



**TUGAS AKHIR - EE 184801**

**STUDI KOORDINASI SISTEM PROTEKSI DENGAN  
MEMPERTIMBANGKAN *ARC FLASH* MENGGUNAKAN  
METODE PERHITUNGAN YANG DIMODIFIKASI DI PT  
PJB UP CIRATA**

Agung Fauzi  
NRP 07111745000060

Dosen Pembimbing  
Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.  
Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc.

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





**FINAL PROJECT - EE 184801**

***STUDY OF PROTECTION SYSTEM COORDINATION BY  
CONSIDERING ARC FLASH USING MODIFIED  
CALCULATION METHOD IN PT PJB UP CIRATA***

Agung Fauzi  
NRP 07111745000060

*Supervisor*  
Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.  
Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc.

***ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
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 “**Studi Koordinasi Sistem Proteksi dengan Mempertimbangkan Arc Flash Menggunakan Metode Perhitungan yang Dimodifikasi Di PT PJB UP Cirata**” 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 ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juni 2019



Agung Fauzi  
NRP: 07111745000060



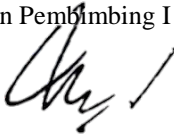
**STUDI KOORDINASI SISTEM PROTEKSI DENGAN  
MEMPERTIMBANGKAN ARC FLASH MENGGUNAKAN  
METODE PERHITUNGAN YANG DIMODIFIKASI  
DI PT PJB UP CIRATA**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Departemen Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I



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

Dosen Pembimbing II



Dr. Eng. I Made Y. Negara, S.T., M.Sc.  
NIP: 197007121998021001







# STUDI KOORDINASI SISTEM PROTEKSI DENGAN MEMPERTIMBANGKAN *ARC FLASH* MENGGUNAKAN METODE PERHITUNGAN YANG DIMODIFIKASI DI PT PJB UP CIRATA

Nama : Agung Fauzi  
Pembimbing 1 : Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.  
Pembimbing 2 : Dr. Eng. I Made Y. Negara, S.T., M.Sc.

## ABSTRAK

Berdasarkan standar IEEE 1584-2002, yaitu mengenai panduan untuk melakukan perhitungan dan analisa dari bahaya *arc flash* pada sistem kelistrikan tegangan rendah dan tegangan menengah, maka dapat ditentukan nilai insiden energi *arc flash*, jarak aman atau FPB (*Flash Protection Boundary*) terhadap bahaya *arc flash* dan peralatan pelindung diri atau PPE (*Personal Protective Equipment*) yang dipakai sesuai kategori level insiden energi yang terjadi. Nilai insiden energi *arc flash* dapat dihitung dengan menggunakan arus *bolted three-phase fault* dan *arc-clearing time* yang ditentukan oleh pengaturan waktu pemutusan gangguan pada sistem proteksinya. Simulasi hubung singkat sistem kelistrikan PT PJB UP Cirata dilakukan menggunakan *software* ETAP, yaitu untuk mengetahui nilai arus *bolted three-phase* dan juga nilai arus hubung singkat untuk pengaturan koordinasi sistem proteksi rele arus lebih dan LVCB. Pada standar IEEE 1584-2002, dapat dikembangkan lagi dengan menggunakan metode perhitungan yang dimodifikasi, yaitu dengan mempertimbangkan berkurangnya kontribusi arus hubung singkat dan waktu pemadaman *arc flash* (*arc-clearing time*) sebagai parameter perhitungan nilai insiden energi. Dari hasil perhitungan insiden energi *arc flash*, misalnya pada bus BUS\_20KV-1 dengan menggunakan perhitungan modifikasi didapatkan nilai insiden energi sebesar 3,2 cal/cm<sup>2</sup>, sedangkan menggunakan standar IEEE 1584-2002 didapatkan nilai insiden energi sebesar 3,851 cal/cm<sup>2</sup>. Dengan menggunakan perhitungan modifikasi, diperoleh nilai insiden energi yang lebih rendah.

**Kata kunci:** *Arc Flash*, Metode Modifikasi, Standar IEEE 1584-2002

*Halaman Ini Sengaja Dikosongkan*

# **STUDY OF PROTECTION SYSTEM COORDINATION BY CONSIDERING ARC FLASH USING MODIFIED CALCULATION METHOD IN PT PJB UP CIRATA**

*Name* : Agung Fauzi  
*Supervisor 1* : Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.  
*Supervisor 2* : Dr. Eng. I Made Y. Negara, S.T., M.Sc.

## **ABSTRACT**

*Based on the IEEE 1584-2002 standard, which is about guidelines for carrying out calculations and analysis of the arc flash hazard on low voltage and medium voltage electrical systems, it can be determined the incident energy of arc flash, working distance or FPB (Flash Protection Boundary) against arc flash hazards and personal protective equipment or PPE (Personal Protective Equipment) that is used according to the category of energy incident levels that occur. The incident energy of arc flash can be calculated using bolted current three-phase fault and arc-clearing time which is determined by setting the interruption timing of the protection system. The short circuit simulation of the electrical system of PT PJB UP Cirata was carried out using ETAP software, which is to determine the current value of bolted three-phase and also the value of short-circuit current to regulate the coordination of overcurrent relay protection systems and LVCB. In the IEEE 1584-2002 standard, it can be further developed by using a modified calculation method, namely by considering the reduced contribution of short-circuit currents and arc-clearing time as a parameter for calculating the incidents energy. From the results of the calculation incidents energy of arc flash, for example on the BUS\_20KV-1 bus using a modified calculation, the incident energy value is 3.2 cal/cm<sup>2</sup>, while using the IEEE 1584-2002 standard the incident energy value is 3.851 cal/cm<sup>2</sup>. Using a modification calculation, a lower value of incident energy is obtained.*

**Keywords:** Arc Flash, Modification Method, IEEE 1584-2002 Standard

*Halaman Ini Sengaja Dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Segala puji serta syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga tugas akhir yang berjudul “**Studi Koordinasi Sistem Proteksi dengan Mempertimbangkan Arc Flash Menggunakan Metode Perhitungan yang Dimodifikasi Di PT PJB UP Cirata**” dapat diselesaikan dengan baik dan tepat waktu. Penulis ingin menyampaikan rasa hormat dan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan dan penyelesaian karya tulis ini khususnya penulis sampaikan kepada:

1. Kedua orangtua dan keluarga yang senantiasa selalu mendukung dan mendoakan.
2. Bapak Margo Pujiantara dan Bapak I Made Yulistya Negara selaku pembimbing tugas akhir yang telah banyak memberi masukan dan nasihat yang berarti bagi penulis.
3. Rekan-rekan Lintas Jalur angkatan 2017 khususnya program studi Teknik Sistem Tenaga.
4. Rekan-rekan Tugas Akhir Laboratorium Instrumentasi Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga yang selalu memberikan semangat dan saling mendukung.
5. Seluruh sahabat penghuni Venus serta alumni yang selalu mendukung dan menyemangati.
6. Semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu persatu yang ikut andil dalam penyusunan karya tulis ini.

Harapan penulis semoga karya tulis ini dapat bermanfaat bagi penulis khususnya bagi para pembaca, serta dapat menambah wawasan dan ilmu pengetahuan dalam bidang sistem tenaga listrik.

Surabaya, Juni 2019

Agung Fauzi  
NRP 07111745000060

*Halaman Ini Sengaja Dikosongkan*

# DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b>	
<b>PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR</b> .....	i
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	iii
<b>ABSTRAK</b> .....	v
<b>ABSTRACT</b> .....	vii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	ix
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xi
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xv
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xvii
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang Masalah .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Metodologi .....	3
1.6 Sistematika Penulisan .....	4
1.7 Relevansi .....	5
<b>BAB 2 PROTEKSI DAN FENOMENA <i>ARC FLASH</i> PADA SISTEM TENAGA LISTRIK</b> .....	7
2.1 Gangguan Pada Sistem Tenaga Listrik.....	7
2.1.1 Gangguan Beban Lebih .....	8
2.1.2 Gangguan Hubung Singkat .....	8
2.1.3 Gangguan Tegangan Lebih .....	10
2.2 Rele Pengaman Arus Lebih .....	10
2.2.1 Rele Arus Lebih Waktu Tertentu .....	11
2.2.2 Rele Arus Lebih Waktu Invers .....	11
2.2.3 Rele Arus Lebih Waktu Seketika .....	13
2.3 Fenomena <i>Arc Flash</i> .....	14
2.4 Perhitungan Insiden Energi <i>Arc Flash</i> Berdasarkan Standar IEEE 1584-2002 .....	15
2.5 Perhitungan Insiden Energi <i>Arc Flash</i> Dengan Metode Modifikasi .....	18
2.6 Batas Jarak Perlindungan <i>Arc Flash</i> .....	21
2.7 Klasifikasi Pengelompokan <i>Personal Protective Equipment</i> ..	21

<b>BAB 3 SISTEM KELISTRIKAN PT PJB UP CIRATA .....</b>	<b>23</b>
3.1 Sistem Kelistrikan PT PJB UP Cirata .....	23
3.2 Kapasitas Pembangkitan PT PJB UP Cirata.....	24
3.3 Sistem Distribusi PT PJB UP Cirata .....	26
3.4 Beban Kelistrikan PT PJB UP Cirata .....	28
<b>BAB 4 HASIL SIMULASI DAN ANALISA .....</b>	<b>29</b>
4.1 Hasil Simulasi Insiden Energi <i>Arc Flash</i> Menggunakan ETAP 12.6 (Kondisi Eksisting).....	29
4.2 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa .....	30
4.2.1 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa Tipikal 1 .....	31
4.2.2 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa Tipikal 2 .....	41
4.2.3 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa Tipikal 3 .....	49
4.3 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan ke Tanah.....	57
4.3.1 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan ke Tanah Tipikal 1 .....	58
4.3.2 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan ke Tanah Tipikal 2 .....	63
4.3.3 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan ke Tanah Tipikal 3 .....	66
4.4 Hasil Simulasi Insiden Energi <i>Arc Flash</i> Kondisi <i>Resetting</i> .....	69
4.4.1 Perhitungan Insiden Energi <i>Arc Flash</i> Kondisi <i>Resetting</i> Dengan Menggunakan Standar IEEE 1584-2002 .....	71
4.4.2 Perhitungan Insiden Energi <i>Arc Flash</i> Kondisi <i>Resetting</i> Dengan Menggunakan Metode Modifikasi .....	76
4.5 Perhitungan FPB ( <i>Flash Protection Boundary</i> ) Berdasarkan Hasil Perhitungan Insiden Energi <i>Arc Flash</i> .....	85
4.5.1 Perhitungan FPB ( <i>Flash Protection Boundary</i> ) Kondisi <i>Resetting</i> Menggunakan Standar IEEE 1584-2002 .....	86
4.5.2 Perhitungan FPB ( <i>Flash Protection Boundary</i> ) Kondisi <i>Resetting</i> Menggunakan Metode Modifikasi .....	91
4.6 Perbandingan Besar Energi <i>Arc Flash</i> Kondisi <i>Resetting</i> Berdasarkan Standar IEEE 1584-2002 dan Metode Modifikasi....	94
4.7 Perbandingan FPB ( <i>Flash Protection Boundary</i> ) dan PPE ( <i>Personal Protective Equipment</i> ) Standar IEEE 1584-2002 dan Metode Modifikasi .....	96



