubung singkat pada terminal trafo XBLR01 sisi primer. Selain itu rele ini berfungsi sebagai backup LVCB LBLR01 apabila terjadi arus lebih beban penuh dan hubung singkat pada terminal trafo XUST03 sisi sekunder. Rele ini juga berfungsi sebagai pelindung *bus* 10,5 kV SWGR 5A apabila terjadi hubung singkat pada terminal trafo XUST03 sisi primer. Pada saat trafo XBLR01 mengalami *inrush*, maka rele ini tidak bekerja.

#### **4.4.3 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa Tipikal 3**

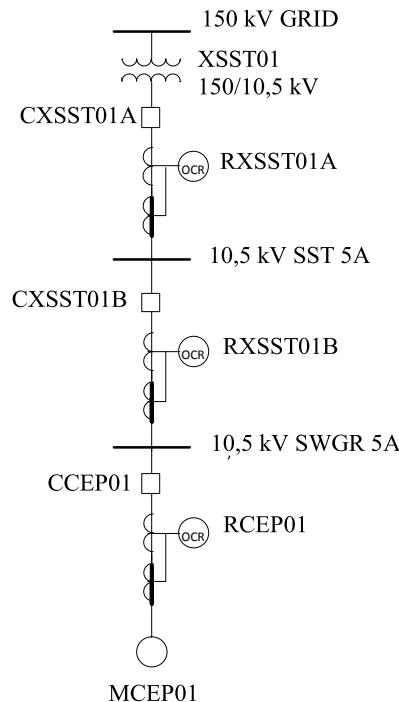
Tipikal ini dimulai dari beban motor MPEP01 menuju trafo XSST01. Dimana terdapat beberapa rele arus lebih antara lain RCEP01, RXSST01B dan RXSST01A. Tipikal ini terdiri dari satu level tegangan yaitu 10,5 kV

**Tabel 4.12 Data Existing Rele Tipikal 3**

ID Rele	CT Rasio	Setting	
		Curve Type	Curve 2
RCEP01	200/5	<i>Overcurrent</i>	
		<i>Pickup Range x FLA</i>	1,05 – 8
		<i>Pickup Lowset</i>	1,5
		<i>Time dial</i>	-
		<i>Instantaneous</i>	
		<i>Pickup Range x FLA</i>	4-12
		<i>Pickup Highset</i>	11
		<i>Time delay</i>	0,05
RXSST01B	3000/5	<i>Curve Type</i>	<i>VI-Very Inverse</i>
		<i>Overcurrent</i>	
		<i>Pickup Range Sec</i>	0,5 – 9,99
		<i>Pickup Lowset</i>	5
		<i>Time dial</i>	1,5
		<i>Instantaneous</i>	
		<i>Pickup Range Sec</i>	10 – 99,9
		<i>Pickup Highset</i>	75
		<i>Time delay</i>	0

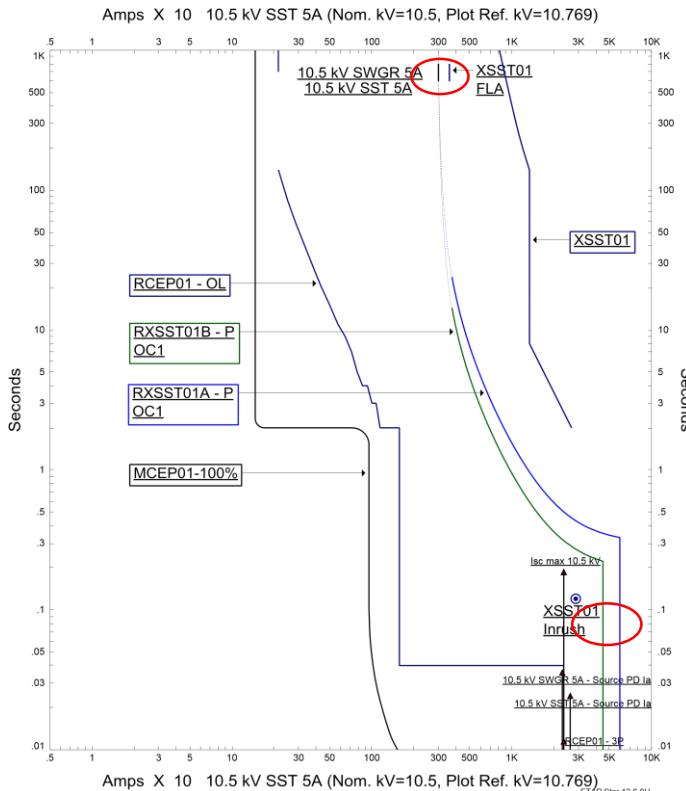
**Tabel 4.12 Data Existing Rele Tipikal 3 (lanjutan)**

ID Rele	CT Ratio	Setting	
RXSST01A	3000/5	<i>Curve Type</i>	<i>Very Inverse</i>
		<i>Overcurrent</i>	
		<i>Pickup Range Sec</i>	0,5 – 9,99
		<i>Pickup Lowset</i>	5
		<i>Time dial</i>	2,5
		<i>Instantaneous</i>	
		<i>Pickup Range Sec</i>	10 – 99,9
		<i>Pickup Highset</i>	99
		<i>Time delay</i>	0



**Gambar 4.7 Single Line Diagram Tipikal 3**

Sebelum melakukan *resetting* rele pengaman, pertama yang harus dilakukan adalah analisis pada kurva TCC (*Time Current Curve*) sesuai standar IEEE 242-2001. Dalam analisis kurva TCC, maka dilakukan *plotting* pada *Single Line Diagram* Tipikal 3 pada kondisi *existing*. Gambar 4.9 merupakan *Time Current Curve* Tipikal 3 pada kondisi *existing*.



**Gambar 4.8 Plot Existing Rele Gangguan Fasa Tipikal 3**

Dari hasil *plot* kurva pengaman *existing* tipikal 3 terdapat beberapa koordinasi yang kurang tepat yaitu:

1. Pada kurva *instantaneous* rele RXSST01A dan RXSST01B dan RXUST01 tidak mempunyai *time delay*. Dalam hal ini tidak sesuai

dengan standar IEEE 242-2001 dan apabila terjadi gangguan hubung singkat mengakibatkan *trip* dalam waktu yang lama sesuai dengan besar arus gangguannya.

- Pada kurva rele RXSST01A arus *pickup* nya berada disebelah kiri FLA trafo yang diamankan. Dalam hal ini tidak diperbolehkan karena dapat menyebabkan rele merasakan arus gangguan dan memerintahkan CB untuk *open* sehingga trafo XSST01 tidak dapat bekerja.

Selanjutnya akan dilakukan *resetting* pada Tipikal 1 dengan melakukan perhitungan manual. Berikut perhitungan manual yang telah dilakukan.

### **Rele RCEP01**

**Tabel 4.14** Data Setting Rele Motor RCEP01

<b>RCEP01</b>	
Manufaktur	<i>General Electric</i>
Model	Multilin 269 Plus
Kurva	<i>Curve 2</i>
Rasio CT	200/5
FLA Motor CEP	147 A
LRC Motor	650 %
I Starting Motor	955,5 A
Isc Max Kontribusi Bus 10,5 kV	24.208 kA
Isc Min Kontribusi Bus 10,5 kV	20.914 kA

### **Thermal**

Dipilih:

$\text{Tap} = 1,5$  (sesuai GE Multilin *Standard Curve Number*)

$$I_{\text{set}} = 1,5 \times \text{FLA} = 1,5 \times 147 = 220,5 \text{ A}$$

### **Instantaneous Pickup**

$I_{\text{start motor}} < I_{\text{set}} < 0,8 \times \text{Isc Min Kontribusi } 3,3 \text{ kV}$

$$955,5 < I_{\text{set}} < 0,8 \times 20914$$

$$955,5 < I_{\text{set}} < 16731,2$$

$$\frac{955,5}{147} < \text{Tap} < \frac{16731,2}{147}$$

$$6,5 < \text{Tap} < 113,82$$

Dipilih:

$$\text{Tap} = 11$$

$$I_{\text{set}} = 11 \times 147 = 1617 \text{ A}$$

### **Time Delay**

Dipilih *time delay* = 0,1 detik

### **Rele RXSST01B**

**Tabel 4.15** Data Setting Rele RXSST01B

<b>RXSST01B</b>	
Manufaktur	<i>Basler Electric</i>
Model	BE1-1051
Kurva	<i>Very Inverse (V1)</i>
Rasio CT	3000/5
FLA Sekunder XSST01	3684 A
Isc Max Kontribusi Bus 10,5 kV	27,538 kA
Isc Min Kontribusi Bus 10,5 kV	23,849 kA

### **Time Overcurrent Pickup**

$$1,05 \times \text{FLA Sekunder XSST01} < I_{\text{set}} < 1,4 \times \text{FLA Sekunder XSST01}$$

$$1,05 \times 3684 < I_{\text{set}} < 1,4 \times 3684$$

$$3868,2 < I_{\text{set}} < 5157,6$$

$$\frac{3868,2}{3000/5} < \text{Tap} < \frac{5157,6}{3000/5}$$

$$6,45 < \text{Tap} < 8,59$$

Dipilih:

$$\text{Tap} = 7,3$$

$$I_{\text{set}} = 27,3 \times \frac{3000}{5} = 4380 \text{ A}$$

### **Time Dial**

Dipilih waktu operasi (*t*) = 0,3 detik

$$t - K$$

$$D = \frac{A}{\left( \frac{I}{I_{\text{set}}}^N - C \right)} + B$$

$$D = \frac{0,3 - 0,028}{\left( \frac{5,4678}{(27538)^{2,0469}} - 1 \right)} + 0,10814$$

$$D = 1,14$$

$D \geq 1,14$  dipilih  $D = 1,15$  (Range 0,5 – 9,99 dengan step 0,01)

### Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA Sekunder XSST01} < I_{\text{set}}$$

$$< 0,8 \times I_{\text{sc}} \text{ Min Kontribusi } 10,5 \text{ kV}$$

$$1,6 \times 3684 < I_{\text{set}} < 0,8 \times 23849$$

$$5894,4 < I_{\text{set}} < 19079,2$$

$$\frac{5894,4}{3000/5} < \text{Tap} < \frac{19079,2}{3000/5}$$

$$9,82 < \text{Tap} < 31,79$$

Dipilih:

$$\text{Tap} = 20$$

$$I_{\text{set}} = 20 \times \frac{3000}{5} = 12000 \text{ A}$$

### Time Delay

Dipilih time delay = 0,3 detik

### Rele RXSST01A

Tabel 4.16 Data Setting Rele RXSST01A

<b>RXSST01A</b>	
Manufaktur	<i>Basler Electric</i>
Model	BE1-1051
Kurva	<i>Very Inverse (V1)</i>
Rasio CT	3000/5
FLA Sekunder XSST01	3684 A
Isc Max Kontribusi Bus 10,5 kV	27,538 kA
Isc Min Kontribusi Bus 10,5 kV	23,849 kA

### Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA Sekunder XSST01} < I_{\text{set}} < 1,4 \times \text{FLA Sekunder XSST01}$$

$$1,05 \times 3684 < I_{\text{set}} < 1,4 \times 3684$$

$$3868,2 < I_{\text{set}} < 5157,6$$

$$\frac{3868,2}{3000/5} < \text{Tap} < \frac{5157,6}{3000/5}$$

$$6,45 < \text{Tap} < 8,59$$

Dipilih:

$$\text{Tap} = 7,7$$

$$I_{\text{set}} = 7,7 \times \frac{3000}{5} = 4620 \text{ A}$$

### Time Dial

Dipilih waktu operasi ( $t$ ) = 0,5 detik

$$D = \frac{t - K}{\left( \frac{A}{\left( \frac{I}{I_{\text{set}}} \right)^N} - C \right) + B}$$

$$D = \frac{0,5 - 0,028}{\left( \frac{5,4678}{\left( \frac{27538}{4620} \right)^{2,0469}} - 1 \right) + 0,10814}$$

$$D = 1,86$$

$D \geq 1,86$  dipilih  $D = 1,87$  (Range 0,5 – 9,99 dengan step 0,01)

### Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA Sekunder XSST01} < I_{\text{set}}$$

$$< 0,8 \times I_{\text{sc}} \text{ Min Kontribusi } 10,5 \text{ kV}$$

$$1,6 \times 3684 < I_{\text{set}} < 0,8 \times 23849$$

$$5894,4 < I_{\text{set}} < 19079,2$$

$$\frac{5894,4}{3000/5} < \text{Tap} < \frac{19079,2}{3000/5}$$

$$9,82 < \text{Tap} < 31,79$$

Dipilih:

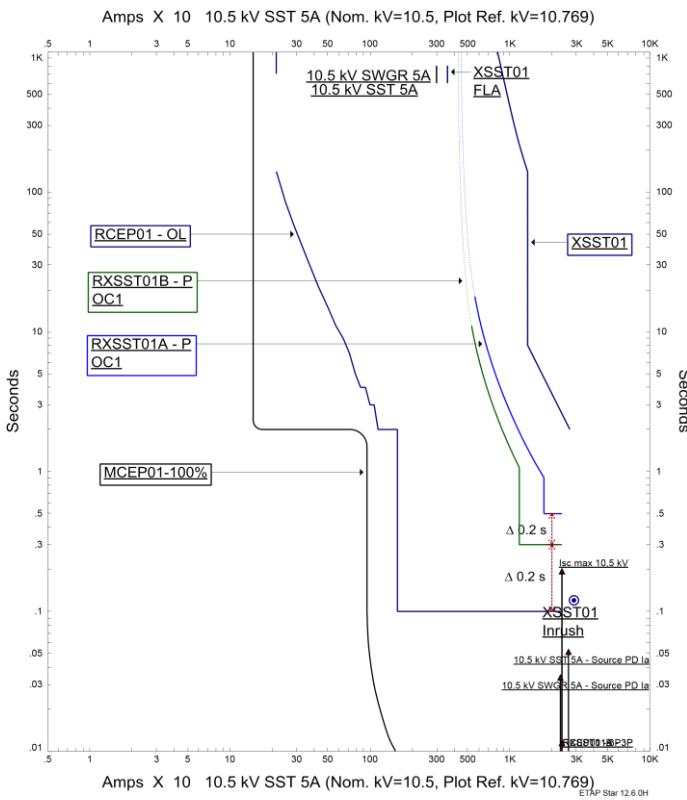
$$\text{Tap} = 30$$

$$I_{\text{set}} = 30 \times \frac{3000}{5} = 18000 \text{ A}$$

### Time Delay

Dipilih time delay = 0,5 detik

Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan, maka didapatkan kurva koordinasi pengaman Tipikal 3 kondisi *restting*. Gambar 4.10 merupakan *Time Current Curve* Tipikal 3 pada kondisi *resetting*.



**Gambar 4.9 Plot Restting Rele Gangguan Fasa Tipikal 3**

Dari hasil *plot* kurva pengaman *resetting* Tipikal 3 dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Rele RCEP01 berfungsi sebagai pelindung motor *Condensate Pump* 01 terhadap arus lebih beban penuh dan arus lebih hubung singkat.
2. Rele RXSST01B berfungsi sebagai *supply* pada bus 10,5 kV SWGR 5A sehingga sistem dapat bekerja. Selain itu rele ini berfungsi juga sebagai *backup* rele RCEP01 apabila motor *Condensate Pump* 01 gagal bekerja. Rele ini berfungsi juga sebagai pelindung bus 10,5 kV SWGR 5A dan 10,5 kV SST 5A, apabila terjadi hubung singkat maksimum pada bus tersebut maka rele ini akan bekerja terlebih dahulu.

3. Rele RXSST01A berfungsi sebagai pelindung trafo XSST01 pada sisi sekunder terhadap arus lebih beban penuh dan arus hubung singkat pada bus 10,5 kV SST 5A. Selain itu rele ini berfungsi sebagai *backup* rele RXSST01B apabila terjadi hubung singkat pada bus 10,5 kV SWGR 5A. Rele ini berfungsi juga sebagai pelindung bus 10,5 kV SST 5A, apabila terjadi hubung singkat maksimum pada bus tersebut maka rele ini akan bekerja terlebih dahulu.
4. *Setting time delay* setiap rele sudah tepat dan *setting gradding time* setiap rele 0,2 detik sesuai standar IEEE 242-2001.

#### **4.5 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan ke Tanah**

Pada sistem kelistrikan koordinasi arus lebih gangguan ke tanah perlu dikoordinasikan untuk mengatasi apabila terjadi hubung singkat satu fasa ke tanah. Nilai arus hubung singkat tersebut sangat dipengaruhi oleh NGR (*Neutral Grounding Resistor*) pada suatu peralatan biasanya terdapat pada trafo dan generator dikarenakan arus hubung singkat ke tanah terbesar adalah sama dengan NGR yang terpasang. Dalam koordinasinya berbeda pada setiap level tegangan dan mempertimbangkan bentuk pentanahannya. Ketika pentanahannya bertemu dengan delta maka *gradding* akan reset 0,1 detik. Pada sistem kelistrikan PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5 terdapat tiga level tegangan yaitu 10,5 kV, 3,3 KV dan 0,4 kV.

**Tabel 4.17** Tegangan dan Pentanahan Peralatan

No	Peralatan	Rating Tegangan	Hubungan Belitan	Pentanahan
1.	XUST01	23/10,5 kV	Delta-Wye	NGR
2.	XUST02	23/10,5 kV	Delta-Wye	NGR
3.	XUST03	10,5/3,3 kV	Delta-Wye	NGR
4.	XUST04	10,5/3,3 kV	Delta-Wye	NGR
5.	XSST01	150/10,5 kV	Delta-Wye	NGR
6.	XSST02	150/10,5 kV	Delta-Wye	NGR
7.	XGT	23/500 kV	Delta-Wye	Solid

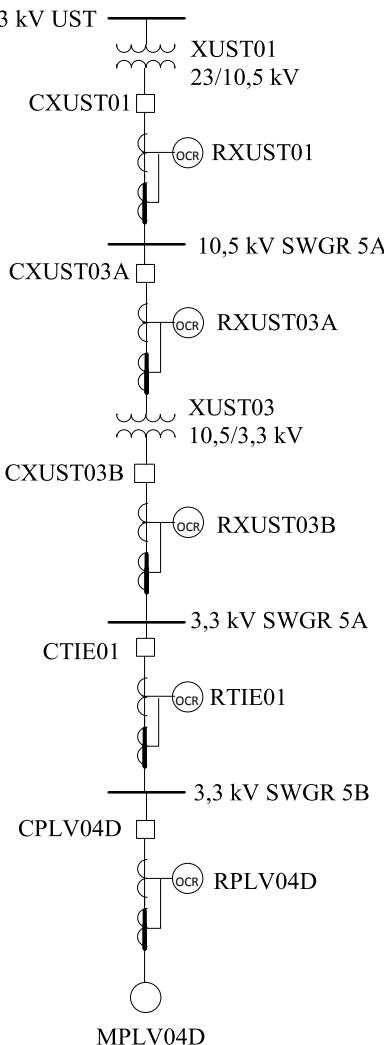
##### **4.5.1 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan ke Tanah Tipikal 1**

Koordinasi rele arus lebih gangguan ke tanah Tipikal 1 dimulai dari beban motor MPLV04D menuju trafo XUST01. Dimana terdapat beberapa rele arus lebih antara lain RPLV04D, RTIE01, RXUST03B,

RXUST03A dan RXUST01. Tipikal ini terdiri dari dua level tegangan yaitu 3,3 kV dan 10,5 kV.