<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>99</b>
<b>5.1 Kesimpulan .....</b>	<b>99</b>
<b>5.2 Saran.....</b>	<b>100</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>101</b>
<b>LAMPIRAN</b>	
<b>RIWAYAT HIDUP PENULIS</b>	

*Halaman Ini Sengaja Dikosongkan*

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Tertentu ( <i>Definite Time</i> ).....	11
<b>Gambar 2.2</b>	Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Invers.....	12
<b>Gambar 2.3</b>	Karakteristik Rele Arus Lebih Seketika ( <i>Instantaneous Time</i> ) .....	13
<b>Gambar 2.4</b>	Efek <i>Arc Flash</i> Pada Konduktor.....	14
<b>Gambar 2.5</b>	<i>Single Line Diagram</i> Sampel Plan.....	19
<b>Gambar 2.6</b>	Klasifikasi Alat Perlindungan Untuk Tiap Kategori....	22
<b>Gambar 3.1</b>	<i>Single Line Diagram</i> PT PJB UP Cirata .....	24
<b>Gambar 4.1</b>	<i>Single Line Diagram</i> Rele Arus Lebih Fasa Tipikal 1.	31
<b>Gambar 4.2</b>	Kurva Koordinasi Rele Arus Lebih Tipikal 1 Eksisting .....	34
<b>Gambar 4.3</b>	Kurva Koordinasi Rele Arus Lebih Tipikal 1 <i>Resetting</i> .....	40
<b>Gambar 4.4</b>	<i>Single Line Diagram</i> Rele Arus Lebih Fasa Tipikal 2.	42
<b>Gambar 4.5</b>	Kurva Koordinasi Rele Arus Lebih Fasa Tipikal 2 Eksisting .....	44
<b>Gambar 4.6</b>	Kurva Koordinasi Rele Arus Lebih Fasa Tipikal 2 <i>Resetting</i> .....	48
<b>Gambar 4.7</b>	<i>Single Line Diagram</i> Rele Arus Lebih Fasa Tipikal 3.	49
<b>Gambar 4.8</b>	Kurva Koordinasi Rele Arus Lebih Fasa Tipikal 3 Eksisting .....	52
<b>Gambar 4.9</b>	Kurva Koordinasi Rele Arus Lebih Fasa Tipikal 3 <i>Resetting</i> .....	56
<b>Gambar 4.10</b>	<i>Single Line Diagram</i> Rele Arus Lebih <i>Ground</i> Tipikal 1 Zona 1 .....	58
<b>Gambar 4.11</b>	Kurva Koordinasi Rele Arus Lebih <i>Ground</i> Tipikal 1 Zona 1 .....	60
<b>Gambar 4.12</b>	<i>Single Line Diagram</i> Rele Arus Lebih <i>Ground</i> Tipikal 1 Zona 2 .....	61
<b>Gambar 4.13</b>	Kurva Koordinasi Rele Arus Lebih <i>Ground</i> Tipikal 1 Zona 2 .....	63
<b>Gambar 4.14</b>	<i>Single Line Diagram</i> Rele Arus Lebih <i>Ground</i> Tipikal 2.....	64

<b>Gambar 5.15</b>	Kurva Koordinasi Rele Arus Lebih <i>Ground</i> Tipikal 2	.66
<b>Gambar 4.16</b>	<i>Single Line Diagram</i> Rele Arus Lebih <i>Ground</i> Tipikal 3 .....	67
<b>Gambar 4.17</b>	Kurva Koordinasi Rele Arus Lebih <i>Ground</i> Tipikal 3	.69

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b>	Persamaan Kurva Karakteristik Invers .....	13
<b>Tabel 2.2</b>	Faktor-Faktor untuk Peralatan dan Level Tegangan.....	17
<b>Tabel 2.3</b>	Kelas-Kelas Peralatan dan Tipikal Jarak Pekerja .....	17
<b>Tabel 2.4</b>	Domain Waktu yang Digunakan untuk Perhitungan <i>Arc Flash</i> .....	18
<b>Tabel 2.5</b>	Perlengkapan Keselamatan Diri Sesuai Standar NFPA 70E .....	22
<b>Tabel 3.1</b>	Data Kapasitas Pembangkitan Tiap Unit Generator .....	25
<b>Tabel 3.2</b>	Data Kapasitas Tiap Unit Transformator .....	27
<b>Tabel 3.3</b>	Nominal Tegangan Tiap Bus .....	27
<b>Tabel 3.4</b>	Data Beban 0,38 kV .....	28
<b>Tabel 4.1</b>	Hasil Simulasi Insiden Energi <i>Arc Flash</i> Kondisi Eksisting .....	30
<b>Tabel 4.2</b>	Data Rele Arus Lebih Fasa Kondisi Eksisting Tipikal 1	32
<b>Tabel 4.3</b>	Data Rele Arus Lebih Fasa Kondisi Eksisting Tipikal 2	43
<b>Tabel 4.4</b>	Data Rele Arus Lebih Fasa Kondisi Eksisting Tipikal 3	50
<b>Tabel 4.5</b>	Jenis Pentanahan Peralatan .....	57
<b>Tabel 4.6</b>	Hasil Simulasi Insiden Energi <i>Arc Flash</i> Kondisi <i>Resetting</i> .....	70
<b>Tabel 4.7</b>	Perbandingan Besar Energi <i>Arc Flash</i> Kondisi <i>Resetting</i> antara Standar IEEE 1584-2002 dan Perhitungan Modifikasi .....	95
<b>Tabel 4.8</b>	Perbandingan FPB ( <i>Flash Protection Boundary</i> ) Kondisi <i>Resetting</i> antara Standar IEEE 1584-2002 dan Perhitungan Modifikasi .....	96
<b>Tabel 4.9</b>	Jenis PPE ( <i>Personal Protective Equipment</i> ) Kondisi <i>Resetting</i> Berdasarkan Standar IEEE 1584-2002 .....	97
<b>Tabel 4.10</b>	Jenis PPE ( <i>Personal Protective Equipment</i> ) Kondisi <i>Resetting</i> Berdasarkan Perhitungan Modifikasi .....	98

*Halaman Ini Sengaja Dikosongkan*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Masalah

PLTA Cirata merupakan pusat listrik tenaga air yang dioperasikan oleh anak perusahaan PT Perusahaan Listrik Negara (PLN persero) yaitu PT Pembangkitan Jawa Bali (PJB). Total kapasitas daya yang dibangkitkan adalah sebesar 1008 MW, terdiri dari 8 Unit Pembangkit yang berada di *Power House* bawah tanah (*underground*) dengan kapasitas masing-masing pembangkit adalah 126 MW dan merupakan PLTA terbesar di Asia Tenggara. Tegangan listrik yang dihasilkan oleh satu buah generator adalah 16,5 kV, kemudian dinaikkan menjadi 500 kV melalui trafo utama (*main transformer*) untuk disalurkan ke sistem interkoneksi Jawa-Madura-Bali (JAMALI) [1]. Untuk menjaga kontinuitas daya listrik dan peralatan yang mendukung proses produksi, maka diperlukan koordinasi proteksi yang tepat guna meminimalisir dampak dari terjadinya gangguan. Salah satu gangguan yang ditimbulkan adalah adanya busur api (*arc flash*). Sebuah penilaian bahaya dari *arc flash* harus dilakukan untuk menentukan tingkat *personal protective equipment* (PPE) sebagai kebutuhan dalam aspek untuk menjaga keamanan dan keselamatan pekerja [2].

Berdasarkan standar IEEE 1584-2002 tentang masalah *arc flash*, dijelaskan bahwa analisa dari bahaya *arc flash* harus dilakukan dengan melakukan studi terhadap koordinasi proteksi dan hubung singkat. Studi proteksi diperlukan untuk menentukan waktu dari peralatan proteksi dalam mengisolasi ketika gangguan hubung singkat terjadi. Sedangkan studi dari hubung singkat digunakan untuk mendapatkan nilai arus *bolted* gangguan tiga fasa [2]. Tujuan dari analisa ini untuk menentukan insiden energi yang berpotensi ada selama peristiwa *arc flash* serta lama waktu dari terjadinya *arc flash*. Pada standar standar IEEE 1584-2002, tidak dipertimbangkan mengenai berkurangnya kontribusi dari arus hubung singkat pada tiap satuan waktu dan waktu pemutusan masing-masing *circuit breaker* (CB) dalam mengisolasi gangguan. Oleh karena itu, pada tugas akhir ini standar IEEE 1584-2002 akan dikembangkan menggunakan metode modifikasi dengan cara mengkombinasikan perhitungan antara berkurang arus kontribusi dan waktu pemutusan CB atau gangguan [3].

Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software* ETAP 12.6.0, hasil analisa dari analisa insiden energi *arc flash* pada simulasi digunakan untuk menentukan batasan jarak terhadap titik yang berpotensi terjadi *arc flash* terhadap pekerja, lalu akan ditentukan kategori dari bahaya *arc flash* beserta jenis alat pelindung diri (APD) sesuai dengan standar yang diberlaku yaitu standar NFPA 70E-2015 [4].

## 1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah:

1. Melakukan simulasi nilai insiden energi *arc flash* pada kondisi *existing* (yang telah ada) di PT PJB UP Cirata sesuai standar IEEE 1584-2002.
2. Melakukan simulasi dan menghitung nilai insiden energi *arc flash* setelah dilakukan *resetting* koordinasi proteksi di PT PJB UP Cirata sesuai standar IEEE 1584-2002.
3. Menghitung nilai insiden energi *arc flash* dengan menggunakan metode perhitungan yang dimodifikasi.
4. Membandingkan nilai insiden energi *arc flash* setelah *resetting* antara metode standar IEEE 1584-2002 dengan metode perhitungan yang dimodifikasi.
5. Mendapatkan jarak aman dari bahaya *arc flash* bagi pekerja setelah dilakukan *resetting*.
6. Pengelompokkan kategori insiden energi *arc flash* dan kelengkapan alat pelindung diri yang tepat digunakan berdasarkan standar NFPA 70E-2015.

## 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah:

1. Peralatan sistem proteksi yang digunakan adalah rele arus lebih (*overcurrent relay*).
2. *Rating* tegangan insiden energi *arc flash* sistem yang dianalisa yaitu pada level teggangan 20 kV, 6 kV dan 0,38 kV.
3. Standar perhitungan insiden energi *arc flash* berdasarkan standar IEEE 1584-2002.
4. Standar kelengkapan alat pelindung diri dari *arc flash* berdasarkan standar NFPA 70E-2015.
5. *Software* untuk melakukan permodelan dan simulasi sistem adalah ETAP 12.6.



## 1.4 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dari tugas akhir ini adalah:

1. Mengetahui besarnya insiden energi *arc flash* di PT PJB UP Cirata, baik menggunakan standar IEEE 1584-2002 atau berdasarkan metode perhitungan yang dimodifikasi.
2. Memperoleh *setting* kurva rele arus lebih yang terkoordinasi.
3. Dapat mengelompokkan level kategori insiden energi *arc flash* sehingga bisa mengetahui kelengkapan alat pelindung diri yang harus digunakan berdasarkan standar NFPA 70E-2015.
4. Dapat menentukan jarak aman bagi pekerja sesuai standar NFPA 70E-2015 guna meminimalisir kecelakaan akibat bahaya *arc flash*.

## 1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam tugas akhir ini antara lain meliputi:

1. Studi Literatur  
Studi literatur dilakukan untuk menunjang penguasaan materi-materi dari bahasan tugas akhir yang akan dikerjakan, baik melalui media cetak berupa buku diktat, *paper* dan jurnal atau media elektronik seperti dari *website* akademik. Materi-materi terdiri dari koordinasi proteksi rele arus lebih, perhitungan insiden energi *arc flash* dan standar yang digunakannya.
2. Pengumpulan Data  
Data-data yang diperlukan untuk tugas akhir ini terdiri dari *rating* tiap komponen seperti generator, transformator, rele arus lebih, *circuit breaker*, CT/PT, kabel, motor, busbar dan *single line diagram* PT PJB UP Cirata.
3. Pemodelan Sistem Kelistrikan dan Simulasi  
Setelah data-data teridentifikasi secara lengkap maka dilakukan pemodelan dan simulasi *single line diagram* PT PJB UP Cirata dengan menggunakan *software* ETAP 12.6 untuk mendapatkan simulasi studi aliran daya, gangguan hubung singkat dan nilai dari insiden energy *arc flash* yang ditimbulkan.
4. Analisa Data  
Hasil dari pemodelan dan simulasi sistem digunakan sebagai referensi untuk pengaturan koordinasi proteksi dengan mempertimbangkan nilai dari inisden energi *arc flash* berdasarkan standar IEEE 1584-2002 dan perhitungan yang dimodifikasi. Apabila nilai tersebut melebihi nilai yang diizinkan, maka harus-

dilakukan *resetting* sistem koordinasi proteksi dengan mempertimbangkan besarnya insiden energi *arc flash* dan waktu pemutusan *circuit breaker*. Kemudian menentukan jarak aman bagi pekerja dan kategori kelengkapan pelindung diri yang harus digunakan sesuai standar NFPA 70E-2015.

#### 5. Penyusunan Laporan

Setelah melakukan analisa, maka dilakukan penulisan dan penyusunan laporan tugas akhir yang terdiri dari beberapa bab yaitu bab pendahuluan, dasar teori, sistem kelistrikan plan, simulasi dan analisa data serta kesimpulan dari permasalahan yang dianalisa. Hasil analisa berupa perbandingan besarnya insiden energi *arc flash* menggunakan standar IEEE 1584-2002 dan perhitungan yang dimodifikasi pada tiap bus tegangan menengah di PT PJB UP Cirata, kategori level insiden energi *arc flash* serta jarak aman dan peralatan keselamatan diri yang diperlukan.

### 1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dari tugas akhir ini terdiri dari lima bab, yaitu sebagai berikut:

#### BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini merupakan bagian awal dari penulisan laporan tugas akhir yang berisi mengenai latar belakang masalah, perumusan dan batasan masalah, tujuan penulisan, metodologi penulisan, sistematika penulisan dan relevansinya.

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

Bab ini merupakan bagian yang berisi mengenai teori-teori pendukung yang akan digunakan sebagai referensi untuk menyelesaikan tugas akhir. Teori-teori tersebut yaitu seperti gangguan yang terdapat pada sistem tenaga listrik, prinsip kerja dan *setting* dari rele pengaman arus lebih, definisi dari *arc flash* (busur api listrik) dan perhitungan energinya berdasarkan standar IEEE 1584-2002 dan metode modifikasi, serta perhitungan batas jarak perlindungan *arc flash* dan pengelompokkan kategori insiden energinya dengan perlengkapan keselamatan diri berdasarkan standar NFPA 70E-2015.

### BAB III : SISTEM KELISTRIKAN PT PJB UP CIRATA

Bab ini merupakan bagian yang berisi tentang sistem kelistrikan yang ada di PT PJB UP Cirata, meliputi data dan spesifikasi dari peralatan-peralatan, konfigurasi sistem kelistrikan dan hal-hal mengenai operasi sistem tenaga listrik.

### BAB 4 : HASIL SIMULASI DAN ANALISA

Bab ini merupakan bagian yang berisi tentang koordinasi rele proteksi arus lebih dan menentukan besarnya insiden energi *arc flash*, baik pada kondisi *existing* dan juga pada kondisi *resetting* untuk menemukan *setting* koordinasi proteksi yang tepat, yaitu dengan menggunakan perhitungan dan juga simulasi dengan menggunakan *software* ETAP 12.6. Setelah didapatkan nilai insiden energi *arc flash*, maka akan ditentukan alat pelindung diri yang cocok berdasarkan standar NFPA 70E-2015.

### BAB 5 : PENUTUP

Bab ini merupakan bagian terakhir yang berisi tentang kesimpulan dan juga saran dari hasil simulasi serta analisis yang telah dilakukan dari tugas akhir ini.

#### **1.7 Relevansi**

Penelitian ini bermanfaat untuk mengetahui sistem koordinasi proteksi suatu plan dengan memperhitungkan dampak dari adanya gangguan sistem tenaga listrik yang terjadi, salah satu dampak tersebut adalah adanya *arc flash* yang dapat merusak peralatan dan berbahaya bagi keselamatan pekerja. Perbandingan perhitungan *arc flash* dilakukan berdasarkan standar IEEE 1584-2002 dan metode perhitungan modifikasi untuk mengetahui dan mengurangi insiden energi *arc flash*. Hasil dari nilai insiden energi *arc flash*, dijadikan parameter *resetting* rele arus lebih (*overcurrent*) yang lebih tepat dan juga dapat diketahui kelengkapan pelindung diri yang harus digunakan sesuai standar NFPA 70E. Selain hal tersebut, juga dapat memberikan kontribusi dan referensi bagi pembaca atau penelitian yang mengambil topik serupa.

*Halaman Ini Sengaja Dikosongkan*

## **BAB 2**

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

Ada beberapa pertimbangan yang harus diperhatikan ketika akan menentukan setting koordinasi proteksi suatu sistem tenaga listrik. Pertimbangan tersebut misalnya terhadap dampak yang akan dihasilkan pada saat terjadi gangguan seperti potensi adanya *arc flash* (busur api). Karena itu, untuk menjaga dan mengamankan para pekerja maupun kerusakan peralatan dari bahaya *arc flash* maka perlu diketahui besarnya energi *arc flash* yang dihasilkan. Nilai energi *arc flash* yang dihasilkan tidak boleh melebihi nilai standar yang diizinkan, yaitu bisa dilihat berdasarkan standar IEEE 1584-2002 mengenai masalah *arc flash*. Pada bab ini terdiri dari beberapa materi yang berkaitan dengan fenomena *arc flash* dan cara mengurangi nilai inside energi *arc flash*, serta mengenai gangguan pada sistem tenaga listrik dan juga proteksi yang digunakannya yaitu proteksi arus lebih.

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

Pada dasarnya suatu gangguan dalam sistem tenaga listrik adalah setiap keadaan sistem yang tidak normal dan dapat mengakibatkan terganggunya kontinuitas pelayanan tenaga listrik kepada pelanggan. Umumnya gangguan tersebut terdiri dari gangguan hubung singkat (*short circuit*) dan juga rangkaian terbuka (*open circuit*), dimana gangguan-gangguan dari rangkaian terbuka jauh lebih jarang terjadi daripada gangguan-gangguan hubung singkat [5]. Terdapat dua macam sumber gangguan sistem tenaga listrik [6], yaitu gangguan yang berasal dari dalam sistem yang disebabkan oleh kesalahan mekanis, tegangan dan arus tidak normal pada sistem serta beban yang melebihi kapasitas sistem dan gangguan yang berasal dari luar sistem yang disebabkan oleh pengaruh cuaca seperti hujan, angin, serta surja petir, pengaruh lingkungan antara lain pohon tumbang atau benda asing jatuh yang mengenai saluran listrik.

Berdasarkan dari lamanya waktu gangguan, terdapat 2 jenis gangguan yang bisa terjadi pada sistem tenaga listrik yaitu [6]:

- 1) Gangguan permanen, yaitu gangguan yang tidak hilang atau tetap ada apabila pemutus tenaga telah terbuka. Untuk menghilangkan gangguan permanen diperlukan tindakan perbaikan langsung pada titik penyebab gangguan tersebut.

- 2) Gangguan sementara, gangguan jenis ini dapat hilang dengan sendirinya atau pada bagian yang terganggu diputus secara sesaat dari sumber tegangannya.

Jika terjadi gangguan dalam sistem tenaga listrik, akan mengalir arus gangguan yang ditentukan oleh impedansi internal emf mesin listrik (generator, motor) dan impedansi saluran pada jaringan tersebut. Arus mengalir menuju ke titik gangguan pada fasa yang terganggu, dimana arus gangguan tersebut memiliki nilai yang jauh lebih besar karena pengaruh arus jangkar pada fluks dalam mesin-mesin listrik dijaringannya, sehingga dapat terjadi kenaikan temperatur/panas pada peralatan yang dapat menyebabkan kerusakan [5]. Ada beberapa penyebab terjadinya gangguan pada sistem tenaga listrik, antara lain:

### 2.1.1 Gangguan Beban Lebih

Gangguan beban lebih atau *overload* terjadi karena arus yang mengalir melebihi arus nominal yang diizinkan ( $I > I_n$ ). Pada saat gangguan ini terjadi, arus yang mengalir melebihi dari kapasitas peralatan listrik (generator, trafo, motor, dll) dan pengaman yang terpasang. Arus lebih ini menimbulkan panas yang dapat merusak isolasi peralatan [7].