**Tabel 4.18** Data *Existing Rele Ground* Tipikal 1

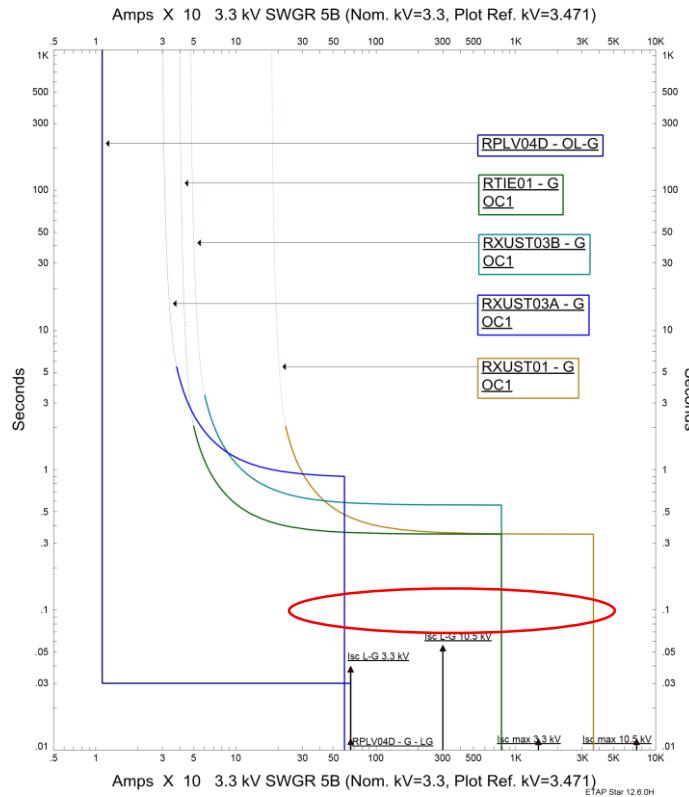
ID	CT Rasio	Setting			
		Definite Time		Instantaneous	
		Pickup	Time Dial	Pickup	Time Delay
RPLV04D	50/5	-	-	0,234	0,03
RTIE01	2000/5	0,1	1,5	19,8	-
RXUST03B	2000/5	0,12	2,5	19,8	-
RXUST03A	50/5	1	4	19,8	-
RXUST01	3000/5	0,1	1,5	19,8	-



**Gambar 4.10** Single Line Diagram Tipikal 1

Sebelum melakukan *resetting* rele pengaman, pertama yang harus dilakukan adalah analisis pada kurva TCC (*Time Current Curve*) sesuai standar IEEE 242-2001. Dalam analisis kurva TCC, maka dilakukan

*plotting* pada *Single Line Diagram* Tipikal 1 pada kondisi *existing*. Gambar 4.12 merupakan *Time Current Curve* Tipikal 1 pada kondisi *existing*.



**Gambar 4.11 Plot Existing Rele Gangguan Fasa ke Tanah Tipikal 1**

Dari hasil *plot* kurva pengaman *existing* tipikal 1 terdapat beberapa koordinasi yang kurang tepat yaitu pada rele RTIE01, RXUST03B, RXUST03A dan RXUST01 tidak mempunyai *time delay*. Dalam hal ini tidak sesuai dengan standar IEEE 242-2001 dikarenakan tidak terdapat *grading time* dan apabila terjadi gangguan hubung singkat ke tanah mengakibatkan *trip* dalam waktu yang lama sesuai dengan besar arus gangguannya.

Selanjutnya akan dilakukan *resetting* pada Tipikal 1 dengan melakukan perhitungan manual. Berikut perhitungan manual yang telah dilakukan

### **Rele RPLV04D**

**Tabel 4.19** Data Setting Rele Motor RPLV04D

<b>RPLV04D</b>	
Manufaktur	<i>General Electric</i>
Model	Multilin 269 Plus
Kurva	-
Rasio CT	50/5 A
NGR	699,9 A

#### **Instantaneous Pickup**

$$5\% - 10\% \times I_{L-G} < I_{set} < 50\% \times I_{L-G}$$

$$5\% \times 699,9 < I_{set} < 50\% \times 699,9$$

$$34,99 < I_{set} < 349,95$$

$$34,99 < \frac{349,95}{50/5} < \frac{349,95}{50/5}$$

$$3,49 < Tap < 34,99$$

Dipilih:

$$Tap = 4$$

$$I_{set} = 4 \times \frac{50}{5} = 40 \text{ A}$$

#### **Time Delay**

Dipilih time delay = 0,1 detik

### **Rele RTIE01**

**Tabel 4.20** Data Setting Rele RTIE01

<b>RTIE01</b>	
Manufaktur	<i>Basler Electric</i>
Model	BE1-1051
Kurva	Definit Time - Instantaneous
Rasio CT	2000/5 A
NGR	699,9 A

### Instantaneous Pickup

$$5\% - 10\% \times I_{L-G} < I_{set} < 50\% \times I_{L-G}$$

$$5\% \times 699,9 < I_{set} < 50\% \times 699,9$$

$$34,99 < I_{set} < 349,95$$

$$\frac{34,99}{2000/5} < Tap < \frac{349,95}{2000/5}$$

$$0,09 < Tap < 0,87$$

Dipilih:

$$Tap = 0,1$$

$$I_{set} = 0,1 \times \frac{2000}{5} = 40 \text{ A}$$

### Time Delay

Dipilih time delay = 0,3 detik

### **Rele RXUST03B**

**Tabel 4.21** Data Setting Rele RXUST03B

<b>RXUST03B</b>	
Manufaktur	<i>Basler Electric</i>
Model	BE1-1051
Kurva	Definit Time - Instantaneous
Rasio CT	2000/5 A
NGR	699,9 A

### Instantaneous Pickup

$$5\% - 10\% \times I_{L-G} < I_{set} < 50\% \times I_{L-G}$$

$$5\% \times 699,9 < I_{set} < 50\% \times 699,9$$

$$34,99 < I_{set} < 349,95$$

$$\frac{34,99}{2000/5} < Tap < \frac{349,95}{2000/5}$$

$$0,09 < Tap < 0,87$$

Dipilih:

$$Tap = 0,1$$

$$I_{set} = 0,1 \times \frac{2000}{5} = 40 \text{ A}$$

### Time Delay

Dipilih time delay = 0,5 detik

### **Rele RXUST03A**

**Tabel 4.22 Data Setting Rele RXUST03A**

<b>RXUST03A</b>	
Manufaktur	<i>Basler Electric</i>
Model	BE1-1051
Kurva	Definit Time - Instantaneous
Rasio CT	50/5 A
NGR	1000 A

#### **Instantaneous Pickup**

$$5\% - 10\% \times I_{L-G} < I_{set} < 50\% \times I_{L-G}$$

$$5\% \times 1000 < I_{set} < 50\% \times 1000$$

$$50 < I_{set} < 500$$

$$\frac{50}{50/5} < Tap < \frac{500}{50/5}$$

$$5 < Tap < 50$$

Dipilih:

$$Tap = 6$$

$$I_{set} = 6 \times \frac{50}{5} = 60 \text{ A}$$

#### **Time Delay**

Dipilih *time delay* = 0,1 detik, karena *grounding* trafo pada sisi primer delta, sehingga *gradding time* rele *ground* reset menjadi 0,1 detik.

### **Rele RXUST01**

**Tabel 4.23 Data Setting Rele RXUST01**

<b>RXUST01</b>	
Manufaktur	<i>Basler Electric</i>
Model	BE1-1051
Kurva	Definit Time - Instantaneous
Rasio CT	3000/5 A
NGR	1000 A

### **Instantaneous Pickup**

$$5\% - 10\% \times I_{L-G} < I_{set} < 50\% \times I_{L-G}$$

$$5\% \times 1000 < I_{set} < 50\% \times 1000$$

$$50 < I_{set} < 500$$

$$\frac{50}{3000/5} < Tap < \frac{500}{3000/5}$$

$$0,083 < Tap < 5,6$$

Dipilih:

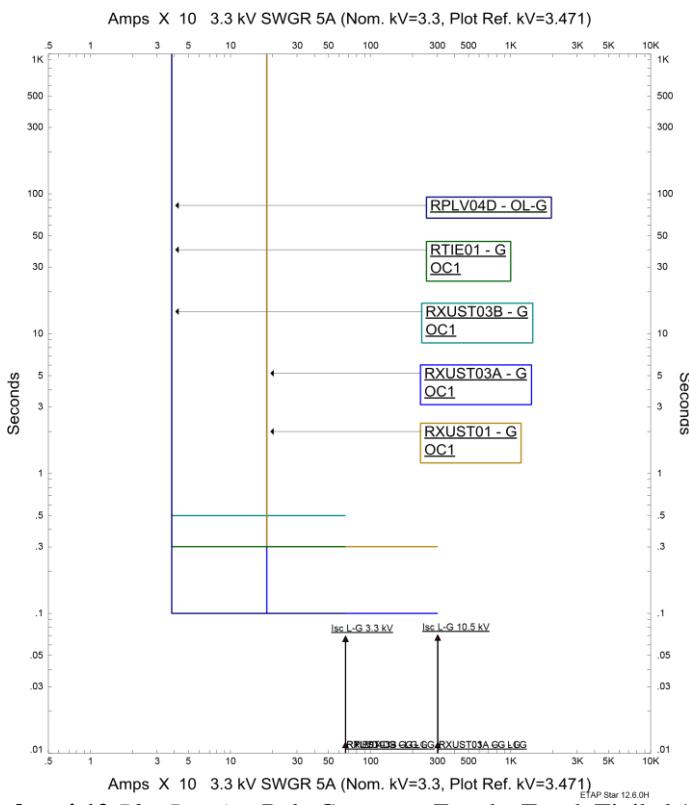
$$Tap = 0,1$$

$$I_{set} = 0,1 \times \frac{3000}{5} = 60 \text{ A}$$

### **Time Delay**

Dipilih time delay = 0,3

Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan, maka didapatkan kurva koordinasi pengaman Tipikal 1 kondisi *restting*. Gambar 4.13 merupakan *Time Current Curve* Tipikal 1 pada kondisi *resetting*.



**Gambar 4.12 Plot Restting Rele Gangguan Fasa ke Tanah Tipikal 1**

Dari hasil *plot* kurva pengaman *resetting* Tipikal 1 dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Rele arus lebih gangguan ke tanah diatur menggunakan rele *instantaneous* saja dan arus hubung singkat dibatasi oleh NGR sebesar 699,99 A pada tegangan 3,3 kV dan 1000 A pada tegangan 10,5 kV
2. Ketika ada gangguan hubung singkat ke tanah pada tegangan 3,3 kV, maka rele RPLV04D akan mendeteksi gangguan pada wktu 0,1 detik dan CB CPLV04D *trip* pada waktu 0,2 detik. Selanjutnya rele RTIE01 akan mendeteksi gangguan pada waktu 0,3 detik dan CB CBUSTIE *trip* pada waktu 0,4. Setelah itu rele RXUST03B akan mendeteksi gangguan 0,5 detik dan CB CXUST03B *trip* pada waktu 0,6 detik. Begitu pula dengan rele yang lainnya apabila gangguan hubung

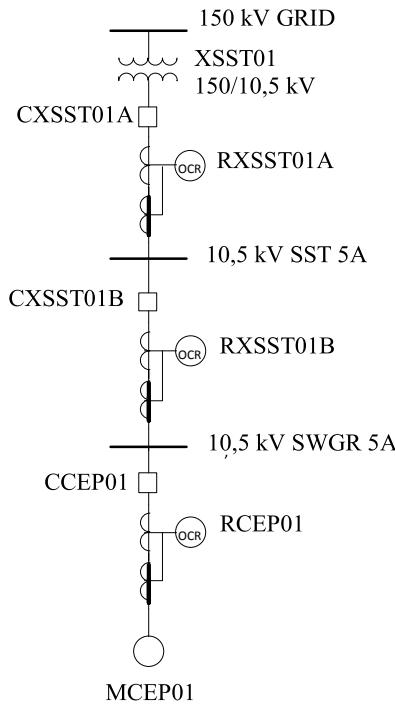
singkat ke tanah pada level tegangan 10,5 kV. Sehingga pengaturan *gradding time* antara rele adalah sebesar 0,2 detik sesuai dengan standar IEEE 242-2001.

#### **4.5.2 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan ke Tanah Tipikal 3**

Koordinasi rele arus lebih gangguan ke tanah Tipikal 2 dimulai dari beban motor MPEP01 menuju trafo XSST01. Dimana terdapat beberapa rele arus lebih antara lain RCEP01, RXSST01B dan RXSST01A. Tipikal ini terdiri dari satu level tegangan yaitu 10,5 kV.

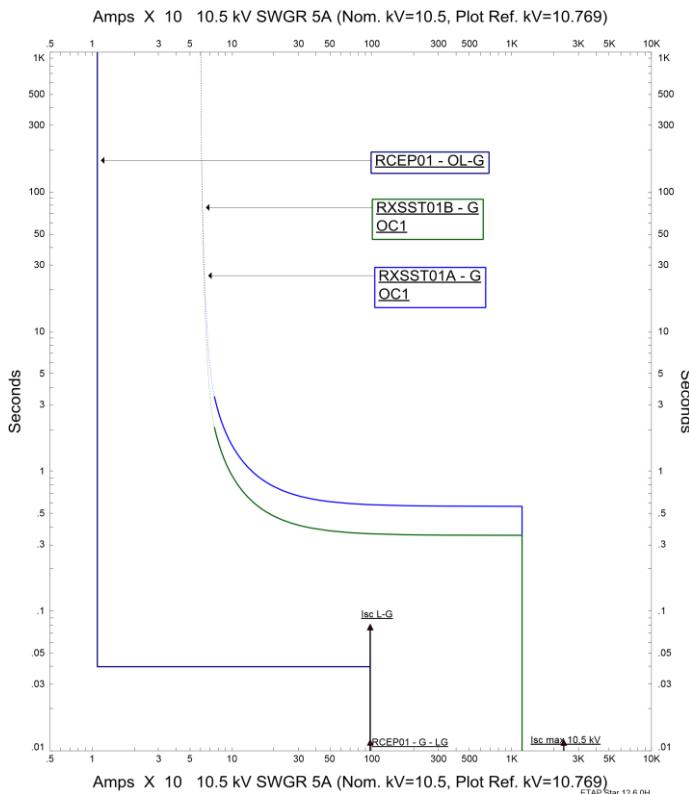
**Tabel 4.24** Data Existing Rele Ground Tipikal 3

ID	CT Rasio	Setting			
		Definite Time		Instantaneous	
		Pickup	Time Dial	Pickup	Time Delay
RCEP01	50/5	-	-	0,224	0,04
RXSST01B	3000/5	0,1	1,5	19,8	-
RXSST01A	3000/5	0,1	2,5	19,8	-



**Gambar 4.13** Single Line Diagram Tipikal 3

Sebelum melakukan *resetting* rele pengaman, pertama yang harus dilakukan adalah analisis pada kurva TCC (*Time Current Curve*) sesuai standar IEEE 242-2001. Dalam analisis kurva TCC, maka dilakukan *plotting* pada *Single Line Diagram* Tipikal 3 pada kondisi *existing*. Gambar 4.15 merupakan *Time Current Curve* Tipikal 3 pada kondisi *existing*.



**Gambar 4.14 Plot Existing Rele Gangguan Fasa ke Tanah Tipikal 3**

Dari hasil *plot* kurva pengaman *existing* tipikal 2 terdapat beberapa koordinasi yang kurang tepat yaitu pada rele RPLV04D tidak mempunyai *time delay*. Dalam hal ini tidak sesuai dengan standar IEEE 242-2001 dikarenakan tidak terdapat *grading time* dan apabila terjadi gangguan hubung singkat ke tanah mengakibatkan *trip* dalam waktu yang lama sesuai dengan besar arus gangguannya.