### 2.1.2 Gangguan Hubung Singkat

Hubung singkat adalah hubungan konduktor melalui hambatan atau impedansi yang cukup rendah antara dua atau lebih bagian konduktif sehingga menimbulkan perbedaan potensial listrik [8]. Gangguan hubung singkat adalah gangguan yang sering terjadi dalam suatu sistem tenaga listrik, gangguan ini disebabkan karena adanya saluran fasa yang terhubung dengan saluran fasa lainnya atau terhubung dengan *ground*. Gangguan ini dapat menyebabkan penurunan stabilitas daya, terhentinya penyaluran daya dan terjadinya arus yang besar sehingga dapat merusak peralatan listrik yang ada di sekitar titik gangguan. Besarnya arus gangguan hubung singkat dapat ditentukan berdasarkan impedansi dari peralatan listrik pada sistem tersebut. Gangguan hubung singkat dapat digolongkan menjadi dua kelompok [7], yaitu:

- 1) Gangguan hubung singkat simetri

Gangguan hubung singkat simetri atau disebut gangguan hubung singkat seimbang yaitu gangguan yang terjadi pada semua fasanya atau biasa disebut hubung singkat tiga fasa, sehingga arus maupun tegangan setiap fasanya tetap seimbang setelah gangguan terjadi. Gangguan ini

dapat dianalisa dengan menggunakan komponen urutan positif. Adapun persamaan arus hubung singkat tiga fasa ( $I_{sc_{3\phi}}$ ) sebagai berikut:

$$I_{sc_{3\phi}} = \frac{V_{LN}}{Z_1} \quad (2.1)$$

dimana:

$V_{LN}$  = tegangan *line to netral*  
 $Z_1$  = impedansi urutan positif

2) Gangguan hubung singkat tak simetri

Gangguan hubung singkat tak simetri atau disebut gangguan tidak seimbang adalah gangguan yang mengakibatkan tegangan dan arus mengalir pada setiap fasanya menjadi tidak seimbang, Gangguan hubung singkat ini dapat mengakibatkan arus yang sangat besar pada fasa yang mengalami gangguan. Gangguan ini terdiri dari:

a. Hubung singkat antar fasa

Hubung singkat ini terjadi antara dua fasa tanpa terhubung ke tanah. Adapun persamaan arus hubung singkat antar fasa ( $I_{sc}$ ) sebagai berikut:

$$I_{sc_{2\phi}} = \frac{V_{LL}}{Z_1 + Z_2} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{sc_{3\phi}} \quad (2.2)$$

dimana:

$V_{LL}$  : tegangan *line to line*  
 $Z_1$  : impedansi urutan positif  
 $Z_2$  : impedansi urutan negatif

b. Hubung singkat dua fasa ke tanah

Hubung singkat ini terjadi karena terdapat dua konduktor fasa yang terhubung dengan tanah. Arus hubung singkat dua fasa ke tanah didapatkan persamaan berikut :

$$I_{sc} = \frac{V_{LN}}{Z_1 + (Z_2 Z_0 / Z_2 + Z_0)} \quad (2.3)$$

dimana:

$V_{LN}$  : tegangan *line to netral*  
 $Z_1$  : impedansi urutan positif  
 $Z_2$  : impedansi urutan negatif  
 $Z_0$  : impedansi urutan nol

c. Hubung singkat satu fasa ketanah

Hubung singkat ini melibatkan impedansi urutan nol ( $Z_0$ ), dan besarnya arus hubung singkat ini tergantung sistem pentanahan yang digunakan. Besaran arus hubung singkat 1 fasa ( $I_{sc0}$ ) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$I_{sc1\phi} = \frac{3V_{LN}}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (2.4)$$

dimana:

- $V_{LN}$  : tegangan *line to netral*
- $Z_1$  : impedansi urutan positif
- $Z_2$  : impedansi urutan negatif
- $Z_0$  : impedansi urutan nol

### 2.1.3 Gangguan Tegangan Lebih

Gangguan tegangan lebih terjadi karena peningkatan tegangan sistem yang melebihi tegangan operasinya. Gangguan tegangan lebih dapat terjadi antara lain karena gangguan petir dan gangguan surja hubung, diantaranya adalah penutupan kembali saluran dengan cepat atau pelepasan beban akibat gangguan [7].

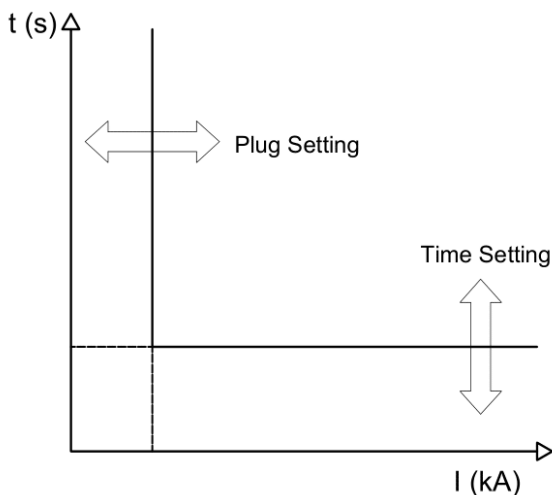
## 2.2 Rele Pengaman Arus Lebih

Rele arus lebih atau *over-current relay* (OCR) memiliki sebuah *input* tunggal berupa arus bolak-balik, sedangkan *outputnya* adalah kontak dalam keadaan terbuka (*normally open*) yang akan berubah menjadi keadaan tertutup ketika arus yang mengalir melebihi batas arus *settingnya*. Rele arus lebih memiliki dua pengaturan, yaitu pengaturan waktu untuk menentukan waktu operasi rele dan pengaturan arus kerja untuk menentukan besarnya arus operasi rele terhadap gangguan [9]. Koordinasi waktu pada rele arus lebih yaitu proses penentuan setting untuk rele agar dapat bekerja saat sistem mengalami gangguan. Rele akan beroperasi (trip) apabila besarnya  $I_f > I_p$  dan rele tidak akan beroperasi (blok) jika  $I_f < I_p$ , dimana  $I_p$  merupakan arus kerja dan  $I_f$  merupakan arus gangguan yang dinyatakan terhadap belitan sekunder transformator arus (CT) [8]. Rele arus lebih terdiri dari beberapa jenis, yaitu rele arus lebih waktu tertentu (*definite time*), rele arus lebih waktu invers (*inverse time*), dan rele arus lebih waktu seketika (*instantaneous time*) [10]. Karakteristik dari masing-masing rele arus lebih tersebut yaitu:



### 2.2.1 Rele Arus Lebih Waktu Tertentu

Pada rele arus lebih waktu tertentu (*definite time*) dapat diatur waktu operasi yang pasti dan juga dapat disesuaikan berdasarkan level arus kerjanya. Dengan demikian, rele arus lebih ini memiliki pengaturan waktu dan pengaturan arus kerja rele yang dapat disesuaikan. Jika level arus melebihi arus kerja atau arus *pickup setpoint*-nya maka akan diputuskan dalam waktu yang sama (*definite*) [9]. Gambar 2.1 menunjukkan karakteristik rele arus lebih waktu tertentu yang terdiri dari pengaturan arus (*plug setting*) dan pengaturan waktu (*time setting*).

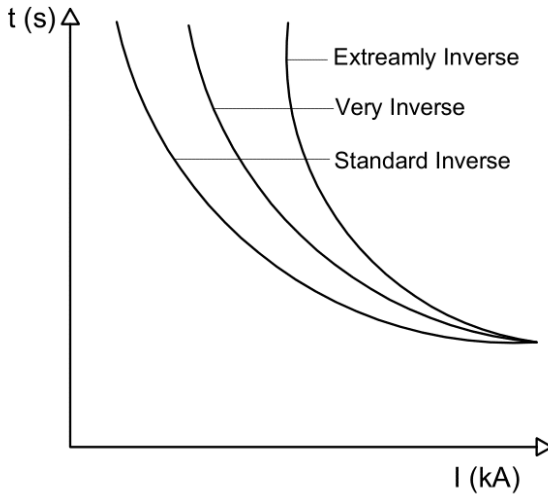


**Gambar 2.1** Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Tertentu (*Definite Time*) [9]

### 2.2.2 Rele Arus Lebih Waktu Invers

Pada rele arus lebih waktu invers (*inverse time*) semakin besar arus gangguan, maka waktu operasi rele untuk mencegah terjadinya kerusakan pada peralatan semakin cepat [9]. Karakteristik kerja rele arus lebih ini digambarkan dalam kurva arus-waktu atau disebut juga *time current curve* (TCC) dengan skala dalam *time dial*. Semakin besar *time dial*, semakin lama waktu operasi dari rele tersebut. Karakteristik rele arus lebih ini dapat dibedakan berdasarkan gradien kurvanya seperti pada Gambar 2.2, yaitu *standard inverse*, *very inverse* dan *extremely inverse* [9]. Setelan *time dial* menentukan waktu operasi rele. Untuk menentukan

*time dial* (T) dari masing masing kurva karakteristik invers rele arus lebih dapat digunakan Persamaan (2.5). Nilai *td* atau waktu operasi disesuaikan dengan rentang waktu 0,2 detik sampai 0,4 detik. Lalu koefisien *k* dan  $\alpha$  dapat disesuaikan dengan tipe kurva TCC yang akan dipilih seperti pada Tabel 2.1. Pada tugas akhir ini menggunakan tipe kurva *extreamly invers* dengan nilai koefisien *k* yaitu 80 dan nilai koefisien  $\alpha$  yaitu 2.



**Gambar 2.2** Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Invers [11]

$$T = \frac{td \times \left[ \left( \frac{I}{I_{set}} \right)^\alpha - 1 \right]}{k} \quad (2.5)$$

dimana:

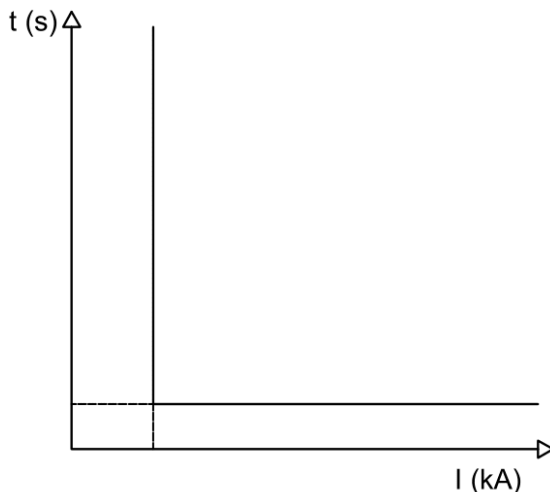
- td* : waktu operasi (detik)
- T* : *time dial*
- I* : nilai arus hubung singkat maksimum (A)
- Iset* : arus *pickup* (A)
- k* : koefisien invers 1
- $\alpha$  : koefisien invers 2

**Tabel 2.1** Persamaan Kurva Karakteristik Invers

Tipe Kurva	Koefisien	
	$k$	$\alpha$
<i>Standard Invers</i>	0,14	0,02
<i>Very Invers</i>	13,5	1
<i>Extremly Inverse</i>	80	2

### 2.2.3 Rele Arus Lebih Waktu Seketika

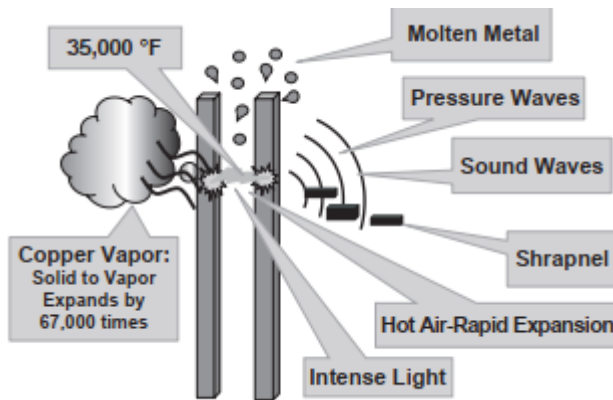
Pada rele arus lebih waktu seketika (*instantaneous time*), waktu operasi yang dimiliki rele adalah tanpa penundaan waktu, maksudnya rele bekerja dengan waktu yang cepat yaitu sebesar 0.1 detik, pada umumnya dapat bekerja kurang dari 0.08 detik [12]. Rele arus lebih ini hanya memiliki pengaturan untuk arus *pickup*nya saja dan tidak memiliki pengaturan untuk waktu operasinya. Kurva karakteristik dari rele arus lebih seketika seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.3, yaitu rele ini bekerja sesuai dengan besarnya arus gangguan yang dipilih. Dalam *setting* koordinasi proteksi pada sistem distribusi tegangan menengah disebut dengan setting moment/instant [9].



**Gambar 2.3** Karakteristik Rele Arus Lebih Seketika (*Instantaneous Time*) [9]

### 2.3 Fenomena Arc Flash

Busur api listrik atau *arc flash* adalah salah satu tipe pelepasan (discharge) muatan listrik antara beberapa elektroda. Pada CB (*circuit-breaker*), *arc flash* tetap ada selama periode singkat pemisahan kontak CB terjadi dan CB harus mampu memadamkan *arc flash* tersebut tanpa mengalami kerusakan [12]. Menurut NFPA (*National Fire Protection Association*) 70E-2015, *arc flash* terjadi karena adanya arus yang mengalir melalui udara antara konduktor fasa ke fasa atau konduktor fasa ke konduktor *ground*. Akibat adanya *arc flash* akan menghasilkan ledakan dan juga radiasi berupa panas yang dapat mencapai temperatur hingga 35.000°F atau 19.427°C. Paparan dari suhu ekstrem ini bisa mengubah keadaan konduktor dari padat menjadi logam cair panas dan kemudian menjadi uap seperti pada gambar 4, juga dapat membakar kulit secara langsung dan menyebabkan terbakarnya pakaian yang digunakan, sehingga menambah luka bakar bagi para pekerja disekitarnya [4].



**Gambar 2.4** Efek Arc Flash Pada Konduktor [13]

Nilai energi *arc flash* dipengaruhi oleh beberapa parameter, yaitu arus hubung singkat maksimum atau arus *bolted fault*, waktu operasi peralatan proteksi, jarak antar konduktor, level tegangan, jenis skema pembumian sistem, dan jarak pekerja dengan titik gangguan [13]. Sedangkan terjadinya *arc flash* bisa disebabkan karena adanya kegagalan mekanik, kegagalan isolasi, debu dan korosi, serta akibat kesalahan operator [4].

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

Insiden energi *arc flash* adalah jumlah energi impresif di permukaan pada jarak tertentu dari sumber yang dihasilkan selama peristiwa busur listrik. Insiden energi *arc flash* diukur dalam satuan Joule per sentimeter persegi ( $J/cm^2$ ) atau  $cal/cm^2$ . Sebelum melakukan perhitungan besarnya nilai insiden energi *arc flash*, maka harus dicari terlebih dahulu nilai dari arus *arc* (*arc current*) yang dihasilkan. Terdapat dua persamaan untuk menentukan nilai arus *arc*, yaitu untuk sistem dengan tegangan kurang dari 1000 V dan untuk sistem dengan tegangan lebih dari atau sama dengan 1000 V [2]. Perhitungan nilai arus *arc* berdasarkan standar IEEE 1584-2002, untuk sistem tegangan kurang dari 1000 V menggunakan persamaan berikut:

$$\log I_a = K + 0,662 \log I_{bf} + 0,0966 V + 0,000526 G + 0,5588 V (\log I_{bf}) - 0,00304 G (\log I_{bf}) \quad (2.6)$$

untuk sistem tegangan lebih dari atau sama dengan 1000 V menggunakan persamaan berikut:

$$\log I_a = 0,00402 + 0,983 \log I_{bf} \quad (2.7)$$

atau juga bisa dituliskan menjadi persamaan:

$$I_a = 1,00929 \log I_{bf}^{0,983} \quad (2.8)$$

dimana:

- log : log 10
- $I_a$  : arus *arc* (kA)
- $I_{bf}$  : arus *bolted* gangguan tiga fasa simetris RMS (kA)
- $K$  : -0,153 untuk konfigurasi peralatan terbuka (*no enclosure*)  
-0,097 dengan konfigurasi box (*enclosed equipment*)
- $V$  : tegangan sistem (kV)
- $G$  : jarak/celah antar konduktor (mm)

Setelah mendapatkan nilai arus *arc*, maka dapat dilakukan perhitungan nilai insiden energi *arc flash*. Pada keadaan normal, untuk referensi waktu *arc* durasinya adalah 0,2 detik dan jarak dari titik kemungkinan terjadi *arc* ke manusia adalah 610 mm. Persamaan

insiden energi normalisasi (*incident energy normalized*) adalah sebagai berikut:

$$\log E_n = K_1 + K_2 + 1,081 \log I_a + 0,0011G \quad (2.9)$$

atau juga bisa dituliskan menjadi persamaan:

$$E_n = I_a^{1,081} x 10^{(K_1+K_2+0,0011G)} \quad (2.10)$$

dimana:

- $E_n$  : insiden energi normalisasi (J/ cm<sup>2</sup>)
- $K_1$  : -0,792 untuk konfigurasi peralatan terbuka (*no enclosure*)  
-0,555 dengan konfigurasi box (*enclosed equipment*)
- $K_2$  : 0 untuk sistem yang tidak ditanahkan dan sistem dengan  
pembumian menggunakan tahanan yang besar  
-0,113 untuk sistem yang ditanahkan
- $G$  : jarak/celah antar konduktor (mm)

Setelah nilai dari  $E_n$  diketahui, maka untuk menghitung nilai insiden energi *arc flash* yaitu dengan persamaan berikut:

$$E = C_f E_n \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610}{D} \right)^x \quad (2.11)$$

atau dengan mensubstitusikan persamaan (2.7), (2.9) dan (2.10), maka didapatkan persamaan nilai insiden energi *arc flash* sebagai berikut:

$$E = C_f (1,00929 I_{bf}^{0,983})^{1,081} 10^{(K_1+K_2+0,0011G)} \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610}{D} \right)^x \quad (2.12)$$

dimana:

- $E$  : insiden energi (cal/cm<sup>2</sup>)
- $C_f$  : faktor perhitungan bernilai 1.0 untuk tegangan diatas 1 kV  
faktor perhitungan bernilai 1.5 untuk tegangan dibawah 1 kV
- $t$  : waktu *arc ing* (detik)
- $D$  : jarak dari titik *arc flash* ke pekerja (mm)
- $x$  : eksponen jarak (lihat tabel 2.2)

Penentuan nilai  $G$  atau jarak antar konduktor dan juga nilai  $x$  atau eksponen jarak, bisa dilihat pada Tabel 2.2. Lalu untuk penentuan nilai  $D$

atau jarak dari titik *arc flash* ke pekerja bisa dilihat pada Tabel 2.3. Pada level tegangan lebih dari 15 kV, jarak/celah antar konduktor berada diluar batasan dari model yang ada, sehingga Metode Lee bisa digunakan untuk menentukan nilai insiden energinya sesuai persamaan (2.13). Berikut persamaannya:

$$E = 2,142 \times 10^6 \times V \times I_{bf} \left( \frac{t}{D^2} \right) \quad (2.13)$$

dimana  $E$  adalah insiden energi dalam satuan  $J/cm^2$  dan  $V$  adalah tegangan sistem dalam satuan kV.

**Tabel 2.2** Faktor-Faktor untuk Peralatan dan Level Tegangan

<b>Level Tegangan (kV)</b>	<b>Jenis Peralatan</b>	<b>Tipikal gap antar konduktor (mm)</b>	<b>Ekspone jarak (x)</b>
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 - 15	<i>Open air</i>	13-153	2,000
	<i>Switchgear</i>	153	0,973
	<i>Cables</i>	13	2,000

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

<b>Kelas-kelas peralatan</b>	<b>Tipikal Jarak Pekerja (mm)</b>
<i>15 kV Switchgear</i>	910
<i>5 kV Switchgear</i>	910
<i>Low-voltage Switchgear</i>	610
<i>Low-voltage MCCs and Panelboards</i>	455
<i>Cable</i>	455
<i>Other</i>	<i>To be Determined in Field</i>

## 2.5 Perhitungan Insiden Energi Arc Flash Dengan Metode Modifikasi

Pada perhitungan nilai insiden energi *arc flash* dengan menggunakan standar IEEE 1584-2002, ada parameter yang tidak dipertimbangkan yaitu berkurangnya arus kontribusi gangguan tiga fasa dari setiap komponennya, serta waktu pemutusan masing-masing *circuit breaker* dalam menghilangkan gangguan yang terjadi (*arc clearing time*). Oleh karena itu, dengan menggunakan metode perhitungan modifikasi parameter-parameter tersebut digunakan untuk menentukan nilai insiden energi yang terjadi. Pengelompokkan domain waktu berdasarkan konstanta waktu dari mesin-mesin yang berpotensi menghasilkan arus kontribusi hubung singkat untuk tiap fase-fase peralihan tertentu [3]. Domain waktu tersebut seperti ditunjukkan pada Tabel 2.4.

**Tabel 2.4** Domain Waktu yang Digunakan untuk Perhitungan Arc Flash

Domain Waktu	Fase Peralihan	Komponen yang menghasilkan arus kontribusi hubung singkat
0 - 0,035	<i>Subtransient</i>	<i>Utility</i> , Generator, Mesin Sinkron, Motor Induksi > 1000 HP, Motor Induksi 50 – 1000 HP, Motor Induksi > 250 HP, Motor Induksi < 50 HP
0,035 – 0,08	<i>Transient</i>	<i>Utility</i> , Generator, Mesin Sinkron, Motor Induksi > 1000 HP, Motor Induksi 50 – 1000 HP, Motor Induksi > 250 HP
0,08 – 0,8	<i>Transient</i>	<i>Utility</i> , Generator, Mesin Sinkron, Motor Induksi > 1000 HP
0,8 – t ( <i>Arc Clearing Time</i> )	<i>Steady State</i>	<i>Utility</i> , Generator

Perhitungan total insiden energi adalah penjumlahan dari insiden energi tiap domain waktu menggunakan persamaan berikut [3]:

$$E_{total} = E_{+0\ sec} + E_{0,035\ sec} + E_{0,08\ sec} + E_{0,8\ sec} + E_{t\ sec} \quad (2.14)$$

dimana:

$E_{total}$  : total nilai insiden energi ( $J/cm^2$ )

$E_{+0\ s}$  : nilai insiden energi pada waktu +0 detik ( $J/cm^2$ )

$E_{0,035\ s}$  : nilai insiden energi pada waktu 0,035 detik ( $J/cm^2$ )

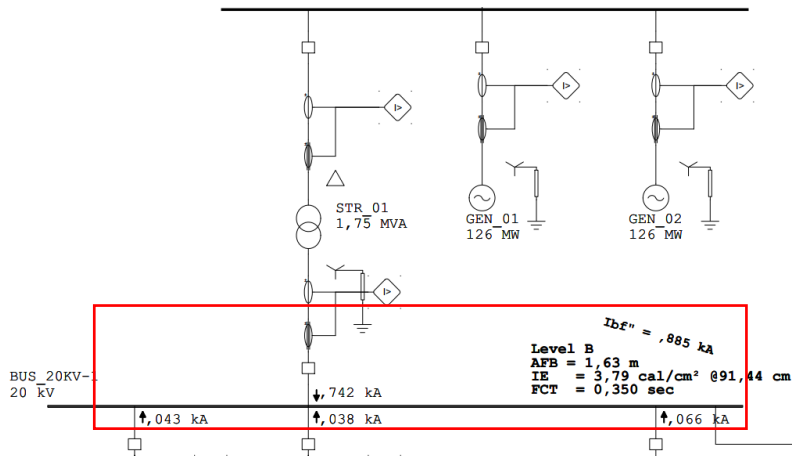


$E_{0,08 s}$  : nilai insiden energi pada waktu 0,08 detik ( $J/cm^2$ )

$E_{0,8 s}$  : nilai insiden energi pada waktu 0,08 detik ( $J/cm^2$ )

$E_{t s}$  : nilai insiden energi pada waktu t detik ( $J/cm^2$ )

Untuk lebih jelasnya lagi mengenai perbandingan perhitungan nilai insiden energi antara standar IEEE 1584-2002 dan perhitungan modifikasi, maka digunakan contoh sampel dari plan seperti pada Gambar 2.6, dimana terdapat fenomena *arc flash* pada bus BUS\_20KV-1 dengan total arus *bolted* pada 0,5 cycle sebesar 0,885 kA.