Selanjutnya akan dilakukan *resetting* pada Tipikal 3 dengan melakukan perhitungan manual. Berikut perhitungan manual yang telah dilakukan

### **Rele RCEP01**

**Tabel 4.25** Data Setting Rele Motor RCEP01

<b>RPCEP01</b>	
Manufaktur	<i>General Electric</i>
Model	Multilin 269 Plus
Kurva	-
Rasio CT	50/5 A
NGR	1000 A

#### **Instantaneous Pickup**

$$5\% - 10\% \times I_{L-G} < I_{set} < 50\% \times I_{L-G}$$

$$5\% \times 1000 < I_{set} < 50\% \times 1000$$

$$50 < I_{set} < 500$$

$$\frac{50}{50/5} < Tap < \frac{500}{50/5}$$

$$5 < Tap < 50$$

Dipilih:

$$Tap = 6$$

$$I_{set} = 6 \times \frac{50}{5} = 60 \text{ A}$$

#### **Time Delay**

Dipilih *time delay* = 0,1 detik

### **Rele RXSST01B**

**Tabel 4.26** Data Setting Rele RXSST01B

<b>RTIE01</b>	
Manufaktur	<i>Basler Electric</i>
Model	BE1-1051
Kurva	Definit Time - Instantaneous
Rasio CT	3000/5 A
NGR	1000 A

#### **Instantaneous Pickup**

$$5\% - 10\% \times I_{L-G} < I_{set} < 50\% \times I_{L-G}$$

$$5\% \times 1000 < I_{set} < 50\% \times 1000$$

$$50 < I_{set} < 500$$

$$\frac{50}{3000/5} < \text{Tap} < \frac{500}{3000/5}$$

$$0,083 < \text{Tap} < 5,6$$

Dipilih:

$$\text{Tap} = 0,1$$

$$I_{\text{set}} = 0,1 \times \frac{3000}{5} = 60 \text{ A}$$

### Time Delay

Dipilih *time delay* = 0,3 detik

### **Rele RXSST01A**

Tabel 4.27 Data Setting Rele RXSST01A

<b>RXSST01A</b>	
Manufaktur	<i>Basler Electric</i>
Model	BE1-1051
Kurva	Definit Time - Instantaneous
Rasio CT	3000/5 A
NGR	1000 A

### Instantaneous Pickup

$$5\% - 10\% \times I_{L-G} < I_{\text{set}} < 50\% \times I_{L-G}$$

$$5\% \times 1000 < I_{\text{set}} < 50\% \times 1000$$

$$50 < I_{\text{set}} < 500$$

$$\frac{50}{3000/5} < \text{Tap} < \frac{500}{3000/5}$$

$$0,083 < \text{Tap} < 5,6$$

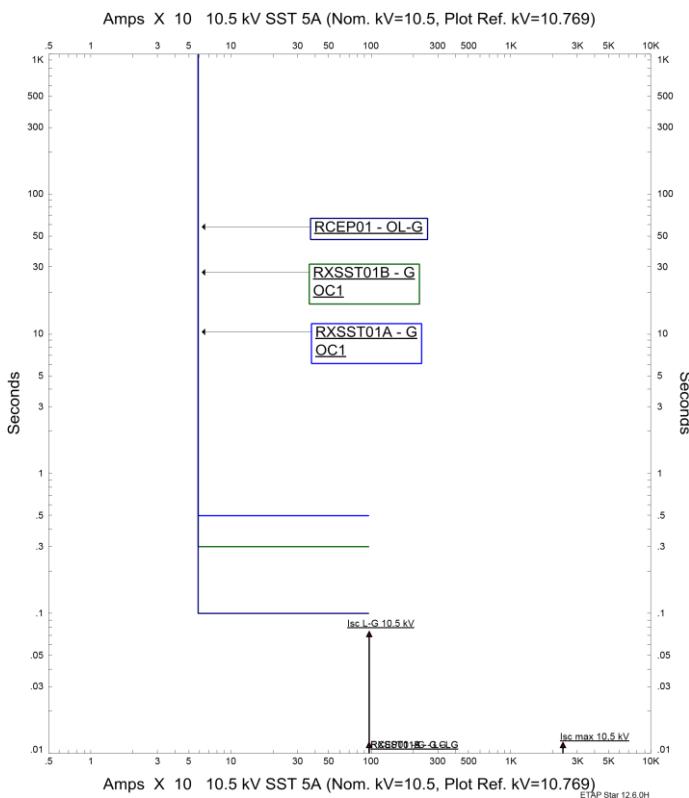
Dipilih:

$$\text{Tap} = 0,1$$

$$I_{\text{set}} = 0,1 \times \frac{3000}{5} = 60 \text{ A}$$

### Time Delay

Dipilih *time delay* = 0,5 deti



**Gambar 4.15 Plot Restting Rele Gangguan Fasa ke Tanah Tipikal 3**

Dari hasil *plot* kurva pengaman *resetting* Tipikal 3 dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Rele arus lebih gangguan ke tanah diatur menggunakan rele *instantaneous* saja dan arus hubung singkat dibatasi oleh NGR sebesar 1000 A pada tegangan 10,5 kV
2. Ketika ada gangguan hubung singkat ke tanah pada tegangan 10,5 kV, maka rele RCEP01 akan mendeteksi gangguan pada waktu 0,1 detik dan CB CCEP01 *trip* pada waktu 0,2 detik. Selanjutnya rele RXSST01B akan mendeteksi gangguan pada waktu 0,3 detik dan CB CXSST01B *trip* pada waktu 0,4. Setelah itu rele RXSST01A akan mendeteksi gangguan 0,5 detik dan CB CXSST01A *trip* pada waktu

0,6 detik. Sehingga pengaturan *gradding time* antara rele adalah sebesar 0,2 detik sesuai dengan standar IEEE 242-2001.

## 4.6 Perhitungan Energi Busur Api Berdasarkan Standar IEEE 1584-2002

Dalam subab ini akan dibahas mengenai besarnya insiden energi busur api dengan menghitung nilai arus *arc fault* secara manual sesuai standar IEEE 1584-2002. Selanjutnya menghitung energi normalisasi dengan konfigurasi box dan tipe sistem *grounded*. Setelah mengitung kedua parameter, maka dapat diperoleh besar insiden energi busur api. Gap konduktor yang digunakan menggunakan standar IEEE 1584-2002 yaitu tegangan 10,5 kV sebesar 153 mm, tegangan 3,3 kV sebesar 102 mm dan tegangan 0,4 kV sebesar 25 mm

### 4.6.1 Perhitungan Energi Busur Api Kondisi *Existing*

Dalam subbab ini merupakan hasil simulasi insiden energi busur api pada kondisi *existing* dengan beberapa operasi sistem kelistrikan. Tabel 4.27 merupakan data hasil simulasi insiden energi busur api pada kondisi *existing*

**Tabel 4.28** Data Hasil Simulasi Energi Busur api Kondisi *Existing*

ID Bus	Gap (mm)	Ibf (kA)	Ia (kA)	FCT (detik)	Inc. Level (cal/cm <sup>2</sup> )	Level Energi
0,4 kV ASH SWGR 5A	25	15,731	8,387	0,46	12,629	2
0,4 kV ASH SWGR 5B	25	15,731	8,387	0,46	12,629	2

**Tabel 4.28** Data Hasil Simulasi Energi Busur api Kondisi *Existing* (lanjutan)

ID Bus	Gap (mm)	Ibf (kA)	Ia (kA)	FCT (detik)	Inc. Level (cal/cm <sup>2</sup> )	Level Energi
0,4 kV BLR SWGR 5A	25	55,456	23,257	0,46	38,037	3
0,4 kV BLR SWGR 5B	25	55,456	23,258	0,46	38,039	3
0,4 kV CWL SWGR 5A	25	55,456	23,257	0,46	38,037	3
0,4 kV PCP SWGR 5A	25	42,137	18,620	0,46	29,90	3
0,4 kV PCP SWGR 5B	25	42,139	18,621	0,46	29,911	3
0,4 kV TRB SWGR 5A	25	55,456	23,257	0,46	38,037	3

**Tabel 4.28** Data Hasil Simulasi Energi Busur api Kondisi *Existing* (lanjutan)

ID Bus	Gap (mm)	Ibf (kA)	Ia (kA)	FCT (detik)	Inc. Level (cal/cm <sup>2</sup> )	Level Energi
0,4 kV TRB SWGR 5B	25	55,460	23,258	0,46	38,039	3
0,4 kV AUI SWGR 5B	25	55,460	23,258	0,46	38,039	3
3,3 kV SWGR 5A	102	19,553	18,763	0,625	13,939	2
3,3 kV SWGR 5B	102	19,732	18,931	0,625	14,076	2
10,5 kV SST 5A	153	27,538	26,271	0,561	20,508	2
10,5 kV SST 5B	153	27,538	26,271	0,561	20,508	2

**Tabel 4.28** Data Hasil Simulasi Energi Busur api Kondisi *Existing* (lanjutan)

ID Bus	Gap (mm)	Ibf (kA)	Ia (kA)	FCT (detik)	Inc. Level (cal/cm <sup>2</sup> )	Level Energi
10,5 kV SWGR 5A	153	31,627	30,101	0,515	21,814	2
10,5 kV SWGR 5B	153	31,667	30,138	0,515	21,843	2

Berikut adalah perhitungan semua *bus* yang dianalisis:

- a. Perhitungan energi busur api di *bus* dengan level tegangan dibawah 1 kV (*bus* 0,4 kV)

#### **Bus 0,4 kV ASH SWGR 5A**

Perhitungan arus arceng (Ia)

$$\log(I_a) = K + 0,662 \log(I_{bf}) + 0,0966V + 0,000526G + \\ 0,5588V(\log I_{bf}) - 0,00304G(\log I_{bf})$$

$$\log(I_a) = -0,097 + (0,662 \log(15,731)) + (0,0966 \times 0,4) + \\ (0,000526 \times 25) + (0,5588 \times 0,4(\log(15,731))) - \\ (0,00304 \times 25 \times (\log(15,731)))$$

$$\log(I_a) = 0,924 \quad I_a = 8,387 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi (E<sub>n</sub>):

$$E_n = 10^{K_1+K_2+(1,081 \times \log(I_a))+(0,0011 \times G)}$$

$$E_n = 10^{-0,555+(-0,113)+(1,081 \times 0,924)+(0,0011 \times 25)}$$

$$E_n = 2,280 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1,5 \times 2,280 \times \left(\frac{0,46}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{1,641}}{455^{1,641}}\right)$$

Incident Energy = 53,240 J/cm<sup>2</sup>

Incident Energy = 53,240 × 0,2388

Incident Energy = 12,714 cal/cm<sup>2</sup>

### **Bus 0,4 kV ASH SWGR 5B**

Perhitungan arus arcing (I<sub>a</sub>)

$$\log(I_a) = K + 0,662 \log(I_{bf}) + 0,0966V + 0,000526G + 0,5588V(\log I_{bf}) - 0,00304G(\log I_{bf})$$

$$\log(I_a) = -0,097 + (0,662 \log(15,731)) + (0,0966 \times 0,4) + (0,000526 \times 25) + (0,5588 \times 0,4(\log(15,731))) - (0,00304 \times 25 \times (\log(15,731)))$$

$$\log(I_a) = 0,924 \quad I_a = 8,387 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi (E<sub>n</sub>):

$$E_n = 10^{K_1+K_2+(1,081 \times \log(I_a))+(0,0011 \times G)}$$

$$E_n = 10^{-0,555+(-0,113)+(1,081 \times 0,924)+(0,0011 \times 25)}$$

$$E_n = 2,280 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1,5 \times 2,280 \times \left(\frac{0,46}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{1,641}}{455^{1,641}}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 53,240 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 53,240 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 12,714 \text{ cal/cm}^2$$

### **Bus 0,4 kV BLR SWGR 5A**

Perhitungan arus arcing (I<sub>a</sub>)

$$\log(I_a) = K + 0,662 \log(I_{bf}) + 0,0966V + 0,000526G + 0,5588V(\log I_{bf}) - 0,00304G(\log I_{bf})$$

$$\log(I_a) = -0,097 + (0,662 \log(55,456)) + (0,0966 \times 0,4) + (0,000526 \times 25) + (0,5588 \times 0,4(\log(55,456))) - (0,00304 \times 25 \times (\log(55,456)))$$

$$\log(I_a) = 1,367 \quad I_a = 23,257 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi (E<sub>n</sub>):

$$E_n = 10^{K_1+K_2+(1,081 \times \log(I_a))+(0,0011 \times G)}$$

$$E_n = 10^{-0,555+(-0,113)+(1,081 \times 1,367)+(0,0011 \times 25)}$$

$$E_n = 6,867 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1,5 \times 6,867 \times \left( \frac{0,46}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{1,641}}{455^{1,641}} \right)$$

$$\text{Incident Energy} = 160,355 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 160,355 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 38,293 \text{ cal/cm}^2$$

### **Bus 0,4 kV BLR SWGR 5B**

Perhitungan arus arcing (Ia)

$$\log(I_a) = K + 0,662 \log(I_{bf}) + 0,0966V + 0,000526G + \\ 0,5588V(\log I_{bf}) - 0,00304G(\log I_{bf})$$

$$\log(I_a) = -0,097 + (0,662 \log(55,456)) + (0,0966 \times 0,4) + \\ (0,000526 \times 25) + (0,5588 \times 0,4(\log(55,456))) - \\ (0,00304 \times 25 \times (\log(55,456)))$$

$$\log(I_a) = 1,367 \quad I_a = 23,257 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi (E<sub>n</sub>):

$$E_n = 10^{K1+K2+(1,081 \times \log(I_a))+(0,0011 \times G)}$$

$$E_n = 10^{-0,555+(-0,113)+(1,081 \times 1,367)+(0,0011 \times 25)}$$

$$E_n = 6,867 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1,5 \times 6,867 \times \left( \frac{0,46}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{1,641}}{455^{1,641}} \right)$$

$$\text{Incident Energy} = 160,355 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 160,355 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 38,293 \text{ cal/cm}^2$$

### **Bus 0,4 kV CWL SWGR 5B**

Perhitungan arus arcing (Ia)

$$\log(I_a) = K + 0,662 \log(I_{bf}) + 0,0966V + 0,000526G + \\ 0,5588V(\log I_{bf}) - 0,00304G(\log I_{bf})$$

$$\log(I_a) = -0,097 + (0,662 \log(55,456)) + (0,0966 \times 0,4) + \\ (0,000526 \times 25) + (0,5588 \times 0,4(\log(55,456))) - \\ (0,00304 \times 25 \times (\log(55,456)))$$

$$\log(I_a) = 1,367 \quad I_a = 23,257 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi ( $E_n$ ):

$$E_n = 10^{K_1+K_2+(1,081 \times \log(I_a))+(0,0011 \times G)}$$

$$E_n = 10^{-0,555+(-0,113)+(1,081 \times 1,367)+(0,0011 \times 25)}$$

$$E_n = 6,867 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1,5 \times 6,867 \times \left(\frac{0,46}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{1,641}}{455^{1,641}}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 160,355 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 160,355 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 38,293 \text{ cal/cm}^2$$

### **Bus 0,4 kV PCP SWGR 5A**

Perhitungan arus arcing ( $I_a$ )

$$\log(I_a) = K + 0,662 \log(I_{bf}) + 0,0966V + 0,000526G + 0,5588V(\log I_{bf}) - 0,00304G(\log I_{bf})$$

$$\log(I_a) = -0,097 + (0,662 \log(42,137)) + (0,0966 \times 0,4) + (0,000526 \times 25) + (0,5588 \times 0,4(\log(42,137))) - (0,00304 \times 25 \times (\log(42,137)))$$

$$\log(I_a) = 1,270 \quad I_a = 18,620 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi ( $E_n$ ):

$$E_n = 10^{K_1+K_2+(1,081 \times \log(I_a))+(0,0011 \times G)}$$

$$E_n = 10^{-0,555+(-0,113)+(1,081 \times 1,270)+(0,0011 \times 25)}$$

$$E_n = 5,400 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1,5 \times 5,400 \times \left(\frac{0,46}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{1,641}}{455^{1,641}}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 126,095 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 126,095 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 30,111 \text{ cal/cm}^2$$

### **Bus 0,4 kV PCP SWGR 5B**

Perhitungan arus arcing (Ia)

$$\log(I_a) = K + 0,662 \log(I_{bf}) + 0,0966V + 0,000526G + \\ 0,5588V(\log I_{bf}) - 0,00304G(\log I_{bf})$$

$$\log(I_a) = -0,097 + (0,662 \log(42,139)) + (0,0966 \times 0,4) + \\ (0,000526 \times 25) + (0,5588 \times 0,4(\log(42,139))) - \\ (0,00304 \times 25 \times (\log(42,139)))$$

$$\log(I_a) = 1,270 \quad I_a = 18,621 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi ( $E_n$ ):

$$E_n = 10^{K_1+K_2+(1,081 \times \log(I_a))+(0,0011 \times G)}$$

$$E_n = 10^{-0,555+(-0,113)+(1,081 \times 1,270)+(0,0011 \times 25)}$$

$$E_n = 5,400 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1,5 \times 5,400 \times \left(\frac{0,46}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{1,641}}{455^{1,641}}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 126,100 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 126,100 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 30,113 \text{ cal/cm}^2$$

### **Bus 0,4 kV TRB SWGR 5A**

Perhitungan arus arcing (Ia)

$$\log(I_a) = K + 0,662 \log(I_{bf}) + 0,0966V + 0,000526G + \\ 0,5588V(\log I_{bf}) - 0,00304G(\log I_{bf})$$

$$\log(I_a) = -0,097 + (0,662 \log(55,456)) + (0,0966 \times 0,4) + \\ (0,000526 \times 25) + (0,5588 \times 0,4(\log(55,456))) - \\ (0,00304 \times 25 \times (\log(55,456)))$$

$$\log(I_a) = 1,367 \quad I_a = 23,257 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi ( $E_n$ ):

$$E_n = 10^{K_1+K_2+(1,081 \times \log(I_a))+(0,0011 \times G)}$$

$$E_n = 10^{-0,555+(-0,113)+(1,081 \times 1,367)+(0,0011 \times 25)}$$

$$E_n = 6,867 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1,5 \times 6,867 \times \left( \frac{0,46}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{1,641}}{455^{1,641}} \right)$$

$$\text{Incident Energy} = 160,355 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 160,355 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 38,293 \text{ cal/cm}^2$$

### **Bus 0,4 kV TRB SWGR 5B**

Perhitungan arus arcing (Ia)

$$\log(I_a) = K + 0,662 \log(I_{bf}) + 0,0966V + 0,000526G + \\ 0,5588V(\log I_{bf}) - 0,00304G(\log I_{bf})$$

$$\log(I_a) = -0,097 + (0,662 \log(55,460)) + (0,0966 \times 0,4) + \\ (0,000526 \times 25) + (0,5588 \times 0,4(\log(55,460))) - \\ (0,00304 \times 25 \times (\log(55,460)))$$

$$\log(I_a) = 1,367 \quad I_a = 23,258 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi (E<sub>n</sub>):

$$E_n = 10^{K_1+K_2+(1,081 \times \log(I_a))+(0,0011 \times G)}$$

$$E_n = 10^{-0,555+(-0,113)+(1,081 \times 1,367)+(0,0011 \times 25)}$$

$$E_n = 6,867 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1,5 \times 6,867 \times \left( \frac{0,46}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{1,641}}{455^{1,641}} \right)$$

$$\text{Incident Energy} = 160,365 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 160,365 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 38,295 \text{ cal/cm}^2$$

### **Bus 0,4 kV AUI SWGR 5B**

Perhitungan arus arcing (Ia)

$$\log(I_a) = K + 0,662 \log(I_{bf}) + 0,0966V + 0,000526G + \\ 0,5588V(\log I_{bf}) - 0,00304G(\log I_{bf})$$

$$\log(I_a) = -0,097 + (0,662 \log(55,460)) + (0,0966 \times 0,4) + \\ (0,000526 \times 25) + (0,5588 \times 0,4(\log(55,460))) - \\ (0,00304 \times 25 \times (\log(55,460)))$$

$$\log(I_a) = 1,367 \quad I_a = 23,258 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi (E<sub>n</sub>):

$$E_n = 10^{K_1+K_2+(1,081 \times \log(I_a))+(0,0011 \times G)}$$

$$E_n = 10^{-0,555 + (-0,113) + (1,081 \times 1,367) + (0,0011 \times 25)}$$

$$E_n = 6,867 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1,5 \times 6,867 \times \left(\frac{0,46}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{1,641}}{455^{1,641}}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 160,365 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 160,365 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 38,295 \text{ cal/cm}^2$$

- b. Perhitungan energi busur api di *bus* dengan level tegangan 1 - 15 kV (*bus* 3,3 kV dan *bus* 10,5 kV)

### **Bus 3,3 kV SWGR 5A**

Perhitungan arus arcing (Ia)