**Gambar 2.5** Single Line Diagram Sampel Plan

- a) Perhitungan nilai insiden energi *arc flash* standar IEEE-1584 2002  
Berdasarkan persamaan 2.13 dan paramater lainnya seperti nilai  $D$  adalah 910 mm, level tegangan 20 kV dan konversi dari  $J/cm^2$  ke  $cal/cm^2$  adalah 0,239, maka:

**BUS 20KV-1**

$$I_{bf} = 0,885 \text{ kA}; t = 0,352 \text{ detik}$$

$$E = 12,364 \times I_{bf} \times t$$

$$E = 12,364 \times 0,885 \times 0,352$$

$$E = 3,851 \text{ cal/cm}^2$$

b) Perhitungan nilai insiden energi *arc flash* metode modifikasi

Pada perhitungan modifikasi, berkurangnya arus kontribusi terhadap domain waktu diperhatikan yaitu pada waktu 0,035 detik (0,5 *cycle*), pada waktu 0,045 detik (1,5-4 *cycle*) dan pada waktu pemutusan gangguan, pada contoh ini yaitu 0,352 detik (30 *cycle*). Sehingga perhitungan menjadi:

**BUS 20KV-1 (FCT = 0,352 detik)**

*Domain waktu 0-0,035 detik (1/2 cycle):*

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 12,364 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf} \text{ Bus 20KV 1}) \times \Delta t$$

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 12,364 \times (0,742 + 0,043 + 0,038 + 0,066) \times 0,035$$

$$E = 0,385 \text{ cal/cm}^2$$

*Domain waktu 0,035-0,08 detik (1,5-4 cycle):*

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 12,364 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf} \text{ Bus 20KV 1}) \times \Delta t$$

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 12,364 \times (0,742 + 0,018 + 0,016 + 0,028) \times 0,045$$

$$E = 0,318 \text{ cal/cm}^2$$

*Domain waktu 0,08-0,352 detik (30 cycle):*

$$E_{0,272 \text{ detik}} = 12,364 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf} \text{ Bus 20KV 1}) \times \Delta t$$

$$E_{0,272 \text{ detik}} = 12,364 \times (0,742) \times 0,272$$

$$E = 2,5 \text{ cal/cm}^2$$

**Total Insiden Energi Bus 20KV-1 :**

$$E = (0,385 + 0,318 + 2,5) \text{ cal/cm}^2 = 3,2 \text{ cal/cm}^2$$

Berdasarkan contoh perhitungan pada bus BUS\_20KV-1 diatas, dapat dilihat bahwa pada perhitungan insiden energi *arc flash* dengan menggunakan standar IEEE 1584-2002, parameter arus *bolted* atau  $I_{bf}$  yang digunakan yaitu pada kondisi 0,5 *cycle* atau pada kondisi gangguan hubung singkat maksimum dan waktu pemutusan sesuai nilai FCT. Sedangkan pada metode modifikasi, arus *bolted* diuraikan dalam beberapa kondisi gangguan hubung singkat, yaitu dengan mempertimbangkan berkurangnya kontribusi arus *bolted* pada kondisi 0,5 *cycle*, 4 *cycle* dan 30 *cycle*. Penerapan domain waktu disesuaikan dengan kondisi masing-masing gangguan hubung singkat, yaitu dari waktu kondisi 0,5 *cycle* (0-0,035 detik), waktu kondisi 4 *cycle* (0,035-0,08 detik) hingga waktu kondisi 30 *cycle* (0,08-FCT detik). Perbedaan nilai arus *bolted* dan domain waktu ini yang menjadikan hasil perhitungan nilai insiden energi *arc flash* dengan menggunakan metode modifikasi lebih rendah daripada standar IEEE 1584-2002.

## 2.6 Batas Jarak Perlindungan Arc Flash

Batas jarak perlindungan terhadap titik *arc flash* disebut *flash protection boundary*. Ini merupakan suatu pendekatan tentang batas jarak tertentu dengan konduktor aktif, sehingga memungkinkan seseorang akan mengalami luka bakar tingkat dua akibat bahaya busur api listrik (*arc flash hazard*). Insiden energi *arc flash* memiliki beberapa zona seperti lapisan bola, dimana lapisan paling dalam menghasilkan bahaya yang paling besar. Batasan jarak perlindungan (*flash protection boundary*) dapat dikategorikan setelah nilai insiden energi *arc flash* diketahui [14]. Persamaan untuk menghitung batasan tersebut sesuai standar IEEE 1584-2002 [2], yaitu:

$$D_B = \left[ 4,184 C_f E_n \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (2.15)$$

dimana:

$D_B$  : jarak batasan dari titik *arc flash* (mm)

$E_B$  : insiden energi dalam J/cm<sup>2</sup> pada batas jarak

Nilai  $E_B$  dapat diatur 5,0 J/cm<sup>2</sup> atau 1,195 cal/cm<sup>2</sup> untuk *bare skin (no hood)* atau sesuai dengan *rating* dari PPE (*Personal Protective Equipment*) dengan catatan 5,0 J/cm<sup>2</sup> sama dengan 1,2 cal/cm<sup>2</sup>. Selain dengan persamaan (9), dapat juga dihitung dengan menggunakan metode Lee, persamaannya sebagai berikut:


$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times V \times I_{bf} \times \left( \frac{t}{E_B} \right)} \quad (2.16)$$

## 2.7 Klasifikasi Pengelompokan Personal Protective Equipment

Setelah mengetahui nilai dari insiden energi *arc flash* pada setiap bus, maka dapat dikelompokkan kedalam kategori bahayanya berdasarkan dari level energi yang dihasilkan. Terdapat beberapa kategori, yaitu dari kategori 1 yang merepresentasikan adanya potensi bahaya dengan intensitas yang kecil, hingga kategori 4 yang memiliki potensi bahaya dengan intensitas terbesar. Masing-masing kategori bahaya, memiliki perlengkapan pelindung diri (*personal protective equipment*) yang berbeda-beda sesuai standar NFPA 70E-2015 [4], dapat dilihat pada Tabel 2.5 dan untuk representasi PPE dapat dilihat pada Gambar 2.6.

**Tabel 2.5** Perlengkapan Keselamatan Diri Sesuai Standar NFPA 70E-2015

Kategori	Level Energi (Cal/cm <sup>2</sup> )	Perlengkapan Pelindung Diri
1	$4 \leq \text{cal/cm}^2 < 8$	Pakaian lengan panjang dan celana panjang tahan busur api
2	$8 \leq \text{cal/cm}^2 < 25$	Pakaian dalam dengan kain katun, serta pakaian luar dan celana panjang tahan api
3	$25 \leq \text{cal/cm}^2 < 40$	Pakaian dalam dengan kain katun ditambah baju, serta pakaian luar dan celana panjang tahan api yang mencakup seluruh tubuh
4	$\geq 40 \text{ cal/cm}^2$	Pakaian dalam dengan kain katun ditambah baju, serta pakaian luar dan celana panjang tahan api yang mencakup seluruh tubuh dua lapis

PPE CATEGORY 1	PPE CATEGORY 2	PPE CATEGORY 3	PPE CATEGORY 4
<p>Minimum Arc Rating of <b>4 cal/cm<sup>2</sup></b></p>  <p><b>Arc Rated Clothing:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• AR long-sleeve shirt and pants, or AR coverall</li> <li>• AR face shield, or AR flash suit hood</li> <li>• AR jacket, parka, rainwear, or hard hat liner (as needed)</li> </ul> <p><b>Protective Equipment:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hard hat</li> <li>• Safety glasses or safety goggles</li> <li>• Hearing protection (with inserts)</li> <li>• Heavy-duty leather gloves</li> <li>• Leather footwear (as needed)</li> </ul>	<p>Minimum Arc Rating of <b>8 cal/cm<sup>2</sup></b></p>  <p><b>Arc Rated Clothing:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• AR long-sleeve shirt and pants, or AR coverall</li> <li>• AR flash suit hood, or AR face shield and AR balaclava</li> <li>• AR jacket, parka, rainwear, or hard hat liner (as needed)</li> </ul> <p><b>Protective Equipment:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hard hat</li> <li>• Safety glasses or safety goggles</li> <li>• Hearing protection (with inserts)</li> <li>• Heavy-duty leather gloves</li> <li>• Leather footwear</li> </ul>	<p>Minimum Arc Rating of <b>25 cal/cm<sup>2</sup></b></p>  <p><b>Arc Rated Clothing:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• As required: AR long-sleeve shirt, AR pants, AR coverall, AR flash suit jacket, and/or AR flash suit pants</li> <li>• AR flash suit hood</li> <li>• AR gloves</li> <li>• AR jacket, parka, rainwear, or hard hat liner (as needed)</li> </ul> <p><b>Protective Equipment:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hard hat</li> <li>• Safety glasses or safety goggles</li> <li>• Hearing protection (with inserts)</li> <li>• Leather footwear (as needed)</li> </ul>	<p>Minimum Arc Rating of <b>40 cal/cm<sup>2</sup></b></p>  <p><b>Arc Rated Clothing:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• As required: AR long-sleeve shirt, AR pants, AR coverall, AR flash suit jacket, and/or AR flash suit pants</li> <li>• AR flash suit hood</li> <li>• AR gloves</li> <li>• AR jacket, parka, rainwear, or hard hat liner (as needed)</li> </ul> <p><b>Protective Equipment:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hard hat</li> <li>• Safety glasses or safety goggles</li> <li>• Hearing protection (with inserts)</li> <li>• Leather footwear (as needed)</li> </ul>

**Gambar 2.6** Klasifikasi Alat Perlindungan Untuk Tiap Kategori [13]

## **BAB 3**

### **SISTEM KELISTRIKAN PT PJB UP CIRATA**

PLTA Cirata merupakan pusat listrik tenaga air yang dioperasikan oleh anak perusahaan PT Perusahaan Listrik Negara (PLN persero) yaitu PT Pembangkitan Jawa Bali (PJB). PLTA Cirata berlokasi di Purwakarta, Jawa Barat. Memanfaatkan potensi tenaga air dari Sungai Citarum untuk kemudian ditampung dalam waduk yang tersebar hingga tiga kabupaten, yaitu Cianjur, Purwakarta dan Bandung. Pembangunan PLTA Cirata terbagi atas dua tahap, tahap pertama (Cirata I) dibangun sejak Januari tahun 1984 yang terdiri dari 4 unit dan pada akhir tahun 1988 sudah bisa beroperasi. Selanjutnya tahap kedua (Cirata II), dibangun lagi 4 unit dan mulai beroperasi pada tahun 1998. Total kapasitas daya yang dibangkitkan adalah sebesar 1008 MW, terdiri dari 8 Unit Pembangkit yang berada di *Power House* bawah tanah (*underground*) dengan kapasitas masing-masing pembangkit adalah 126 MW dan merupakan PLTA terbesar di Asia Tenggara.

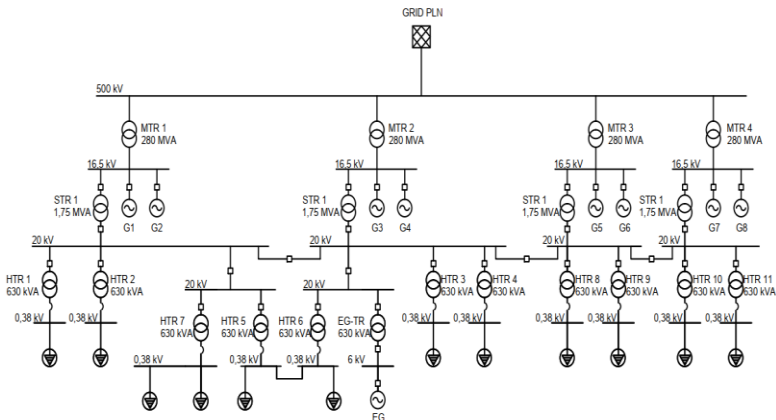
PLTA Cirata mampu menghasilkan energi listrik rata-rata sebesar 1428 GWh/tahun atau setara dengan 428 ton bahan bakar yang digunakan oleh pembangkit thermal. Tegangan listrik yang dihasilkan oleh satu generator adalah 16,5 kV, kemudian tegangan tersebut dinaikkan menjadi 500 kV melalui trafo utama (*main transformer*) untuk disalurkan ke sistem interkoneksi Jawa-Madura-Bali (JAMALI). Jaringan 500 kV dikendalikan oleh Pusat Pengaturan dan Penyaluran Beban (P3B) PT PLN (Persero).

#### **3.1 Sistem Kelistrikan PT PJB UP Cirata**

Sistem kelistrikan pada PT PJB UP Cirata selain disalurkan ke sistem interkoneksi 500 kV, juga dirancang guna memenuhi kebutuhan listrik pemakaian sendiri untuk operasional perusahaan. Dalam proses konversi level tegangan yang berbeda, terdapat beberapa transformator yang digunakan yaitu *main transformer* (MTR), *station transformer* (STR) dan *house transformer* (HTR). *Main transformer* (MTR) adalah transformator *step up* dari tegangan 16,5 kV ke tegangan 500 kV, *station transformer* (STR) adalah transformator *step up* dari tegangan 16,5 kV menjadi tegangan 20 kV untuk saluran distribusi tegangan menengah, *emergency transformer* (EG-TR) adalah transformator *step up* dari tegangan 6 kV menjadi tegangan 20 kV dengan sumber sebuah

emergency generator dan terakhir yaitu *house transformer* (HTR) adalah transformator *step down* dari tegangan 20 kV menjadi tegangan 0,38 kV untuk kebutuhan peralatan listrik tegangan rendah di PT PJB UP Cirata.

Tegangan 0,38 kV terdistribusi melalui 11 transformator HTR, dimana pembebanan pada transformator HTR1, HTR4, HTR8 dan HTR11 adalah identik yaitu untuk beban *Motor Control Center* (MCC) seperti *Cooling Water Pump*, *Governor Oil Pump*, *Inlet Valve Oil Pump* dan *Thrust Bearing High Pressure Oil Pump*. Pembebanan pada transformator HTR2, HTR3, HTR9 dan HTR10 juga identik yaitu untuk beban yang terhubung dengan panel distribusi seperti *Air Supply Pump*, *Draft Tube Dewatering Pump*, *Powerhouse Drainage Pump* dan penerangan. Pembebanan pada transformator HTR5 dan HTR6 adalah untuk suplai ke area GITET. Pembebanan pada transformator HTR7 adalah untuk suplai ke saluran bendungan dan gedung. Gambar *single line diagram* PT PJB UP Cirata bisa dilihat pada Gambar 3.1 berikut:



**Gambar 3.1** *Single Line Diagram* PT PJB UP Cirata

### 3.2 Kapasitas Pembangkitan PT PJB UP Cirata

Sistem pembangkitan utama yang terdapat pada sistem kelistrikan PT PJB UP Cirata adalah delapan unit generator sinkron tiga fasa identik, yang terbagi menjadi dua blok yaitu blok Cirata I dan blok Cirata II. Cirata I terdiri dari unit PLTA 1, PLTA 2, PLTA 3 dan PLTA 4, sedangkan Cirata II terdiri dari unit PLTA 5, PLTA 6, PLTA 7 dan PLTA 8. Masing-masing blok terhubung dengan *grid* PLN bertegangan 500 kV dan nilai

MVA hubung singkat yaitu 29237 MVA, lalu terdapat beberapa transformator untuk penggunaan beban pendukung operasional.

Untuk kapasitas pembangkitan tiap unit generator bisa dilihat pada Tabel 3.1 berikut:

**Tabel 3.1** Data Kapasitas Pembangkitan Tiap Unit Generator

No	Unit	MW	MVA	kV	%PF
1	PLTA #1	126	140	16,5	90
2	PLTA #2	126	140	16,5	90
3	PLTA #3	126	140	16,5	90
4	PLTA #4	126	140	16,5	90
5	PLTA #5	126	140	16,5	90
6	PLTA #6	126	140	16,5	90
7	PLTA #7	126	140	16,5	90
8	PLTA #8	126	140	16,5	90
9	EG	0,538	0,633	6	85

Terdapat delapan generator utama yang memiliki spesifikasi identik antara satu dengan yang lainnya. Spesifikasi dari generator utama tersebut adalah sebagai berikut:

Manufaktur	: ELIN-UNION	$X_{d''}$	: 19%
Tipe	: <i>Umbrella, vertical shaft, synchronous generator</i>	$X_{d''}/R_a$	: 19
Jumlah Kutub	: 32 (16 pasang kutub)	$R_a$	: 1 %
Putaran	: 187,5 rpm	$R_a$	: 0,01945
Tegangan	: 16,5 kV	$X_2$	: 18
Arus	: 4899 A (arus rating)	$X_2/R_2$	: 9
Frekuensi	: 50 Hz	$R_2$	: 2%
Cos Phi	: 0,9 lag	$R_2$	: 0,03889
Jumlah	: 8 unit	$X_0$	: 7
Kapasitas	: 140 MVA/unit	$X_0/R_0$	: 7
Efisiensi	: 98%	$R_0$	: 1 %
		$R_0$	: 0,01945

Selain generator utama, pada PT PJB UP Cirata terdapat sebuah *emergency generator* (EG) sebagai pembangkit atau suplai tenaga listrik cadangan. Untuk *emergency generator* yang digunakan memiliki spesifikasi sebagai berikut:

Manufaktur	: ELIN-UNION	$X_d''$	: 19%
Type	: NTJ-045C04F <i>synchronous generator</i>	$X_d''/R_a$	: 19
Jumlah Kutub	: 4	$R_a$	: 1 %
Putaran	: 1500 rpm	$R_a$	: 0,5688
Tegangan	: 6 kV	$X_2$	: 18
Arus	: 60,9 A	$X_2/R_2$	: 9
Frekuensi	: 50 Hz	$R_2$	: 2%
Cos Phi	: 0,85 lag	$R_2$	: 1,1376
Jumlah	: 1 unit	$X_0$	: 7
Kapasitas	: 0,538 MW	$X_0/R_0$	: 7
Efisiensi	: 95%	$R_0$	: 1 %
		$R_0$	: 0,5688

### 3.3 Sistem Distribusi PT PJB UP Cirata

Sistem distribusi adalah semua bagian peralatan sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan energi listrik dari sumber ke beban, baik melalui saluran udara tegangan menengah ataupun saluran kabel tegangan menengah. Sistem distribusi yang digunakan oleh PT PJB UP Cirata adalah tipe konfigurasi jaringan radial, dimana sumber dari generator 16,5 kV ditransformasikan menjadi tegangan 20 kV pada bus tegangan menengah dan tegangan 0,38 kV pada bus tegangan rendahnya. Sistem ini menyalurkan tenaga listrik melalui satu atau lebih *feeder* yang dihubungkan dengan saluran langsung ke beban. Keuntungan dari konfigurasi jaringan ini adalah pengoperasian yang mudah, lebih sederhana dan biaya relatif murah. Sedangkan kerugiannya adalah tingkat dari kontinuitas pelayanan yang rendah, yaitu bila terjadi gangguan pada salah satu *feeder* dapat mengakibatkan terputusnya pengiriman tenaga listrik ke beban.

PT PJB UP Cirata memiliki beberapa transformator untuk menunjang proses distribusi tenaga listrik, baik itu ke sisi PLN ataupun untuk pemakaian sendiri. Tabel 3.2 merupakan data dari transformator-transformator yang digunakan. Sebelum terhubung ke beban, terlebih dahulu tegangan keluaran dari transformator akan terhubung ke bus sebagai titik sambungan antara transformator dan beban. Tabel 3.3 merupakan data tiap bus dan level tegangannya. Pada Tugas Akhir ini, bus-bus yang akan dianalisa nilai inisiden energi *arc flash* di PT PJB UP Cirata yaitu pada bus 0,38 kV, 6 kV dan 20 kV. Pada bus 0,38 kV terdiri dari 11 bus, pada bus- 6 kV hanya terdiri dari 1 bus dan pada bus 20 kV terdiri dari 6 bus.