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_{bf})$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(19,553)$$

$$\log(I_a) = 1,273 \quad I_a = 18,762 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi (E<sub>n</sub>):

$$E_n = 10^{K_1 + K_2 + (1,081 \times \log(I_a)) + (0,0011 \times G)}$$

$$E_n = 10^{-0,555 + (-0,113) + (1,081 \times 1,273) + (0,0011 \times 102)}$$

$$E_n = 6,616 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1 \times 6,616 \times \left(\frac{0,625}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 58,619 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 58,619 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 13,998 \text{ cal/cm}^2$$

### **Bus 3,3 kV SWGR 5B**

Perhitungan arus arcing (Ia)

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_{bf})$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(19,732)$$

$$\log(I_a) = 1,277 \quad I_a = 18,931 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi ( $E_n$ ):

$$E_n = 10^{K_1+K_2+(1,081 \times \log(I_a))+(0,0011 \times G)}$$

$$E_n = 10^{-0,555+(-0,113)+(1,081 \times 1,277)+(0,0011 \times 102)}$$

$$E_n = 6,681 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1 \times 6,681 \times \left(\frac{0,625}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 59,189 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 59,189 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 14,134 \text{ cal/cm}^2$$

### **Bus 10,5 kV SST 5A**

Perhitungan arus arcing (I<sub>a</sub>)

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_{bf})$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(27,538)$$

$$\log(I_a) = 1,419 \quad I_a = 26,271 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi ( $E_n$ ):

$$E_n = 10^{K_1+K_2+(1,081 \times \log(I_a))+(0,0011 \times G)}$$

$$E_n = 10^{-0,555+(-0,113)+(1,081 \times 1,419)+(0,0011 \times 153)}$$

$$E_n = 10,833 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1 \times 10,833 \times \left(\frac{0,561}{0,2}\right)$$

$$\times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 86,150 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 86,150 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 20,573 \text{ cal/cm}^2$$

### **Bus 10,5 kV SST 5B**

Perhitungan arus arcing (I<sub>a</sub>)

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_{bf})$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(27,538)$$

$$\log(I_a) = 1,419 \quad I_a = 26,271 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi ( $E_n$ ):

$$E_n = 10^{K1+K2+(1,081 \times \log(I_a))+(0,0011 \times G)}$$

$$E_n = 10^{-0,555 + (-0,113) + (1,081 \times 1,419) + (0,0011 \times 153)}$$

$$E_n = 10,833 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$\begin{aligned} \text{Incident Energy} &= 4,184 \times 1 \times 10,833 \times \left( \frac{0,561}{0,2} \right) \\ &\quad \times \left( \frac{610^{0,973}}{910^{0,973}} \right) \end{aligned}$$

$$\text{Incident Energy} = 86,150 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 86,150 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 20,573 \text{ cal/cm}^2$$

### **Bus 10,5 kV SWGR 5A**

Perhitungan arus arcing (Ia)

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_{bf})$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(31,627)$$

$$\log(I_a) = 1,479 \quad I_a = 30,101 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi ( $E_n$ ):

$$E_n = 10^{K1+K2+(1,081 \times \log(I_a))+(0,0011 \times G)}$$

$$E_n = 10^{-0,555 + (-0,113) + (1,081 \times 1,479) + (0,0011 \times 153)}$$

$$E_n = 12,550 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$\begin{aligned} \text{Incident Energy} &= 4,184 \times 1 \times 12,550 \times \left( \frac{0,515}{0,2} \right) \\ &\quad \times \left( \frac{610^{0,973}}{910^{0,973}} \right) \end{aligned}$$

$$\text{Incident Energy} = 91,620 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 91,620 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 21,879 \text{ cal/cm}^2$$

### **Bus 10,5 kV SWGR 5B**

Perhitungan arus arcing (I<sub>a</sub>)

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_{bf})$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(31,667)$$

$$\log(I_a) = 1,479 \quad I_a = 30,138 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi (E<sub>n</sub>):

$$E_n = 10^{K_1+K_2+(1,081 \times \log(I_a))+(0,0011 \times G)}$$

$$E_n = 10^{-0,555+(-0,113)+(1,081 \times 1,479)+(0,0011 \times 153)}$$

$$E_n = 12,567 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1 \times 12,567 \times \left(\frac{0,515}{0,2}\right)$$

$$\times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 91,743 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 91,743 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 21,908 \text{ cal/cm}^2$$

Tabel 4.28 merupakan hasil perbandingan arus *arching* dan isiden level antara perhitungan manual dengan simulasi energi busur api kondisi *existing*.

**Tabel 4.29** Data Hasil Perbandingan Perhitungan Manual dengan Simulasi Energi Busur api Kondisi *Existing*.

ID Bus	Existing Simulasi		Existing Manual	
	I Arcing (kA)	Incident Level (cal/cm <sup>2</sup> )	I Arcing (kA)	Incident Level (cal/cm <sup>2</sup> )
0,4 kV ASH SWGR 5A	8,387	12,629	8,387	12,714
0,4 kV ASH SWGR 5B	8,387	12,629	8,387	12,714
0,4 kV BLR SWGR 5A	23,257	38,037	23,257	38,293
0,4 kV BLR SWGR 5B	23,258	38,039	23,257	38,293
0,4kV CWL SWGR 5A	23,257	38,037	23,257	38,293
0,4 kV PCP SWGR 5A	18,620	29,900	18,620	30,111
0,4 kV PCP SWGR 5B	18,621	29,911	18,621	30,113
0,4 kV TRB SWGR 5A	23,257	38,037	23,257	38,293

**Tabel 4.29** Data Hasil Perbandingan Perhitungan Manual dengan Simulasi Energi Busur api Kondisi *Existing* (lanjutan)

ID Bus	Existing Simulasi		Existing Manual	
	I Arcing (kA)	Incident Level (cal/cm <sup>2</sup> )	I Arcing (kA)	Incident Level (cal/cm <sup>2</sup> )
0,4 kV PCP SWGR 5B	18,621	29,911	18,621	30,113
0,4 kV TRB SWGR 5A	23,257	38,037	23,257	38,293
0,4 kV TRB SWGR 5B	23,258	38,039	23,258	38,295
0,4 kV AUI SWGR 5B	23,258	38,039	23,258	38,295
3,3 kV SWGR 5A	18,763	13,939	18,762	13,998
3,3 kV SWGR 5B	18,931	14,076	18,931	14,134
10,5 kV SST 5A	26,271	20,508	26,271	20,573
10,5 kV SST 5B	26,271	20,508	26,271	20,573
10,5 kV SWGR 5A	30,101	21,814	30,101	21,879
10,5 kV SWGR 5B	30,138	21,843	30,108	21,908

#### 4.6.2 Perhitungan Energi Busur api Kondisi *Resetting*

Pada subab ini merupakan data hasil simulasi insiden energi busur api pada kondisi *resetting*. Tabel 4.29 merupakan data hasil simulasi insiden energi busur api pada kondisi *resetting*.

**Tabel 4.30** Data Hasil Simulasi Energi Busur api Kondisi *Resetting*

ID Bus	Gap (mm)	Ibf (kA)	Ia (kA)	FCT (detik)	Inc. Level (cal/cm <sup>2</sup> )	Level Energi
0,4 kV ASH SWGR 5A	25	15,730	8,386	0,46	12,628	2
0,4 kV ASH SWGR 5B	25	15,731	8,387	0,46	12,629	2

**Tabel 4.30** Data Hasil Simulasi Energi Busur api Kondisi *Resetting*

ID Bus	Gap (mm)	Ibf (kA)	Ia (kA)	FCT (detik)	Inc. Level (cal/cm <sup>2</sup> )	Level Energi
0,4 kV TRB SWGR 5B	25	55,452	23,256	0,46	38,035	3
0,4 kV BLR SWGR 5A	25	55,456	23,257	0,46	38,037	3
0,4 kV CWL SWGR 5A	25	55,452	23,256	0,36	28,939	3
0,4 kV PCP SWGR 5A	25	42,134	18,619	0,46	29,909	3
0,4 kV PCP SWGR 5B	25	42,137	18,620	0,46	29,910	3
0,4 kV TRB SWGR 5A	25	55,452	23,256	0,46	38,035	3
0,4 kV BLR SWGR 5B	25	55,456	23,257	0,46	38,037	3

**Tabel 4.30** Data Hasil Simulasi Energi Busur api Kondisi *Resetting* (lanjutan)

ID Bus	Gap (mm)	Ibf (kA)	Ia (kA)	FCT (detik)	Inc. Level (cal/cm <sup>2</sup> )	Level Energi
0,4 kV AUI SWGR 5B	25	55,456	23,257	0,36	29,768	3
3,3 kV SWGR 5A	102	19,549	18,759	0,6	13,387	2
3,3 kV SWGR 5B	102	19,728	18,927	0,6	13,517	2
10,5 kV SST 5A	153	27,538	26,271	0,6	21,923	2
10,5 kV SST 5B	153	27,538	26,271	0,6	21,923	2
10,5 kV SWGR 5A	153	31,581	30,058	0,4	16,906	2

**Tabel 4.30** Data Hasil Simulasi Energi Busur api Kondisi *Resetting* (lanjutan)

ID Bus	Gap (mm)	Ibf (kA)	Ia (kA)	FCT (detik)	Inc. Level (cal/cm <sup>2</sup> )	Level Energi
10,5 kV SWGR 5B	153	31,621	30,095	0,4	16,928	2

Berikut adalah perhitungan semua *bus* yang dianalisis:

- a. Perhitungan energi busur api di *bus* dengan level tegangan dibawah 1 kV (*bus* 0,4 kV)

### **Bus 0,4 kV ASH SWGR 5A**

Perhitungan arus arcing (Ia)

$$\log(I_a) = K + 0,662 \log(I_{bf}) + 0,0966V + 0,000526G + 0,5588V(\log I_{bf}) - 0,00304G(\log I_{bf})$$

$$\log(I_a) = -0,097 + (0,662 \log(15,730)) + (0,0966 \times 0,4) + (0,000526 \times 25) + (0,5588 \times 0,4(\log(15,730))) - (0,00304 \times 25 \times (\log(15,730)))$$

$$\log(I_a) = 0,924 \quad I_a = 8,386 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi (E<sub>n</sub>):

$$E_n = 10^{K_1+K_2+(1,081 \times \log(I_a))+(0,0011 \times G)}$$

$$E_n = 10^{-0,555+(-0,113)+(1,081 \times 0,924)+(0,0011 \times 25)}$$

$$E_n = 2,280 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1,5 \times 2,280 \times \left(\frac{0,46}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{1,641}}{455^{1,641}}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 53,237 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 53,237 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 12,713 \text{ cal/cm}^2$$

### **Bus 0,4 kV ASH SWGR 5B**

Perhitungan arus arcing (Ia)

$$\log(I_a) = K + 0,662 \log(I_{bf}) + 0,0966V + 0,000526G + \\ 0,5588V(\log I_{bf}) - 0,00304G(\log I_{bf})$$

$$\log(I_a) = -0,097 + (0,662 \log(15,731)) + (0,0966 \times 0,4) + \\ (0,000526 \times 25) + (0,5588 \times 0,4(\log(15,731))) - \\ (0,00304 \times 25 \times (\log(15,731)))$$

$$\log(I_a) = 0,924 \quad I_a = 8,387 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi ( $E_n$ ):

$$E_n = 10^{K_1+K_2+(1,081 \times \log(I_a))+(0,0011 \times G)}$$

$$E_n = 10^{-0,555+(-0,113)+(1,081 \times 0,924)+(0,0011 \times 25)}$$

$$E_n = 2,280 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1,5 \times 2,280 \times \left(\frac{0,46}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{1,641}}{455^{1,641}}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 53,240 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 53,240 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 12,714 \text{ cal/cm}^2$$

### **Bus 0,4 kV BLR SWGR 5A**

Perhitungan arus arcing (Ia)

$$\log(I_a) = K + 0,662 \log(I_{bf}) + 0,0966V + 0,000526G + \\ 0,5588V(\log I_{bf}) - 0,00304G(\log I_{bf})$$

$$\log(I_a) = -0,097 + (0,662 \log(55,452)) + (0,0966 \times 0,4) + \\ (0,000526 \times 25) + (0,5588 \times 0,4(\log(55,452))) - \\ (0,00304 \times 25 \times (\log(55,452)))$$

$$\log(I_a) = 1,367 \quad I_a = 23,256 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi ( $E_n$ ):

$$E_n = 10^{K_1+K_2+(1,081 \times \log(I_a))+(0,0011 \times G)}$$

$$E_n = 10^{-0,555+(-0,113)+(1,081 \times 1,367)+(0,0011 \times 25)}$$

$$E_n = 6,866 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1,5 \times 6,866 \times \left( \frac{0,46}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{1,641}}{455^{1,641}} \right)$$

$$\text{Incident Energy} = 160,345 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 160,345 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 38,290 \text{ cal/cm}^2$$

### **Bus 0,4 kV BLR SWGR 5B**

Perhitungan arus arcing (Ia)

$$\log(I_a) = K + 0,662 \log(I_{bf}) + 0,0966V + 0,000526G + \\ 0,5588V(\log I_{bf}) - 0,00304G(\log I_{bf})$$

$$\log(I_a) = -0,097 + (0,662 \log(55,456)) + (0,0966 \times 0,4) + \\ (0,000526 \times 25) + (0,5588 \times 0,4(\log(55,456))) - \\ (0,00304 \times 25 \times (\log(55,456)))$$

$$\log(I_a) = 1,367 \quad I_a = 23,257 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi (E<sub>n</sub>):

$$E_n = 10^{K_1+K_2+(1,081 \times \log(I_a))+(0,0011 \times G)}$$

$$E_n = 10^{-0,555+(-0,113)+(1,081 \times 1,367)+(0,0011 \times 25)}$$

$$E_n = 6,867 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1,5 \times 6,867 \times \left( \frac{0,46}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{1,641}}{455^{1,641}} \right)$$

$$\text{Incident Energy} = 160,355 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 160,355 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 38,293 \text{ cal/cm}^2$$

### **Bus 0,4 kV CWL SWGR 5B**

Perhitungan arus arcing (Ia)

$$\log(I_a) = K + 0,662 \log(I_{bf}) + 0,0966V + 0,000526G + \\ 0,5588V(\log I_{bf}) - 0,00304G(\log I_{bf})$$

$$\log(I_a) = -0,097 + (0,662 \log(55,452)) + (0,0966 \times 0,4) + \\ (0,000526 \times 25) + (0,5588 \times 0,4(\log(55,452))) - \\ (0,00304 \times 25 \times (\log(55,452)))$$

$$\log(I_a) = 1,367 \quad I_a = 23,256 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi (E<sub>n</sub>):

$$E_n = 10^{K_1+K_2+(1,081 \times \log(I_a))+(0,0011 \times G)}$$

$$E_n = 10^{-0,555 + (-0,113) + (1,081 \times 1,367) + (0,0011 \times 25)}$$

$$E_n = 6,866 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1,5 \times 6,866 \times \left(\frac{0,36}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{1,641}}{455^{1,641}}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 125,487 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 125,487 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 29,966 \text{ cal/cm}^2$$

### **Bus 0,4 kV PCP SWGR 5A**

Perhitungan arus arcing (Ia)

$$\log(I_a) = K + 0,662 \log(I_{bf}) + 0,0966V + 0,000526G + \\ 0,5588V(\log I_{bf}) - 0,00304G(\log I_{bf})$$

$$\log(I_a) = -0,097 + (0,662 \log(42,134)) + (0,0966 \times 0,4) + \\ (0,000526 \times 25) + (0,5588 \times 0,4(\log(42,134))) - \\ (0,00304 \times 25 \times (\log(42,134)))$$

$$\log(I_a) = 1,270 \quad I_a = 18,619 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi (E<sub>n</sub>):

$$E_n = 10^{K1+K2+(1,081 \times \log(I_a))+(0,0011 \times G)}$$

$$E_n = 10^{-0,555 + (-0,113) + (1,081 \times 1,270) + (0,0011 \times 25)}$$

$$E_n = 5,399 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1,5 \times 5,399 \times \left(\frac{0,46}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{1,641}}{455^{1,641}}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 126,087 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 126,087 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 30,110 \text{ cal/cm}^2$$

### **Bus 0,4 kV PCP SWGR 5B**

Perhitungan arus arcing (Ia)

$$\log(I_a) = K + 0,662 \log(I_{bf}) + 0,0966V + 0,000526G + \\ 0,5588V(\log I_{bf}) - 0,00304G(\log I_{bf})$$

$$\log(I_a) = -0,097 + (0,662 \log(42,137)) + (0,0966 \times 0,4) +$$

$$(0.000526 \times 25) + (0.5588 \times 0.4(\log(42,137))) - (0.00304 \times 25 \times (\log(42,137)))$$

$$\log(I_a) = 1,270 \quad I_a = 18,620 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi ( $E_n$ ):

$$E_n = 10^{K_1+K_2+(1,081 \times \log(I_a))+(0,0011 \times G)}$$

$$E_n = 10^{-0,555+(-0,113)+(1,081 \times 1,270)+(0,0011 \times 25)}$$

$$E_n = 5,400 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1,5 \times 5,400 \times \left(\frac{0,46}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{1,641}}{455^{1,641}}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 126,095 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 126,095 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 30,111 \text{ cal/cm}^2$$

### **Bus 0,4 kV TRB SWGR 5A**

Perhitungan arus arcing ( $I_a$ )

$$\log(I_a) = K + 0,662 \log(I_{bf}) + 0,0966V + 0,000526G + 0,5588V(\log I_{bf}) - 0,00304G(\log I_{bf})$$

$$\log(I_a) = -0,097 + (0,662 \log(55,452)) + (0,0966 \times 0,4) + (0,000526 \times 25) + (0,5588 \times 0,4(\log(55,452))) - (0,00304 \times 25 \times (\log(55,452)))$$

$$\log(I_a) = 1,367 \quad I_a = 23,256 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi ( $E_n$ ):

$$E_n = 10^{K_1+K_2+(1,081 \times \log(I_a))+(0,0011 \times G)}$$

$$E_n = 10^{-0,555+(-0,113)+(1,081 \times 1,367)+(0,0011 \times 25)}$$

$$E_n = 6,866 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1,5 \times 6,866 \times \left(\frac{0,46}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{1,641}}{455^{1,641}}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 160,345 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 160,345 \times 0,2388$$

Incident Energy = 38,290 cal/cm<sup>2</sup>

### **Bus 0,4 kV TRB SWGR 5B**

Perhitungan arus arcing (Ia)

$$\log(I_a) = K + 0,662 \log(I_{bf}) + 0,0966V + 0,000526G + 0,5588V(\log I_{bf}) - 0,00304G(\log I_{bf})$$

$$\log(I_a) = -0,097 + (0,662 \log(55,456)) + (0,0966 \times 0,4) + (0,000526 \times 25) + (0,5588 \times 0,4(\log(55,456))) - (0,00304 \times 25 \times (\log(55,456)))$$

$$\log(I_a) = 1,367 \quad I_a = 23,257 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi (E<sub>n</sub>):

$$E_n = 10^{K1+K2+(1,081 \times \log(I_a))+(0,0011 \times G)}$$

$$E_n = 10^{-0,555+(-0,113)+(1,081 \times 1,367)+(0,0011 \times 25)}$$

$$E_n = 6,867 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1,5 \times 6,867 \times \left(\frac{0,46}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{1,641}}{455^{1,641}}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 160,355 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 160,355 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 38,293 \text{ cal/cm}^2$$

### **Bus 0,4 kV AUI SWGR 5B**

Perhitungan arus arcing (Ia)

$$\log(I_a) = K + 0,662 \log(I_{bf}) + 0,0966V + 0,000526G + 0,5588V(\log I_{bf}) - 0,00304G(\log I_{bf})$$

$$\log(I_a) = -0,097 + (0,662 \log(55,456)) + (0,0966 \times 0,4) + (0,000526 \times 25) + (0,5588 \times 0,4(\log(55,456))) - (0,00304 \times 25 \times (\log(55,456)))$$

$$\log(I_a) = 1,367 \quad I_a = 23,257 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi (E<sub>n</sub>):

$$E_n = 10^{K1+K2+(1,081 \times \log(I_a))+(0,0011 \times G)}$$

$$E_n = 10^{-0,555+(-0,113)+(1,081 \times 1,367)+(0,0011 \times 25)}$$

$$E_n = 6,867 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1,5 \times 6,867 \times \left(\frac{0,36}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{1,641}}{455^{1,641}}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 125,495 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 125,495 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 29,968 \text{ cal/cm}^2$$

- b. Perhitungan energi busur api di *bus* dengan level tegangan 1 - 15 kV (*bus* 3,3 kV dan *bus* 10,5 kV)

### **Bus 3,3 kV SWGR 5A**

Perhitungan arus arcing (Ia)

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_{bf})$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(19,549)$$

$$\log(I_a) = 1,273 \quad I_a = 18,758 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi (E<sub>n</sub>):

$$E_n = 10^{K_1+K_2+(1,081 \times \log(I_a))+(0,0011 \times G)}$$

$$E_n = 10^{-0,555+(-0,113)+(1,081 \times 1,273)+(0,0011 \times 102)}$$

$$E_n = 6,615 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1 \times 6,615 \times \left(\frac{0,600}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 56,262 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 56,262 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 13,435 \text{ cal/cm}^2$$

### **Bus 3,3 kV SWGR 5B**

Perhitungan arus arcing (Ia)

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_{bf})$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(19,728)$$

$$\log(I_a) = 1,277 \quad I_a = 18,927 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi (E<sub>n</sub>):

$$E_n = 10^{K_1+K_2+(1,081 \times \log(I_a))+(0,0011 \times G)}$$

$$E_n = 10^{-0,555 + (-0,113) + (1,081 \times 1,277) + (0,0011 \times 102)}$$

$$E_n = 6,679 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1 \times 6,679 \times \left( \frac{0,600}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{0,973}}{910^{0,973}} \right)$$

$$\text{Incident Energy} = 56,810 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 56,810 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 13,566 \text{ cal/cm}^2$$

### **Bus 10,5 kV SST 5A**

Perhitungan arus arcing (Ia)

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_{bf})$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(27,538)$$

$$\log(I_a) = 1,419 \quad I_a = 26,271 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi (E<sub>n</sub>):

$$E_n = 10^{K1+K2+(1,081 \times \log(I_a))+(0,0011 \times G)}$$

$$E_n = 10^{-0,555 + (-0,113) + (1,081 \times 1,419) + (0,0011 \times 153)}$$

$$E_n = 10,833 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1 \times 10,833 \times \left( \frac{0,600}{0,2} \right)$$

$$\times \left( \frac{610^{0,973}}{910^{0,973}} \right)$$

$$\text{Incident Energy} = 92,139 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 92,139 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 22,003 \text{ cal/cm}^2$$

### **Bus 10,5 kV SST 5B**

Perhitungan arus arcing (Ia)

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_{bf})$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(27,538)$$

$$\log(I_a) = 1,419 \quad I_a = 26,271 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi ( $E_n$ ):

$$E_n = 10^{K_1+K_2+(1,081 \times \log(I_a))+(0,0011 \times G)}$$

$$E_n = 10^{-0,555+(-0,113)+(1,081 \times 1,419)+(0,0011 \times 153)}$$

$$E_n = 10,833 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\begin{aligned} \text{Incident Energy} &= 4,184 \times 1 \times 10,833 \times \left(\frac{0,600}{0,2}\right) \\ &\quad \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right) \end{aligned}$$

$$\text{Incident Energy} = 92,139 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 92,139 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 22,003 \text{ cal/cm}^2$$

### **Bus 10,5 kV SWGR 5A**

Perhitungan arus arcing (I<sub>a</sub>)

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_{bf})$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(31,581)$$

$$\log(I_a) = 1,478 \quad I_a = 30,058 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi ( $E_n$ ):

$$E_n = 10^{K_1+K_2+(1,081 \times \log(I_a))+(0,0011 \times G)}$$

$$E_n = 10^{-0,555+(-0,113)+(1,081 \times 1,478)+(0,0011 \times 153)}$$

$$E_n = 12,531 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\begin{aligned} \text{Incident Energy} &= 4,184 \times 1 \times 12,531 \times \left(\frac{0,400}{0,2}\right) \\ &\quad \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right) \end{aligned}$$

$$\text{Incident Energy} = 71,051 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 71,051 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 16,967 \text{ cal/cm}^2$$

### **Bus 10,5 kV SWGR 5B**

Perhitungan arus arcing (Ia)

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_{bf})$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(31,621)$$

$$\log(I_a) = 1,478 \quad I_a = 30,095 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi (E<sub>n</sub>):

$$E_n = 10^{K1+K2+(1,081 \times \log(I_a))+(0,0011 \times G)}$$

$$E_n = 10^{-0,555+(-0,113)+(1,081 \times 1,478)+(0,0011 \times 153)}$$

$$E_n = 12,547 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\begin{aligned} \text{Incident Energy} &= 4,184 \times 1 \times 12,547 \times \left(\frac{0,400}{0,2}\right) \\ &\quad \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right) \end{aligned}$$

$$\text{Incident Energy} = 71,147 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 71,147 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 16,990 \text{ cal/cm}^2$$

**Tabel 4.31** Data Hasil Perbandingan Perhitungan Manual dengan Simulasi Energi Busur api Kondisi *Resetting*

ID Bus	Resetting Simulasi		Resetting Manual	
	I Arcing (kA)	Incident Level (cal/cm <sup>2</sup> )	I Arcing (kA)	Incident Level (cal/cm <sup>2</sup> )
0,4 kV ASH SWGR 5A	8,386	12,628	8,386	12,713
0,4 kV ASH SWGR 5B	8,387	12,629	8,387	12,714
0,4 kV BLR SWGR 5A	23,256	38,035	23,256	38,290
0,4 kV BLR SWGR 5B	23,257	38,037	23,257	38,293
0,4kV CWL SWGR 5A	23,256	28,939	23,256	29,966
0,4 kV PCP SWGR 5A	18,619	29,909	18,619	30,110
0,4 kV PCP SWGR 5B	18,620	29,910	18,620	30,111
0,4 kV TRB SWGR 5A	23,256	38,035	23,256	38,290
0,4 kV TRB SWGR 5B	23,257	38,037	23,257	38,293
0,4 kV AUI SWGR 5B	23,257	29,768	23,257	29,968
3,3 kV SWGR 5A	18,759	13,387	18,758	13,435

**Tabel 4.31** Data Hasil Perbandingan Perhitungan Manual dengan Simulasi Energi Busur api Kondisi *Resetting*

ID Bus	<i>Resetting Simulasi</i>		<i>Resetting Manual</i>	
	I Arcing (kA)	Incident Level (cal/cm <sup>2</sup> )	I Arcing (kA)	Incident Level (cal/cm <sup>2</sup> )
3,3 kV SWGR 5B	18,927	13,517	18,927	13,566
10,5 kV SST 5A	26,271	21,923	26,271	22,003
10,5 kV SST 5B	26,271	21,923	26,271	22,003
10,5 kV SWGR 5A	30,058	16,906	30,058	16,967
10,5 kV SWGR 5B	30,095	16,928	30,095	16,990

#### 4.7 Perbandingan Besar Energi Busur api Kondisi *Existing* dengan Kondisi *Resetting*

Pada subbab ini akan diuraikan perbandingan besar energi busur api kondisi *existing* dengan kondisi *resetting* pada sistem kelistrikan PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5 yang terdapat pada tabel 4.30.

**Tabel 4.32** Perbandingan Besar Energi Busur api Kondisi *Existing* Dengan Kondisi *Resetting*

ID Bus	<i>Existing</i>			<i>Resetting</i>		
	Inc. Level Simulasi (cal/cm <sup>2</sup> )	Inc. Level Perhitungan (cal/cm <sup>2</sup> )	Energy Level	Inc. Level Simulasi (cal/cm <sup>2</sup> )	Inc. Level Perhitungan (cal/cm <sup>2</sup> )	Energy Level
0,4 kV ASH SWGR 5A	12,629	12,714	2	12,628	12,713	2
0,4 kV ASH SWGR 5B	12,629	12,714	2	12,629	12,714	2

**Tabel 4.32** Perbandingan Besar Energi Busur api Kondisi *Existing* Dengan Kondisi *Resetting*

ID Bus	<i>Existing</i>			<i>Resetting</i>		
	<i>Inc. Level</i> Simulasi (cal/cm <sup>2</sup> )	<i>Inc. Level</i> Perhitungan (cal/cm <sup>2</sup> )	<i>Energy</i> <i>Level</i>	<i>Inc. Level</i> Simulasi (cal/cm <sup>2</sup> )	<i>Inc. Level</i> Perhitungan (cal/cm <sup>2</sup> )	<i>Energy</i> <i>Level</i>
0,4 kV TRB SWGR 5A	0,4 kV PCP SWGR 5B	0,4 kV PCP SWGR 5A	0,4 kV CWL SWGR 5A	0,4 kV BLR SWGR 5B	0,4 kV BLR SWGR 5A	
38,037	38,037	38,293	38,293	38,035	38,290	3
38,037	38,037	38,293	38,293	38,037	38,293	3
29,900	29,900	30,111	30,111	29,909	30,110	3
29,911	29,911	30,113	30,113	29,910	30,111	3
38,037	38,037	38,293	38,293	38,035	38,290	3

**Tabel 4.32** Perbandingan Besar Energi Busur api Kondisi *Existing* Dengan Kondisi *Resetting* (lanjutan)

ID Bus	<i>Existing</i>			<i>Resetting</i>		
	<i>Inc. Level</i> Simulasi (cal/cm <sup>2</sup> )	<i>Inc. Level</i> Perhitungan (cal/cm <sup>2</sup> )	<i>Energy</i> <i>Level</i>	<i>Inc. Level</i> Simulasi (cal/cm <sup>2</sup> )	<i>Inc. Level</i> Perhitungan (cal/cm <sup>2</sup> )	<i>Energy</i> <i>Level</i>
10,5 kV SST 5A	10,5 kV SST 5B	3,3 kV SWGR 5B	3,3 kV SWGR 5A	0,4 kV AUI SWGR 5B	0,4 kV TRB SWGR 5B	38,039
				38,295	38,293	3
				3	38,037	38,293
						3
10,5 kV SST 5B	20,508	20,573	20,573	13,939	13,998	2
				14,076	14,134	2
				2	13,387	13,435
					13,517	13,566
					21,923	22,003
					21,923	22,003
						2

**Tabel 4.32** Perbandingan Besar Energi Busur api Kondisi *Existing* Dengan Kondisi *Resetting* (lanjutan)

ID Bus	<i>Existing</i>			<i>Resetting</i>		
	<i>Inc. Level</i> Simulasi (cal/cm <sup>2</sup> )	<i>Inc. Level</i> Perhitungan (cal/cm <sup>2</sup> )	<i>Energy</i> <i>Level</i>	<i>Inc. Level</i> Simulasi (cal/cm <sup>2</sup> )	<i>Inc. Level</i> Perhitungan (cal/cm <sup>2</sup> )	<i>Energy</i> <i>Level</i>
10,5 kV SWGR 5A	21,814	21,879	2	16,906	16,967	2
10,5 kV SWGR 5B	21,843	21,908	2	16,928	16,990	2

Berdasarkan Tabel 4.30 dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Level energi pada kondisi existing dan kondisi resetting terlihat tetap yaitu pada level 2 dan level 3 akan tetapi nilai pada insiden energi berbeda.
2. Insiden energi setelah dilakukan *resetting* koordinasi proteksi terdapat beberapa *bus* yang mengalami peningkatan energi yaitu pada *bus* 10,5 kV SST 5A dan *bus* 10,5 kV SST 5B. Terdapat pula insiden energi pada beberapa *bus* terlihat tetap yaitu pada *bus* 0,4 kV ASH SWGR 5A, *bus* 0,4 kV ASH SWGR 5B, *bus* 0,4 kV BLR SWGR 5A, *bus* 0,4 kV BLR SWGR 5B, *bus* 0,4 kV TRB SWGR 5A, *bus* 0,4 kV TRB SWGR 5B, *bus* 0,4 kV PCP SWGR 5A dan *bus* 0,4 kV PCP SWGR 5B. Serta terdapat juga insiden energi pada beberapa *bus* yang mengalami penurunan yaitu pada *bus* 0,4 kV CEP SWGR 5A, *bus* 0,4 kV TRB AUI 5B, *bus* 3,3 kV SWGR 5A, *bus* 3,3 kV SWGR 5B, *bus* 10,5 kV SWGR 5A dan *bus* 10,5 kV SWGR 5B.
3. Penurunan dan kenaikan indisen energi dikarenakan berubahnya nilai FCT (*Fault Clearing Time*). Setelah sistem kelistrikan terkoordinasi, waktu bekerja rele akibat terjadinya hubung singkat juga semakin

meningkat dikarenakan penambahan *grading time* pada rele. Sehingga FCT semakin meningkat dan energi busur api juga semakin besar.

## 4.8 Perhitungan *Flash Protection Boundary* (FPB)

Pada insiden energi busur api terdapat jarak aman dimana digunakan sebagai acuan dalam menentukan titik aman bagi pekerja terhadap potensi bahaya *arc flash* yang terjadi sesuai standar IEEE 1584-2002. Perhitungan jarak aman disesuaikan dengan level tegangan. Semakin besar energinya maka semakin jauh pula jarak amannya.

### 4.8.1 Perhitungan *Flash Protection Boundary* Kondisi Existing

Pada subbab ini akan dibahas mengenai perhitungan *Flash Protection Boundary* tiap *bus* pada kondisi *existing* untuk menentukan jarak aman bekerja dalam lingkungan bertegangan. Dalam perhitungan ini menggunakan FPB yang berdasarkan pada insiden energi di  $5 \text{ J/cm}^2$ . Berikut adalah perhitungan semua *bus* yang dianalisis:

- Perhitungan energi busur api di *bus* dengan level tegangan dibawah 1 kV (*bus* 0,4 kV)

#### Bus 0,4 kV ASH SWGR 5A

$$\begin{aligned} DB &= \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \\ DB &= \left[ 4,184 \times 1,5 \times 2,280 \times \left( \frac{0,460}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{1,641}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1,641}} \\ DB &= 1,923 \text{ m} \end{aligned}$$

#### Bus 0,4 kV ASH SWGR 5B

$$\begin{aligned} DB &= \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \\ DB &= \left[ 4,184 \times 1,5 \times 2,280 \times \left( \frac{0,460}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{1,641}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1,641}} \\ DB &= 1,923 \text{ m} \end{aligned}$$

**Bus 0,4 kV BLR SWGR 5A**

$$DB = \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[ 4,184 \times 1,5 \times 6,867 \times \left( \frac{0,460}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{1,641}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

$$DB = 3,765 \text{ m}$$

**Bus 0,4 kV BLR SWGR 5B**

$$DB = \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[ 4,184 \times 1,5 \times 6,867 \times \left( \frac{0,460}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{1,641}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

$$DB = 3,765 \text{ m}$$

**Bus 0,4 kV CWL SWGR 5B**

$$DB = \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[ 4,184 \times 1,5 \times 6,867 \times \left( \frac{0,460}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{1,641}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

$$DB = 3,765 \text{ m}$$

**Bus 0,4 kV PCP SWGR 5A**

$$DB = \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[ 4,184 \times 1,5 \times 5,400 \times \left( \frac{0,460}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{1,641}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

$$DB = 3,252 \text{ m}$$

**Bus 0,4 kV PCP SWGR 5B**

$$DB = \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[ 4,184 \times 1,5 \times 5,400 \times \left( \frac{0,460}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{1,641}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

DB = 3,252 m

#### **Bus 0,4 kV TRB SWGR 5A**

$$DB = \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[ 4,184 \times 1,5 \times 6,867 \times \left( \frac{0,460}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{1,641}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

DB = 3,765 m

#### **Bus 0,4 kV TRB SWGR 5B**

$$DB = \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[ 4,184 \times 1,5 \times 6,867 \times \left( \frac{0,460}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{1,641}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

DB = 3,766 m

#### **Bus 0,4 kV AUI SWGR 5B**

$$DB = \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[ 4,184 \times 1,5 \times 6,867 \times \left( \frac{0,460}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{1,641}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

DB = 3,766 m

- b. Perhitungan energi busur api di *bus* dengan level tegangan 1 - 15 kV (*bus* 3,3 kV dan *bus* 10,5 kV)

#### **Bus 3,3 kV SWGR 5A**

$$DB = \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[ 4,184 \times 1 \times 6,616 \times \left( \frac{0,625}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

DB = 11,423 m

#### **Bus 3,3 kV SWGR 5B**

$$DB = \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[ 4,184 \times 1 \times 6,681 \times \left( \frac{0,625}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

DB = 11,537 m

#### **Bus 10,5 kV SST 5A**

$$DB = \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[ 4,184 \times 1 \times 10,833 \times \left( \frac{0,561}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

DB = 16,968 m

#### **Bus 10,5 kV SST 5B**

$$DB = \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[ 4,184 \times 1 \times 10,833 \times \left( \frac{0,561}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

DB = 16,968 m

#### **Bus 10,5 kV SWGR 5A**

$$DB = \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[ 4,184 \times 1 \times 12,550 \times \left( \frac{0,515}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

DB = 18,076 m

### **Bus 10,5 kV SWGR 5B**

$$DB = \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[ 4,184 \times 1 \times 12,567 \times \left( \frac{0,515}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$DB = 18,101 \text{ m}$$

#### **4.8.2 Perhitungan Flash Protection Boundary Kondisi Resetting**

Pada subbab ini akan dibahas mengenai perhitungan *Flash Protection Boundary* tiap *bus* pada kondisi *resetting* untuk menentukan jarak aman bekerja dalam lingkungan bertegangan. Dalam perhitungan ini menggunakan FPB yang berdasarkan pada insiden energi di  $5 \text{ J/cm}^2$ . Berikut adalah perhitungan semua *bus* yang dianalisis:

- Perhitungan energi busur api di *bus* dengan level tegangan dibawah 1 kV (*bus* 0,4 kV)

### **Bus 0,4 kV ASH SWGR 5A**

$$DB = \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[ 4,184 \times 1,5 \times 2,280 \times \left( \frac{0,460}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{1,641}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

$$DB = 1,923 \text{ m}$$

### **Bus 0,4 kV ASH SWGR 5B**

$$DB = \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[ 4,184 \times 1,5 \times 2,280 \times \left( \frac{0,460}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{1,641}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

$$DB = 1,923 \text{ m}$$

### **Bus 0,4 kV BLR SWGR 5A**

$$DB = \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[ 4,184 \times 1,5 \times 6,866 \times \left( \frac{0,460}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{1,641}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

DB = 3,765 m

#### **Bus 0,4 kV BLR SWGR 5B**

$$DB = \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[ 4,184 \times 1,5 \times 6,867 \times \left( \frac{0,460}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{1,641}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

DB = 3,765 m

#### **Bus 0,4 kV CWL SWGR 5B**

$$DB = \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[ 4,184 \times 1,5 \times 6,866 \times \left( \frac{0,360}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{1,641}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

DB = 3,765 m

#### **Bus 0,4 kV PCP SWGR 5A**

$$DB = \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[ 4,184 \times 1,5 \times 5,399 \times \left( \frac{0,460}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{1,641}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

DB = 3,252 m

#### **Bus 0,4 kV PCP SWGR 5B**

$$DB = \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[ 4,184 \times 1,5 \times 5,400 \times \left( \frac{0,460}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{1,641}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

DB = 3,252 m

**Bus 0,4 kV TRB SWGR 5A**

$$DB = \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[ 4,184 \times 1,5 \times 6,866 \times \left( \frac{0,460}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{1,641}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

$$DB = 3,765 \text{ m}$$

**Bus 0,4 kV TRB SWGR 5B**

$$DB = \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[ 4,184 \times 1,5 \times 6,867 \times \left( \frac{0,460}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{1,641}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

$$DB = 3,765 \text{ m}$$

**Bus 0,4 kV AUI SWGR 5B**

$$DB = \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[ 4,184 \times 1,5 \times 6,867 \times \left( \frac{0,360}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{1,641}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

$$DB = 3,243 \text{ m}$$

- b. Perhitungan energi busur api di *bus* dengan level tegangan 1 - 15 kV  
(*bus* 3,3 kV dan *bus* 10,5 kV)

**Bus 3,3 kV SWGR 5A**

$$DB = \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[ 4,184 \times 1 \times 6,615 \times \left( \frac{0,600}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$DB = 10,951 \text{ m}$$

**Bus 3,3 kV SWGR 5B**

$$DB = \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[ 4,184 \times 1 \times 6,679 \times \left( \frac{0,600}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$DB = 11,061 \text{ m}$$

**Bus 10,5 kV SST 5A**

$$DB = \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[ 4,184 \times 1 \times 10,833 \times \left( \frac{0,600}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$DB = 18,182 \text{ m}$$

**Bus 10,5 kV SST 5B**

$$DB = \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[ 4,184 \times 1 \times 10,833 \times \left( \frac{0,600}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$DB = 18,182 \text{ m}$$

**Bus 10,5 kV SWGR 5A**

$$DB = \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[ 4,184 \times 1 \times 12,531 \times \left( \frac{0,400}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$DB = 13,920 \text{ m}$$

**Bus 10,5 kV SWGR 5B**

$$DB = \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[ 4,184 \times 1 \times 12,547 \times \left( \frac{0,400}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

DB = 13,939 m

#### 4.9 Perbandingan *Flash Protection Boundary* Kondisi *Existing* dengan Kondisi *Resetting*

Pada subbab ini akan diuraikan perbandingan jarak aman bagi para pekerja kondisi *existing* dengan kondisi *resetting* pada sistem kelistrikan PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5 yang terdapat pada tabel 4.31.

**Tabel 4.33** Data Perbandingan FPB Kondisi *Existing* dan *Resetting*

ID Bus	<i>Existing</i> (m)		<i>Resetting</i> (m)	
	Manual	Simulasi	Manual	Simulasi
0,4 kV ASH SWGR 5A	1.923	1,917	1.923	1,917
0,4 kV ASH SWGR 5B	1.923	1,917	1.923	1,917
0,4 kV BLR SWGR 5A	3.765	3,755	3.765	3,755
0,4 kV BLR SWGR 5B	3.765	3,755	3.765	3,755
0,4kV CWL SWGR 5A	3.765	3,755	3.243	3,179
0,4 kV PCP SWGR 5A	3.252	3,243	3.252	3,243
0,4 kV PCP SWGR 5B	3.252	3,243	3.252	3,243
0,4 kV TRB SWGR 5A	3.765	3,755	3.765	3,755
0,4 kV TRB SWGR 5B	3.766	3,755	3.765	3,755
0,4 kV AUI SWGR 5B	3.766	3,755	3.243	3,234
3,3 kV SWGR 5A	11.423	11,366	10.951	10,906
3,3 kV SWGR 5B	11.537	11,481	11.061	11,012
10,5 kV SST 5A	16.968	16,904	18.182	18,105
10,5 kV SST 5B	16.968	16,904	18.182	18,105
10,5 kV SWGR 5A	18.076	18,011	13.920	13,859
10,5 kV SWGR 5B	18.101	18,035	13.939	13,881

Berdasarkan Tabel 4.31 dapat disimpulkan sebagai berikut:

- Hasil perhitungan *Flash Protection Boundary* dengan hasil simulasi *Flash Protection Boundary* menggunakan *software ETAP* mempunyai hasil mendekati sama.
- Hasil *Flash Protection Boundary* yang telah dilakukan *resetting* pada sistem kelistrikan di PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5 lebih kecil dibandingkan sebelumnya, sehingga jarak aman pekerja dari titik bahaya *arc flash* lebih dekat dikarenakan penurunan energi busur api.

## 4.10 Personal Protective Equipment (PPE) yang Harus Digunakan

*Personal Protective Equipment* (PPE) merupakan alat pelindung diri saat bekerja di daerah yang memiliki potensi bahaya *arc flash*, oleh karena itu bagi para pekerja harus mengenakan pakaian pelindung diri dan alat pelindung diri sesuai dengan standar NFPA 70-E 20015. Berdasarkan hasil perhitungan insiden energi *arc flash* dengan menggunakan standar IEEE 1584-2002, maka didapatkan nilai dan level kategori insiden energi *arc flash* pada tiap bus yang telah ditentukan. Selanjutnya menentukan jenis *Personal Protective Equipment* (PPE) atau Alat Pelindung Diri (APD) yang digunakan sesuai level insiden energi *arc flash* untuk menurunkan resiko terkena dampak dari *arc flash* bagi para pekerja.

**Tabel 4.34** Jenis PPE Berdasarkan Kategori Busur Api Kondisi *Resetting*

ID Bus	Inc. Level (cal/cm <sup>2</sup> )	Kategori	Jenis PPE	
			Pakaian	Peralatan Pelindung
0,4 kV ASH SWGR 5A	12,713	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kemeja lengan panjang dan celana panjang dengan <i>arc rating</i></li> <li>- Pelindung wajah dan balaclava dengan <i>arc rating</i></li> <li>- Jaket dan jas hujan dengan <i>arc rating</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pelindung mata</li> <li>- Pelindung telinga (sisipan saluran telinga)</li> <li>- Sarung tangan kulit</li> <li>- Sepatu kulit</li> </ul>
0,4 kV ASH SWGR 5B	12,714	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kemeja lengan panjang dan celana panjang dengan <i>arc rating</i></li> <li>- Pelindung wajah dan balaclava dengan <i>arc rating</i></li> <li>- Jaket dan jas hujan dengan <i>arc rating</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pelindung mata</li> <li>- Pelindung telinga (sisipan saluran telinga)</li> <li>- Sarung tangan kulit</li> <li>- Sepatu kulit</li> </ul>

**Tabel 4.34** Jenis PPE Berdasarkan Kategori Busur Api Kondisi *Resetting* (lanjutan)

ID Bus	Inc. Level (cal/cm <sup>2</sup> )	Kategori	Jenis PPE	
			Pakaian	Peralatan Pelindung
0,4 kV BLR SWGR 5A	38,290	3	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Flash Suit Hood</i></li> <li>- Kemeja lengan panjang dan celana panjang dengan <i>arc rating</i></li> <li>- Pelindung wajah dengan <i>arc rating</i></li> <li>- Jaket dan jas hujan dengan <i>arc rating</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pelindung kepala</li> <li>- Pelindung mata</li> <li>- Pelindung telinga (sisipan saluran telinga)</li> <li>- Sepatu kulit</li> <li>- Sarung tangan dengan <i>arc rating</i></li> </ul>
0,4 kV BLR SWGR 5B	38,293	3	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Flash Suit Hood</i></li> <li>- Kemeja lengan panjang dan celana panjang dengan <i>arc rating</i></li> <li>- Pelindung wajah dengan <i>arc rating</i></li> <li>- Jaket dan jas hujan dengan <i>arc rating</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pelindung kepala</li> <li>- Pelindung mata</li> <li>- Pelindung telinga (sisipan saluran telinga)</li> <li>- Sepatu kulit</li> <li>- Sarung tangan dengan <i>arc rating</i></li> </ul>
0,4 kV CWL SWGR 5A	28,966	3	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Flash Suit Hood</i> dengan <i>arc rating</i></li> <li>- Kemeja lengan panjang dan celana panjang dengan <i>arc rating</i></li> <li>- Pelindung wajah dengan <i>arc rating</i></li> <li>- Jaket dan jas hujan dengan <i>arc rating</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pelindung kepala</li> <li>- Pelindung mata</li> <li>- Pelindung telinga (sisipan saluran telinga)</li> <li>- Sepatu kulit</li> <li>- Sarung tangan dengan <i>arc rating</i></li> </ul>

**Tabel 4.34** Jenis PPE Berdasarkan Kategori Busur Api Kondisi *Resetting*

ID Bus	Inc. Level (cal/cm <sup>2</sup> )	Kategori	Jenis PPE	
			Pakaian	Peralatan Pelindung
0,4 kV PCP SWGR 5A	30,110	3	<ul style="list-style-type: none"><li>- <i>Flash Suit Hood</i></li><li>- Kemeja lengan panjang dan celana panjang dengan <i>arc rating</i></li><li>- Pelindung wajah dengan <i>arc rating</i></li><li>- Jaket dan jas hujan dengan <i>arc rating</i></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Pelindung kepala</li><li>- Pelindung mata</li><li>- Pelindung telinga (sisipan saluran telinga)</li><li>- Sepatu kulit</li><li>- Sarung tangan dengan <i>arc rating</i></li></ul>
0,4 kV PCP SWGR 5B	30,111	3	<ul style="list-style-type: none"><li>- <i>Flash Suit Hood</i> dengan <i>arc rating</i></li><li>- Kemeja lengan panjang dan celana panjang dengan <i>arc rating</i></li><li>- Pelindung wajah dengan <i>arc rating</i></li><li>- Jaket dan jas hujan dengan <i>arc rating</i></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Pelindung kepala</li><li>- Pelindung mata</li><li>- Pelindung telinga (sisipan saluran telinga)</li><li>- Sepatu kulit</li><li>- Sarung tangan dengan <i>arc rating</i></li></ul>
0,4 kV TRB SWGR 5A	38,290	3	<ul style="list-style-type: none"><li>- <i>Flash Suit Hood</i></li><li>- Kemeja lengan panjang dan celana panjang dengan <i>arc rating</i></li><li>- Pelindung wajah dengan <i>arc rating</i></li><li>- Sarung tangan dengan <i>arc rating</i></li><li>- Jaket dan jas hujan dengan <i>arc rating</i></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Pelindung kepala</li><li>- Pelindung mata</li><li>- Pelindung telinga (sisipan saluran telinga)</li><li>- Sepatu kulit</li></ul>

**Tabel 4.34** Jenis PPE Berdasarkan Kategori Busur Api Kondisi *Resetting*

ID Bus	Inc. Level (cal/cm <sup>2</sup> )	Kategori	Jenis PPE	
			Pakaian	Peralatan Pelindung
0,4 kV TRB SWGR 5B	38,293	3	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Flash Suit Hood</i> dengan <i>arc rating</i></li> <li>- Kemeja lengan panjang dan celana panjang dengan <i>arc rating</i></li> <li>- Pelindung wajah dengan <i>arc rating</i></li> <li>- Jaket dan jas hujan dengan <i>arc rating</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pelindung kepala</li> <li>- Pelindung mata</li> <li>- Pelindung telinga (sisipan saluran telinga)</li> <li>- Sepatu kulit</li> <li>- Sarung tangan dengan <i>arc rating</i></li> </ul>
0,4 kV AUI SWGR 5B	29,968	3	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Flash Suit Hood</i></li> <li>- Kemeja lengan panjang dan celana panjang dengan <i>arc rating</i></li> <li>- Pelindung wajah dengan <i>arc rating</i></li> <li>- Jaket dan jas hujan dengan <i>arc rating</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pelindung kepala</li> <li>- Pelindung mata</li> <li>- Pelindung telinga (sisipan saluran telinga)</li> <li>- Sepatu kulit</li> <li>- Sarung tangan dengan <i>arc rating</i></li> </ul>
3,3 kV SWGR 5A	13,435	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kemeja lengan panjang dan celana panjang dengan <i>arc rating</i></li> <li>- Pelindung wajah dan balaclava dengan <i>arc rating</i></li> <li>- Sarung tangan kulit</li> <li>- Sepatu kulit</li> <li>- Jaket dan jas hujan dengan <i>arc rating</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pelindung mata</li> <li>- Pelindung telinga (sisipan saluran telinga)</li> </ul>

**Tabel 4.34** Jenis PPE Berdasarkan Kategori Busur Api Kondisi *Resetting* (lanjutan)

ID Bus	Inc. Level (cal/cm <sup>2</sup> )	Kategori	Jenis PPE	
			Pakaian	Peralatan Pelindung
3,3 kV SWGR 5B	13,566	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kemeja lengan panjang dan celana panjang dengan <i>arc rating</i></li> <li>- Pelindung wajah dan balaclava dengan <i>arc rating</i></li> <li>- Jaket dan jas hujan dengan <i>arc rating</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pelindung mata</li> <li>- Pelindung telinga (sisipan saluran telinga)</li> <li>- Sarung tangan kulit</li> <li>- Sepatu kulit</li> </ul>
10,5 kV SST 5A	20,003	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kemeja lengan panjang dan celana panjang dengan <i>arc rating</i></li> <li>- Pelindung wajah dan balaclava dengan <i>arc rating</i></li> <li>- Jaket dan jas hujan dengan <i>arc rating</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pelindung mata</li> <li>- Pelindung telinga (sisipan saluran telinga)</li> <li>- Sarung tangan kulit</li> <li>- Sepatu kulit</li> </ul>
10,5 kV SST 5B	20,003	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kemeja lengan panjang dan celana panjang dengan <i>arc rating</i></li> <li>- Pelindung wajah dan balaclava dengan <i>arc rating</i></li> <li>- Jaket dan jas hujan dengan <i>arc rating</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pelindung mata</li> <li>- Pelindung telinga (sisipan saluran telinga)</li> <li>- Sarung tangan kulit</li> <li>- Sepatu kulit</li> </ul>

**Tabel 4.34** Jenis PPE Berdasarkan Kategori Busur Api Kondisi *Resetting* (lanjutan)

ID Bus	Inc. Level (cal/cm <sup>2</sup> )	Kategori	Jenis PPE	
			Pakaian	Peralatan Pelindung
10,5 kV SWGR 5A	16,967	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kemeja lengan panjang dan celana panjang dengan <i>arc rating</i></li> <li>- Pelindung wajah dan balaclava dengan <i>arc rating</i></li> <li>- Jaket dan jas hujan dengan <i>arc rating</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pelindung mata</li> <li>- Pelindung telinga (sisipan saluran telinga)</li> <li>- Sarung tangan kulit</li> <li>- Sepatu kulit</li> </ul>
10,5 kV SWGR 5B	16,990	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kemeja lengan panjang dan celana panjang dengan <i>arc rating</i></li> <li>- Pelindung wajah dan balaclava dengan <i>arc rating</i></li> <li>- Jaket dan jas hujan dengan <i>arc rating</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pelindung mata</li> <li>- Pelindung telinga (sisipan saluran telinga)</li> <li>- Sarung tangan kulit</li> <li>- Sepatu kulit</li> </ul>
10,5 kV SWGR 5B	16,990	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kemeja lengan panjang dan celana panjang dengan <i>arc rating</i></li> <li>- Pelindung wajah dan balaclava dengan <i>arc rating</i></li> <li>- Jaket dan jas hujan dengan <i>arc rating</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pelindung mata</li> <li>- Pelindung telinga (sisipan saluran telinga)</li> <li>- Sarung tangan kulit</li> <li>- Sepatu kulit</li> </ul>

*Halaman Ini sengaja Dikosongkan*

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil simulasi dan analisa terhadap nilai insiden energi *arc flash* serta koordinasi rele pengaman arus lebih pada PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5 yang telah dilakukan, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Koordinasi proteksi sistem kelistrikan di PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5 pada kondisi *existing*, terdapat pengaturan rele yang belum tepat dan koordinasi yang kurang baik terutama pada pengaturan *pickup* dan *grading time* antara rele pengaman.
2. Pada pengaturan rele kondisi *existing* di PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5 belum terdapat *grading time*, *time delay* pada rele tidak sesuai standar IEEE 242-2001 dan kurva rele pengaman yang menyenggung *damage curve transformator* sehingga perlu dilakukan *resetting*.
3. Hasil dari *resetting* koordinasi proteksi menyebabkan insiden energi *arc flash* pada bus 10,5 kV SST-5A dan 10,5 kV SST-5B bernilai besar dikarenakan pada sistem *existing* FCT pada kedua bus tersebut sebesar 0,5 detik, setelah dilakukan *resetting* menjadi 0,6 detik. Hal ini menyebabkan insiden energi menjadi lebih besar yaitu 21,923 cal/cm<sup>2</sup>. Serta terdapat penurunan insiden energi *arc flash* pada bus 10,5 kV SWGR-5A, 10,5 kV SWGR-5B, 3,3 kV SWGR-5A dan 10,5 kV SWGR-5B yang semula 21,814 cal/cm<sup>2</sup>, 21,843 cal/cm<sup>2</sup>, 14,076 cal/cm<sup>2</sup> dan 13,939 cal/cm<sup>2</sup> menjadi 16,906 cal/cm<sup>2</sup>, 16,906 cal/cm<sup>2</sup>, 13,387 cal/cm<sup>2</sup> dan 13,517 cal/cm<sup>2</sup>. Hal ini dikarenakan nilai FCT lebih kecil setelah dilakukan koordinasi proteksi dengan tepat. Nilai FCT saat *existing* 0,55 dan 0,65 detik setelah di *resetting* menjadi 0,4 dan 0,6 detik.
4. Setelah mendapatkan nilai insiden energi *arc flash*, maka didapatkan jarak aman atau *Flash Protection Boundary* yang yang tepat. Penurunan insiden energi *arc flash* menyebabkan jarak aman pekerja dari titik bahaya *arc flash* semakin dekat, sedangkan kenaikan insiden energi *arc flash* menyebabkan jarak aman pekerja dari titik bahaya *arc flash* semakin jauh.

- Setelah mendapatkan nilai insiden energi *arc flash*, maka didapatkan pengelompokan kategori insiden energi *arc flash* dan perlengkapan alat pelindung diri yang tepat sesuai kategorinya yang berdasarkan standar NFPA 70E-2015.

## 5.2 Saran

Berdasarkan hasil pertimbangan dari studi koordinasi proteksi dengan mempertimbangkan *arc flash* pada PT. Indonesia Power UP Suralaya, maka ada beberapa saran yang dapat menjadi masukan untuk kedepannya, yaitu sebagai berikut:

- Dari *setting* rele pengaman yang didapat dapat dijadikan pertimbangan dan referensi dalam melakukan *setting* rele pengaman pada PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5.
- Setelah dilakukan perhitungan besarnya insiden energi *arc flash* setiap *bus* pada PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 5 disarankan bagi para pekerja menggunakan *Personal Protective Equipment* yang sesuai dengan kategori *arc flash* untuk melindungi dari dampak bahaya *arc flash*.
- Dari Tugas Akhir ini dapat dikembangkan lagi dengan menggunakan Metode Modifikasi.

## **DAFTAR PUSTAKA**

- [1] L. Tobing, Bonggas, “*Peralatan Tegangan Tinggi, Diktat Kuliah Peraltan Tegangan Tinggi, Edisi Kedua*”, 2008
- [2] R. Wahyudi, Ir, “*Diktat Kuliah Pengaman Sistem Tenaga Listrik*”, 2008.
- [3] Ontoseno Penangsang, Pro, “*Diktat Kuliah Analisis Sistem Tenaga 2*”, 2008.
- [4] Lazar, Irwin, “*Electrical System Analysis and Design for Industrial Plants*”, Mc-Graw Hill, Inc., USA, Ch.1, Ch 4, 1980.
- [5] Anderson, P.M, “*Power System Protection*”, IEEE Press Power Engineering Series, New York, 1999.
- [6] IEEE Std 1584™ – 2002, “*IEEE Guide Performing Arc Flash Hazard Calculation*”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 2002.
- [7] Simms, J., Johnson, G., “*Protective Relaying Methods for Reducing Arc Flash Energy*”, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 49, No. 2, pp 803, April, 2013
- [8] NFPA 70E-2015, “*Electrical Safety Requirements for Employee Workplaces*”, 2015

*Halaman Ini sengaja Dikosongkan*

# APPENDIX A • TIME OVERCURRENT CHARACTERISTIC CURVES

## GENERAL

Basler Electric inverse time overcurrent systems (ANSI Device 51) provide time/current characteristic curves that very closely emulate most of the common electro-mechanical, induction disk relays that were manufactured in North America. To further improve proper relay coordination, selection of integrated reset or instantaneous reset characteristics is also provided.

## CURVE SPECIFICATIONS

Timing Accuracy (All 51 Functions):

Within  $\pm 5\%$  or  $\pm 1\frac{1}{2}$  cycles, whichever is greater, for time dial settings greater than 0.1 and multiples of 2 to 40 times the pickup setting but not over 150 A for 5 A CT units or 30 A for 1 A CT units.

Sixteen inverse time functions, one fixed time function, and one programmable time function can be selected. Characteristic curves for the inverse and definite time functions are defined by the following equations and comply with IEEE C37.112 - 1996.

$$T_T = \frac{A \cdot D}{M^N - C} + B \cdot D + K \quad \text{Equation A-1}$$

$$T_R = \frac{R \cdot D}{\sqrt{M^2 - 1}} \quad \text{Equation A-2}$$

$T_T$  = Time to trip when  $M \geq 1$

$T_R$  = Time to reset if relay is set for integrating reset when  $M < 1$ . Otherwise, reset is 50 milliseconds or less

D = TIME DIAL setting (0.0 to 9.9)

M = Multiple of PICKUP setting (0 to 40)

A, B, C, N, K = Constants for the particular curve

R = Constant defining the reset time.

Table A-1 lists time characteristic curve constants. See Figures A-1 through A-17 for graphs of the characteristics.

Table A-1. 51P, 51N, and 51Q Time Characteristic Curve Constants

Curve Selection	Curve Name	Trip Characteristic Constants §					Reset †
		A	B	C	N	K	
<b>S1</b>	S, S1, Short Inverse	0.2663	0.03393	1.0000	1.2969	0.0280	0.5000
<b>S2</b>	S2, Short Inverse	0.0286	0.02080	1.0000	0.9844	0.0280	0.0940
<b>L1</b>	L, L1, Long Inverse	5.6143	2.18592	1.0000	1.0000	0.0280	15.750
<b>L2</b>	L2, Long Inverse	2.3955	0.00000	1.0000	0.3125	0.0280	7.8001
<b>D</b>	D, Definite Time	0.4797	0.21359	1.0000	1.5625	0.0280	0.8750
<b>M</b>	M, Moderately Inverse	0.3022	0.12840	1.0000	0.5000	0.0280	1.7500
<b>I1</b>	I, I1, Inverse Time	8.9341	0.17966	1.0000	2.0938	0.0280	9.0000
<b>I2</b>	I2, Inverse Time	0.2747	0.10426	1.0000	0.4375	0.0280	0.8868
<b>V1</b>	V, V1, Very Inverse	5.4678	0.10814	1.0000	2.0469	0.0280	5.5000
<b>V2</b>	V2, Very Inverse	4.4309	0.09910	1.0000	1.9531	0.0280	5.8231
<b>E1</b>	E, E1, Extremely Inverse	7.7624	0.02758	1.0000	2.0938	0.0280	7.7500
<b>E2</b>	E2, Extremely Inverse	4.9883	0.01290	1.0000	2.0469	0.0280	4.7742
<b>A</b>	A, Standard Inverse	0.01414	0.00000	1.0000	0.0200	0.0280	2.0000
<b>B</b>	B, Very Inverse ( $I^2t$ )	1.4636	0.00000	1.0000	1.0469	0.0280	3.2500
<b>C</b>	C, Extremely Inverse ( $I^2t$ )	8.2506	0.00000	1.0000	2.0469	0.0280	8.0000
<b>G</b>	G, Long Time Inverse ( $I^2t$ )	12.1212	0.00000	1.0000	1.0000	0.0280	29.0000
<b>F</b>	Fixed Time *	0.0000	1.00000	0.0000	0.0000	0.0280	1.0000
<b>P</b>	Programmable	0 to 600	0 to 25	0 to 1	0.5 to 2.5	0.0280	0 to 30
<b>46</b>	Neg.-Seq. Overcurrent	‡	0	0	2	0.0280	100

\* Curve F has a fixed delay of one second times the Time Dial setting.

† For integrated reset, append **R** to the curve name. For example, curve **S1** has instantaneous reset. Curve **S1R** has integrated reset.

‡ Constant A is variable for the 46 curve and is determined, as necessary, based on system full-load current setting, minimum pickup, and K factor settings.

§ The programmable curve allows for four significant digits after the decimal place for every variable.

## TIME OVERCURRENT CHARACTERISTIC CURVE GRAPHS

Figures A-1 through A-16 illustrate the characteristic curves of the BE1-1051 relay. Table A-2 cross-references each curve to existing electromechanical relay characteristics. Equivalent time dial settings were calculated at a value of five times pickup.

*Table A-2. Characteristic Curve Cross-Reference*

Curve	Curve Name	Similar To
<b>S1</b>	S, S1, Short Inverse	ABB CO-2
<b>S2</b>	S2, Short Inverse	GE IAC-55
<b>L1</b>	L, L1, Long Inverse	ABB CO-5
<b>L2</b>	L2, Long Inverse	GE IAC-66
<b>D</b>	D, Definite Time	ABB CO-6
<b>M</b>	M, Moderately Inverse	ABB CO-7
<b>I1</b>	I, I1, Inverse Time	ABB CO-8
<b>I2</b>	I2, Inverse Time	GE IAC-51
<b>V1</b>	V, V1, Very Inverse	ABB CO-9
<b>V2</b>	V2, Very Inverse	GE IAC-53
<b>E1</b>	E, E1, Extremely Inverse	ABB CO-11
<b>E2</b>	E2, Extremely Inverse	GE IAC-77
<b>A</b>	A, Standard Inverse	BS, IEC Standard Inverse
<b>B</b>	B, Very Inverse ( $I^2t$ )	BS, IEC Very Inverse ( $I^2t$ )
<b>C</b>	C, Extremely Inverse ( $I^2t$ )	BS, IEC Extremely Inverse ( $I^2t$ )
<b>G</b>	G, Long Time Inverse ( $I^2t$ )	BS, IEC Long Time Inverse ( $I^2t$ )
<b>F</b>	Fixed Time	N/A
<b>P</b>	Programmable	N/A

#### **Time Dial Setting Cross-Reference**

Although the time characteristic curve shapes have been optimized for each relay, time dial settings of Basler Electric relays are not identical to the settings of electromechanical induction disk overcurrent relays. Table A-3 helps you convert the time dial settings of induction disk relays to the equivalent setting for Basler Electric relays. Enter time dial settings using BESTCOMS, S<g>-51P/51N/51Q/151N ASCII commands, or human-machine interface (HMI) Screens 5.x.8.1 (51P), 5.x.8.2 (51N), 5.x.8.3 (151N), and 5.x.8.4 (51Q). For more information, refer to Section 4, *Protection and Control, Overcurrent Protection, 51 – Time Overcurrent Protection*.

#### Using Table A-3

Cross-reference table values were obtained by inspection of published electromechanical time current characteristic curves. The time delay for a current of five times tap was entered into the time dial calculator function for each time dial setting. The equivalent Basler Electric time dial setting was then entered into the cross-reference table.

If your electromechanical relay time dial setting is between the values provided in the table, it will be necessary to interpolate (estimate the correct intermediate value) between the electromechanical setting and the Basler Electric setting.

Basler Electric relays have a maximum time dial setting of 9.9. The Basler Electric equivalent time dial setting for the electromechanical maximum setting is provided in the cross-reference table even if it exceeds 9.9. This allows interpolation as noted above.

Basler Electric time current characteristics are determined by a linear mathematical equation. The induction disk of an electromechanical relay has a certain degree of non linearity due to inertial and friction effects. For this reason, even though every effort has been made to provide characteristic curves with minimum deviation from the published electromechanical curves, slight deviations can exist between them.

In applications where the time coordination between curves is extremely close, we recommend that you choose the optimal time dial setting by inspection of the coordination study. In applications where coordination is tight, it is recommended that you retrofit your circuits with Basler Electric electronic relays to ensure high timing accuracy.

*Table A-3. Time Dial Setting Cross-Reference*

Curve	Equivalent To	Electromechanical Relay Time Dial Setting											
		0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	
Basler Electric Equivalent Time Dial Setting													
S, S1	ABB CO-2	0.3	0.8	1.7	2.4	3.4	4.2	5.0	5.8	6.7	7.7	8.6	9.7
L, L1	ABB CO-5	0.4	0.8	1.5	2.3	3.3	4.2	5.0	6.0	7.0	7.8	8.8	9.9
D	ABB CO-6	0.5	1.1	2.0	2.9	3.7	4.5	5.0	5.9	7.2	8.0	8.9	10.1
M	ABB CO-7	0.4	0.8	1.7	2.5	3.3	4.3	5.3	6.1	7.0	8.0	9.0	9.8
I, I1	ABB CO-8	0.3	0.7	1.5	2.3	3.2	4.0	5.0	5.8	6.8	7.6	8.7	10.0
V, V1	ABB CO-9	0.3	0.7	1.4	2.1	3.0	3.9	4.8	5.7	6.7	7.8	8.7	9.6
E, E1	ABB CO-11	0.3	0.7	1.5	2.4	3.2	4.2	5.0	5.7	6.6	7.8	8.5	10.3
I2	GE IAC-51	0.6	1.0	1.9	2.7	3.7	4.8	5.7	6.8	8.0	9.3	10.6	N/A
V2	GE IAC-53	0.4	0.8	1.6	2.4	3.4	4.3	5.1	6.3	7.2	8.4	9.6	N/A
S2	GE IAC-55	0.2	1.0	2.0	3.1	4.0	4.9	6.1	7.2	8.1	8.9	9.8	N/A
L2	GE IAC-66	0.4	0.9	1.8	2.7	3.9	4.9	6.3	7.2	8.5	9.7	10.9	N/A
E2	GE IAC-77	0.5	1.0	1.9	2.7	3.5	4.3	5.2	6.2	7.4	8.2	9.9	N/A

## THE 46 CURVE

The 46 curve (Figure A-17) is a special curve designed to emulate the  $(I_2)^2 t$  withstand ratings of generators using what is frequently referred to as the generator K factor.

### The 46 Curve Characteristics

#### 46 Pickup Current

Generators have a maximum continuous rating for negative sequence current. This is typically expressed as a percent of stator rating. When using the 46 curve, the user should convert the continuous  $I^2$  rating data to actual secondary current at the relay. This value (plus some margin, if appropriate) should be entered as the pickup setting. For example, if a generator's rated full-load current is 5 amperes, a pu setting of 0.5 A would allow 10% continuous  $I_2$ .

#### 46 Time Dial (= Generator K factor)

The amount of time that a generator can withstand a given level of unbalance is defined by Equation A-3.

$$t = \frac{K}{(I_2)^2} \quad \text{Equation A-3}$$

The K factor gives the time that a generator can withstand 1 per unit negative sequence current. For example, with a K factor of 20, since  $(I_2)^2$  becomes 1 at 1 per unit of current, the generator can withstand the condition for 20 seconds. Typical values for generator K factors are in the 2 to 40 range. The relay uses the "nominal current" setting of the relay (front panel Screen 6.3.7 or via the SG-NOM command) to determine what corresponds to 1 per unit current in the generator.

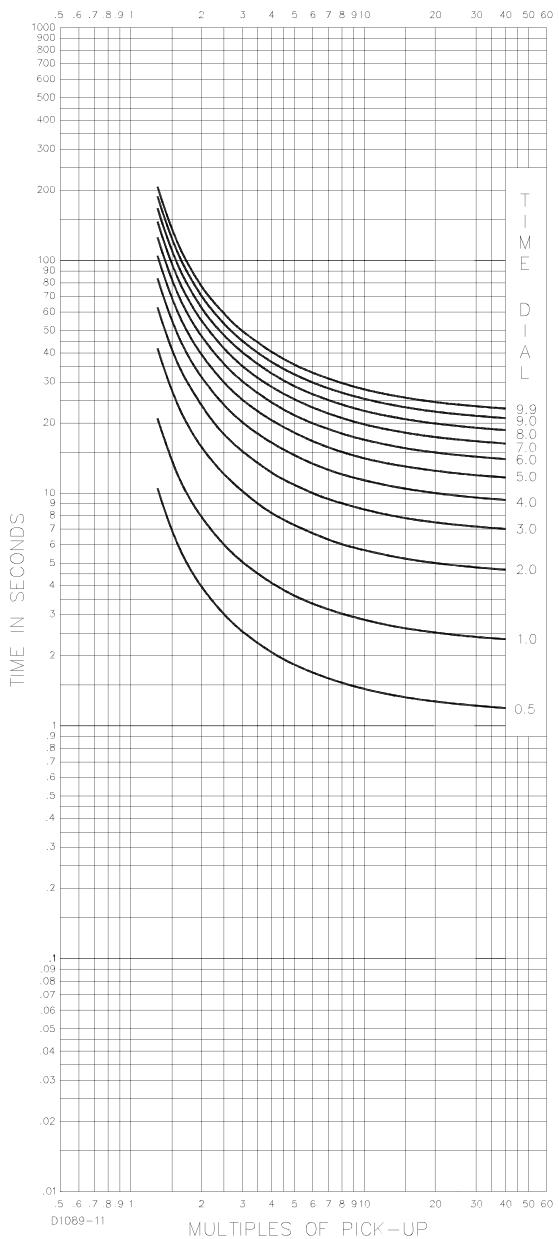


Figure A-3. Time Characteristic Curve L, L1, Long Inverse (Similar to ABB CO-5)

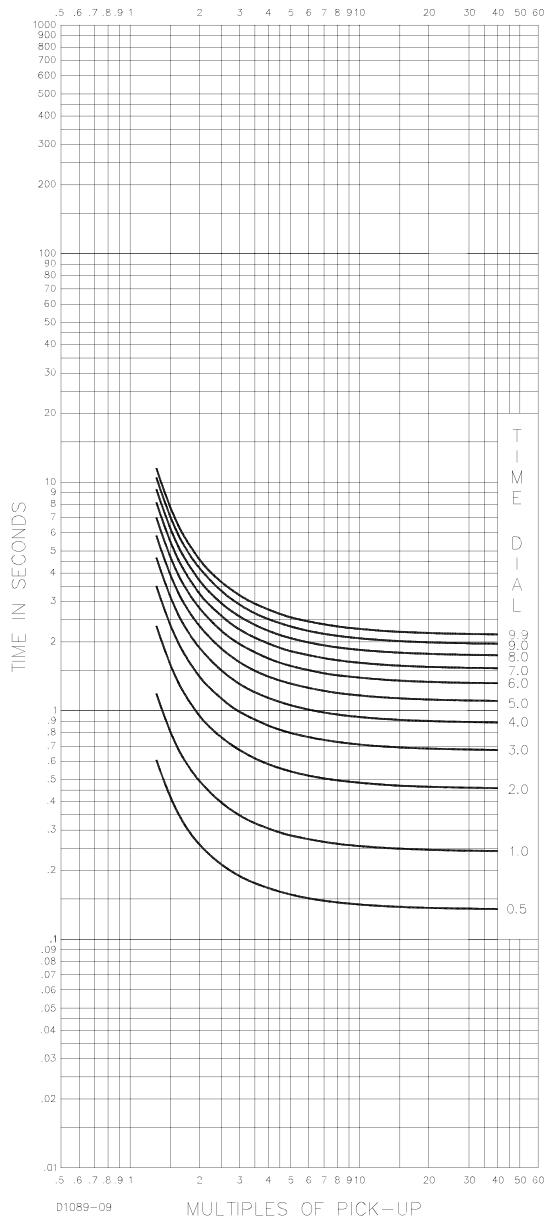


Figure A-5. Time Characteristic Curve D, Definite Time (Similar To ABB CO-6)

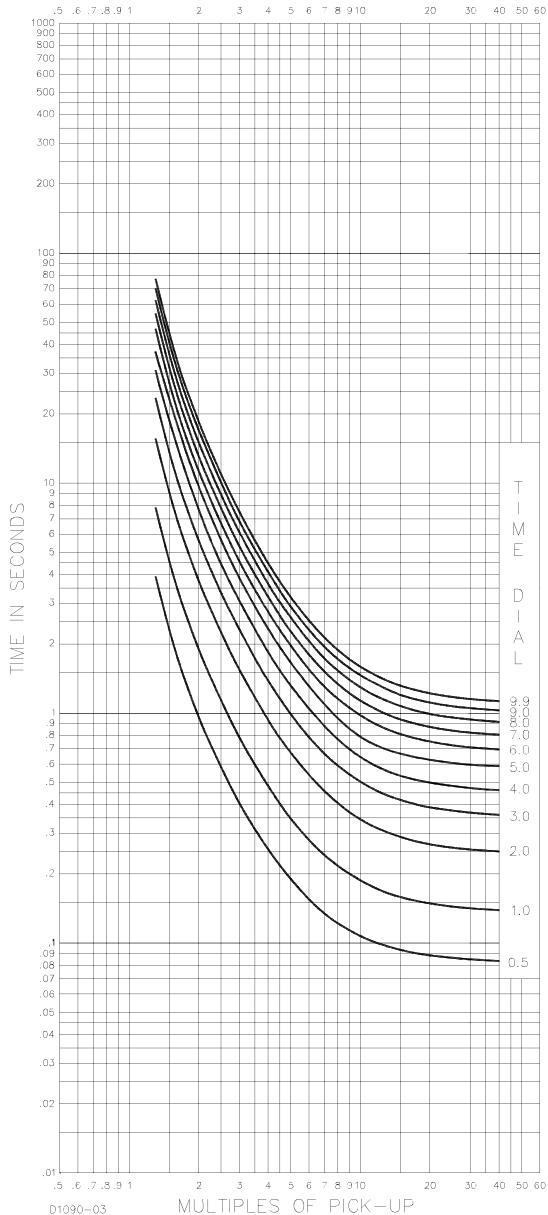


Figure A-9. Time Characteristic Curve V, V1, Very Inverse (Similar to ABB CO-9)

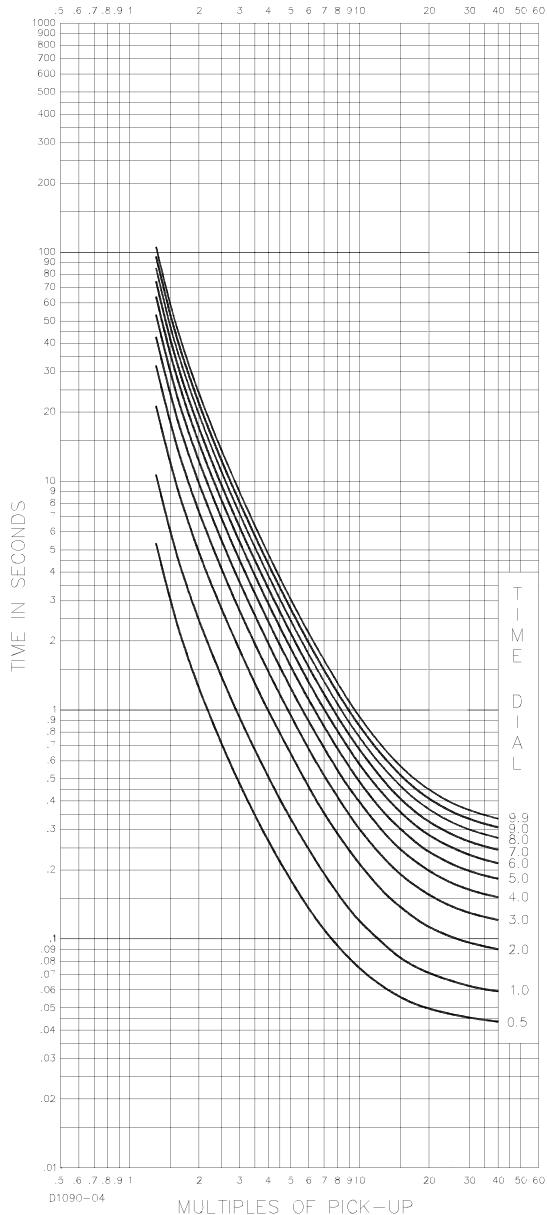


Figure A-11. Time Characteristic Curve E, E1, Extremely Inverse (Similar to ABB CO-11)

is exceeded the 269 Plus relay will not allow the active output relays to be reset until the temperature has fallen 4°C below the exceeded setpoint.

### 3.17 Other RTD Setpoints

A total of 10 RTD inputs is provided on the 269 Plus. Any RTD inputs not used for stator RTD protection can be used for other temperature monitoring functions. These will commonly be used for motor and load bearings. Separate alarm and trip level temperatures can be selected for each RTD in SETPOINTS mode, page 2.

Trip and alarm level setpoints should be set to "OFF" for any unused RTD terminals. When no connection is made to a set of RTD terminals or if a sensor becomes damaged, the ACTUAL VALUES display for that RTD will be "no RTD". If the "No Sensor Alarm" is enabled (SETPOINTS, page 5) the relay will enter TRIP/ALARM mode to warn the user of any open RTD connection that does not have its trip and alarm level setpoints stored as "OFF". Similarly, if the "Low Temperature Alarm" is enabled (Setpoints, page 5) the relay will enter Trip/Alarm mode to warn the user of any one RTD measuring 0°C (32°F). The 269 Plus can detect shorted RTDs in motors where the normal running temperature, hence stator RTD and bearing RTD temperature, is not 0°C (32°F) or less. If an RTD becomes shorted, and the "Low Temperature Alarm" setpoint is enabled, the 269 Plus will detect that shorted RTD, and displays a message indicating a "Low Temperature Alarm" for that specific RTD. The RTD number is also displayed for ease of troubleshooting. This feature is not recommended to be used in harsh environments where normal running motor temperature (stator and bearing RTD temperature) can go to 0°C or less.

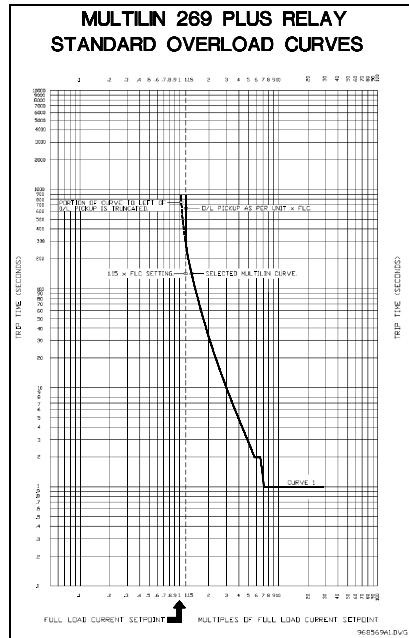
RTDs connected to the RTD terminals of the 269 Plus relay must all be of the same type. After an RTD temperature trip or alarm setpoint is exceeded, the 269 Plus relay will not allow the activated output relays to be reset until the temperature has fallen 4°C below the exceeded setpoint.

To use RTD #10 on the 269 Plus for ambient air temperature sensing a setpoint in page 5 of SETPOINTS mode must be changed (see sections 3.4, 3.20).

### 3.18 Overload Curve Setpoints

The overload curve is chosen in SETPOINTS mode, page 3. The curve will come into effect when the motor phase current goes over the overload pickup  $\times$  FLC level (see Figure 3.4). When this is true the motor thermal capacity will be decreased accordingly; the output relay assigned to the OVERLOAD TRIP function will activate when 100% of the available thermal capacity has been exhausted. Thermal capacity may be

reduced by the presence of unbalance and RTD bias as well as overload (if the U/B and RTD inputs to thermal memory are enabled). Thus the times on the overload curve may be reduced due to phase current unbalance (see section 3.20). A choice of eight standard curves, as shown in Figure 3.5, is available on the 269 Plus.



**Figure 3.4** Standard Overload Curves with Overload Pickup

If one of the standard curves shown in Figure 3.5 is desired for the given application, the answer to the SETPOINTS question, "CUSTOM CURVE?", should be "NO". In this case the desired curve can be chosen from the 8 standard curves available. If it is required to have a different curve the answer to the "CUSTOM CURVE?" question should be "YES". In this case the following lines in SETPOINTS mode will be the choice of breakpoints as shown in section 3.4. These points should be entered carefully and checked since motor overload protection is based largely on this curve. After a standard curve has been chosen, the numerical values for the breakpoints can be viewed by storing a "YES" for the "CUSTOM CURVE?" question and then examining the next few lines of setpoint values. The overload levels and trip times for the standard overload curves are as shown in Table 3-5.



### 3 SETUP AND USE

**Table 3-5** Standard Overload Curve Trip Times (in seconds)

Overload Level	GE Multilin Standard Curve Number							
	1	2	3	4*	5	6	7	8
1.05	853	1707	2560	3414	5975	7682	10243	12804
1.10	416	833	1249	1666	2916	3749	4999	6249
1.20	198	397	596	795	1391	1789	2385	2982
1.30	126	253	380	507	887	1141	1521	1902
1.40	91	182	273	364	637	820	1093	1366
1.50	70	140	210	280	490	630	840	1050
1.75	42	84	127	169	296	381	508	636
2.00	29	58	87	116	203	262	349	436
2.25	21	43	64	86	150	193	258	322
2.50	16	33	49	66	116	149	199	249
2.75	13	26	39	53	92	119	159	198
3.00	10	21	32	43	76	98	131	163
3.50	7	15	23	30	54	69	92	115
4.00	5	11	17	23	40	52	69	87
4.50	4	9	13	18	31	40	54	67
5.00	3	7	10	14	25	32	43	54
5.50	2	5	8	11	20	26	35	43
6.00	2	4	7	9	17	22	29	36
6.50	2	4	6	8	14	18	24	30
7.00	1	3	5	7	12	16	21	27
7.50	1	3	4	6	10	13	18	22
8.00	1	2	3	5	9	11	15	19

\* - Factory preset value

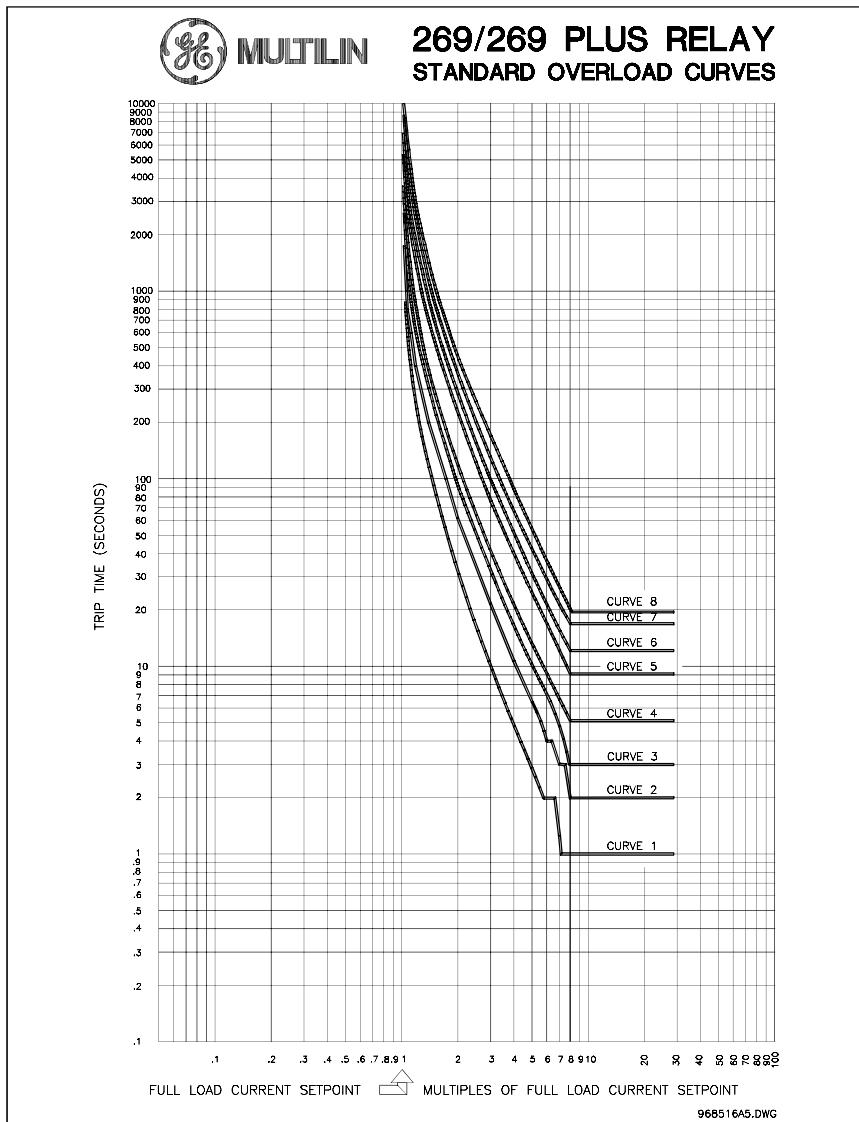
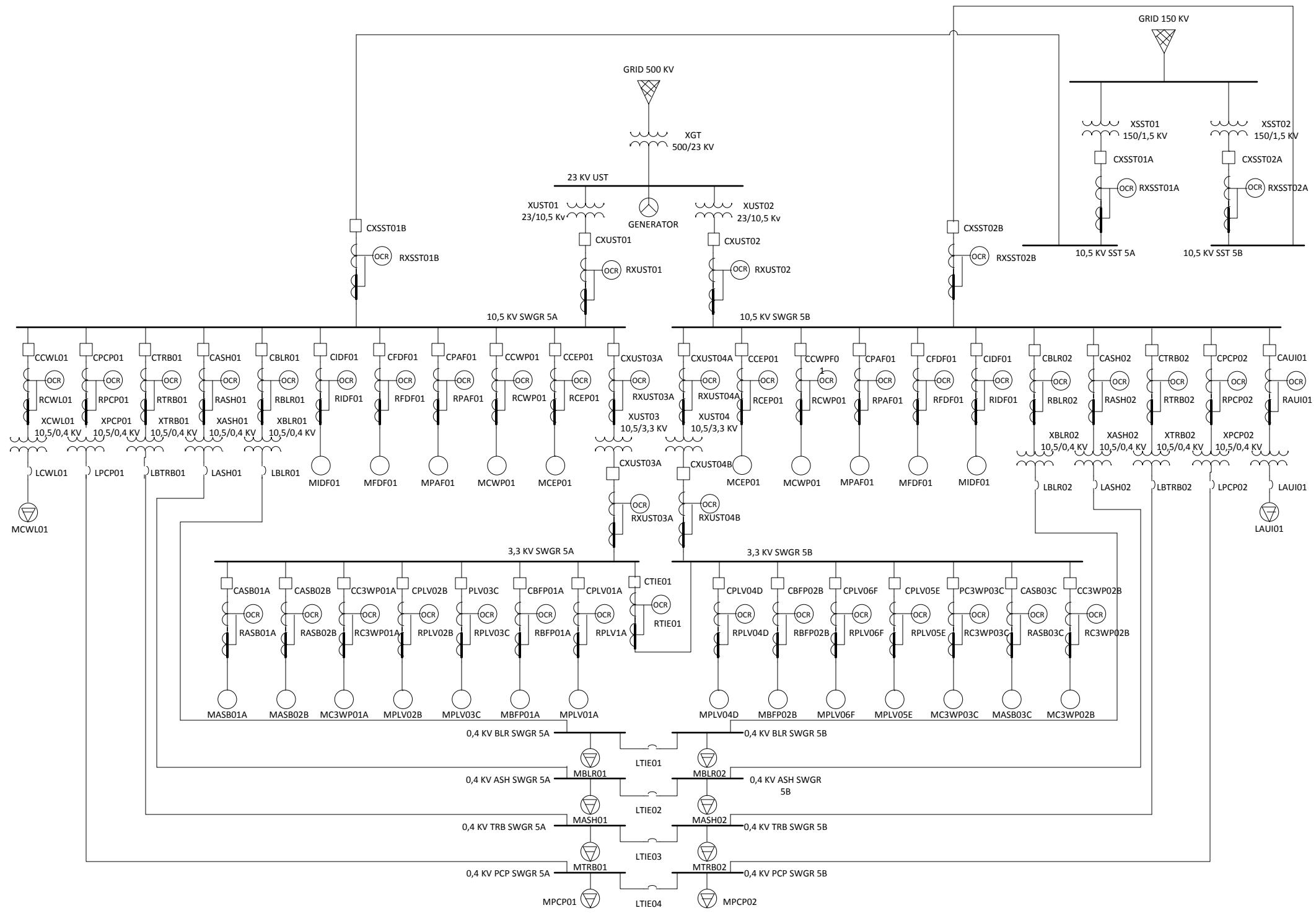


Figure 3.5 Standard Overload Curves



## **BIODATA PENULIS**



Nama : Nur Fauziyah  
TTL : Pasuruan, 29 Agustus 1995  
Kelamin : Perempuan  
Agama : Islam  
Alamat : Jl. RA. Kartini No. 18 Bangil  
Telp/HP : 082147524423  
Email : nurfauziyah.17071@mhs.its.ac.id

### **RIWAYAT PENDIDIKAN**

2001 – 2007 : SDN Latek  
2007 – 2010 : SMP Negeri 1 Bangil  
2010 – 2013 : MA Negreri Bangil  
2014 – 2017 : Bidang Studi Elektro Industri, Program D3  
Teknik Elektro, ITS  
2017 – Sekarang : Bidang Teknik Sitem Tenaga,  
Program S1 Teknik Elektro, ITS

### **PENGALAMAN KERJA**

Kerja Praktek di PT. Pelindo Marine Service  
Kerja Praktek di PT. Indonesia Power Suralaya Unit 8  
Kerja Praktek di PLN Rayon Kenjeran

### **PROYEK**

1. Battery Charge Controller pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro dengan Modified DC-DC Converter, PROGRAM PENELITIAN DANA MANDIRI/DEPARTEMEN DANA LOKAL ITS TAHUN 2017
2. “Togator” (Toxic Gas Detector): Sistem Monitoring Gas Beracun Secara Real Time Pada Area Bencana Alam Akibat Aktifitas Vulkanik Gunung Berapi, PKM DIKTI 2017