**Tabel 3.2** Data Kapasitas Tiap Unit Transformator

No	Transformator	MVA	kV	%Z	Hubungan
1	MTR_01	280	16,5/500	14,5	Δ/Y
2	MTR_02	280	16,5/500	14,5	Δ/Y
3	MTR_03	280	16,5/500	14,5	Δ/Y
4	MTR_04	280	16,5/500	14,5	Δ/Y
5	STR_01	1,75	16,5/20	6,25	Δ/Y
6	STR_02	1,75	16,5/20	6,25	Δ/Y
7	STR_03	1,75	16,5/20	6,25	Δ/Y
8	STR_04	1,75	16,5/20	6,25	Δ/Y
9	HTR_01	0,63	20/0,38	4	Δ/Y
10	HTR_02	0,63	20/0,38	4	Δ/Y
11	HTR_03	0,63	20/0,38	4	Δ/Y
12	HTR_04	0,63	20/0,38	4	Δ/Y
13	HTR_05	0,63	20/0,38	4	Δ/Y
14	HTR_06	0,63	20/0,38	4	Δ/Y
15	HTR_07	0,63	20/0,38	4	Δ/Y
16	HTR_08	0,63	20/0,38	4	Δ/Y
17	HTR_09	0,63	20/0,38	4	Δ/Y
18	HTR_10	0,63	20/0,38	4	Δ/Y
19	HTR_11	0,63	20/0,38	4	Δ/Y
20	EG_TR	0,63	6/20	4	Δ/Y

**Tabel 3.3** Nominal Tegangan Tiap Bus

No	ID Bus	Nominal kV
1	BUS_500KV	500
2	BUS_20KV-1	20
3	BUS_20KV-2	20
4	BUS_20KV-3	20
5	BUS_20KV-4	20
6	BUS_20KV-1-1	20
7	BUS_20KV-2-1	20
8	BUS_16.5KV-1	16,5
9	BUS_16.5KV-2	16,5
10	BUS_16.5KV-3	16,5
11	BUS_16.5KV-4	16,5
12	BUS_6KV-1	6

**Tabel 3.3** Nominal Tegangan Tiap Bus (lanjutan)

<b>13</b>	<b>BUS_0.38KV-1-1</b>	<b>0,38</b>
<b>14</b>	BUS_0.38KV-1-2	0,38
<b>15</b>	BUS_0.38KV-1-3	0,38
<b>16</b>	BUS_0.38KV-1-4	0,38
<b>17</b>	BUS_0.38KV-2-1	0,38
<b>18</b>	BUS_0.38KV-2-2	0,38
<b>19</b>	BUS_0.38KV-2-3	0,38
<b>20</b>	BUS_0.38KV-3-1	0,38
<b>21</b>	BUS_0.38KV-3-2	0,38
<b>22</b>	BUS_0.38KV-4-1	0,38
<b>23</b>	BUS_0.38KV-4-2	0,38

### 3.4 Beban Kelistrikan PT PJB UP Cirata

Terdapat beberapa beban listrik di PT PJB UP Cirata, yaitu beban dinamis dan beban statis. Beban dinamis adalah beban listrik yang terdiri dari motor-motor pendukung operasi pembangkit seperti motor *Cooling Water Pump* dan motor *High Pressure Oil Pump*. Sedangkan beban statis terdiri dari lampu-lampu penerangan. Pada analisa ini, digunakan permodelan beban *lump* atau gabungan antara beban dinamis dan beban statis. Pada Tabel 3.4 berisi data-data beban *lump* untuk pemakaian sendiri dengan level tegangan 0,38 kV yang terdapat di PT PJB UP Cirata.

**Tabel 3.4** Data Beban 0,38 kV

<b>No</b>	<b>ID Lump</b>	<b>Rating (kW)</b>	<b>FLA (A)</b>	<b>% PF</b>
<b>1</b>	PDC_01	400	716,3	85
<b>2</b>	PDC_02	383	684,7	85
<b>3</b>	PDC_03	383	684,7	85
<b>4</b>	PDC_04	400	730,2	85
<b>5</b>	PDC_05	213	385,9	85
<b>6</b>	PDC_06	213	385,9	85
<b>7</b>	PDC_08	400	730,2	85
<b>8</b>	PDC_09	383	684,7	85
<b>9</b>	PDC_10	383	684,7	85
<b>10</b>	PDC_11	400	730,2	85
<b>11</b>	GD_BARU	128	229,1	85
<b>12</b>	LINE_DUMP	340	611,1	85

## **BAB 4**

### **HASIL SIMULASI DAN ANALISA**

Simulasi besarnya nilai insiden energi *arc flash* di PT. PJB UP Cirata dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ETAP 12.6 dan standar IEEE 1584-2002. Simulasi hubung singkat menggunakan standar ANSI dan dilakukan pada waktu 0,5 cycle, 4 cycle dan 30 cycle, baik pada kondisi eksisting dan juga pada kondisi *resetting* dengan beberapa level tegangan sistem yaitu 20 kV, 6 kV dan 0,38 kV. Kondisi semua *tie bus* pada sistem diatur dalam kondisi *normaly open*. Hasil dari simulasi terdiri dari nilai arus *bolted*, arus *arcing*, FCT (*Fault Clearing Time*) serta level atau kategori bahayanya. Kategori bahaya akan digunakan sebagai penentuan pemakaian PPE (*Personal Protective Equipment*) yang harus digunakan petugas ketika bekerja pada lokasi bersangkutan berdasarkan standar NFPA 70E-2015. Jarak titik *arc flash* (*working distance*) disesuaikan dengan standar IEEE 1584-2002 yaitu berdasarkan kelas peralatan yang digunakan, untuk lebih lengkap bisa dilihat pada Tabel 2.3.

#### **4.1 Hasil Simulasi Insiden Energi Arc Flash Menggunakan ETAP 12.6 (Kondisi Eksisting)**

Hasil simulasi besarnya insiden energi *arc flash* dan parameter lainnya pada tiap-tiap bus dapat dilihat pada Tabel 4.1. Berdasarkan hasil simulasi besarnya insiden energi *arc flash* pada kondisi eksisting di PT. PJB UP Cirata, terdapat bus yang memiliki nilai insiden energi *arc flash* maksimum pada kategori 2 atau berdasarkan standar NFPA 70E-2015 memiliki nilai insiden energi *arc flash* 8 cal/cm<sup>2</sup> hingga 25 cal/cm<sup>2</sup>. Untuk mengurangi nilai insiden energi *arc flash* ini bisa dengan melakukan *resetting* pada sistem proteksi, yaitu dengan mengatur kerja rele pengaman dalam mendeteksi arus *arcing* secepat mungkin tanpa merubah koordinasi proteksi sistem.

Koordinasi proteksi sistem yang sudah ada (eksisting) dilakukan *resetting* untuk mendapatkan nilai insiden energi yang lebih rendah. Untuk mempermudah *resetting*, maka diterapkan pembagian sistem berdasarkan tipikal sesuai *Single Line Diagram* sistem kelistrikan di PT. PJB UP Cirata. Setelah dilakukan *resetting* pada tiap-tiap tipikal, akan dianalisa dampak dari *resetting* terhadap nilai FCT dan insiden energi *arc flash*, baik sesuai standar IEEE 1584-2002 ataupun dengan metode perhitungan modifikasi.

**Tabel 4.1** Hasil Simulasi Insiden Energi *Arc Flash* Kondisi Eksisting

BUS ID	Arus Bolted (kA)	Arus Arcing (kA)	FCT (s)	Insiden Energi (cal/cm <sup>2</sup> )	Kategori
BUS_20KV-1	0,885	0,885	0,450	4,879	Level 1
BUS_20KV-1-1	0,885	0,885	0,348	3,775	< Level 1
BUS_20KV-2	0,876	0,876	0,432	4,638	Level 1
BUS_20KV-2-1	0,876	0,876	0,327	3,514	< Level 1
BUS_20KV-3	0,850	0,85	0,432	4,499	Level 1
BUS_20KV-4	0,843	0,843	0,44	4,540	Level 1
BUS_6KV-2	0,398	0,398	6,917	10,128	Level 2
BUS_0.38KV-1-1	17,590	8,851	0,353	3,894	< Level 1
BUS_0.38KV-1-2	17,350	8,755	0,353	3,878	< Level 1
BUS_0.38KV-1-3	17,460	8,800	0,353	3,885	< Level 1
BUS_0.38KV-1-4	17,010	8,617	0,353	3,856	< Level 1
BUS_0.38KV-2-1	17,060	8,637	0,353	3,860	< Level 1
BUS_0.38KV-2-2	17,160	8,679	0,353	3,866	< Level 1
BUS_0.38KV-2-3	17,400	8,775	0,353	3,881	< Level 1
BUS_0.38KV-3-1	17,390	8,772	0,353	3,880	< Level 1
BUS_0.38KV-3-2	17,150	8,676	0,353	3,865	< Level 1
BUS_0.38KV-4-1	17,110	8,657	0,353	3,863	< Level 1
BUS_0.38KV-4-2	17,200	8,693	0,353	3,869	< Level 1

## 4.2 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa

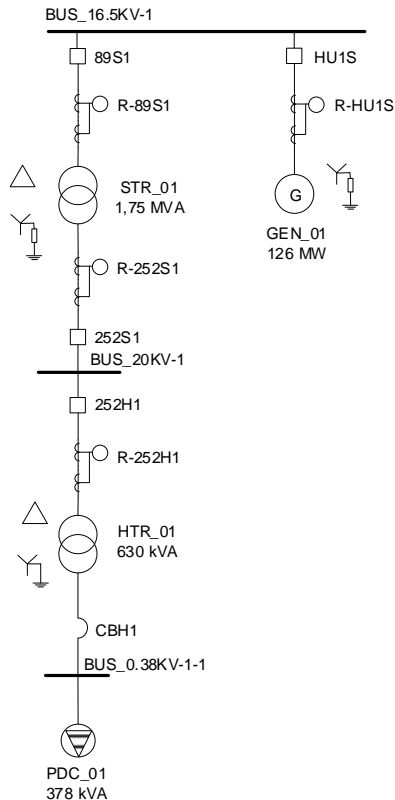
Dalam pengaturan rele arus lebih, studi hubung singkat digunakan untuk mengetahui besarnya arus hubung singkat maksimum dan minimum pada masing-masing bus. Koordinasi masing-masing rele dapat berpengaruh terhadap waktu pemutusan dari CB (*Circuit Breaker*). Kondisi eksisting sistem dianalisa terlebih dahulu untuk menentukan koordinasi dan rentan waktu pemutusan tiap rele. Analisa dilakukan berdasarkan hasil plot rele-rele pada kurva waktu TCC (*Time Current Curve*) disimulasi. Hasil dari simulasi tersebut, apabila terdapat koordinasi yang tidak tepat maka dilakukan *resetting*.

Terdapat beberapa pengaturan pada rele arus lebih yaitu pengaturan arus operasi dan pengaturan waktu operasi. Perhitungan arus operasi tergantung dari rasio CT, arus beban penuh (FLA) dan *time dial* yang disesuaikan dengan tipe kurva pengaman yang digunakan, yaitu tipe *Extreamly Inverse*. Perhitungan waktu operasi atau *time delay* disesuaikan

dengan rentan waktu atau- *gradding time* sebesar 0,2 detik sampai dengan 0,4 detik.

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

Koordinasi rele arus lebih tipikal 1 merupakan koordinasi pengaman dari generator GEN\_01 berkapasitas 126 MW, lalu menuju trafo STR\_01 berkapasitas 1,75 MVA, kemudian menuju trafo HTR\_01 berkapasitas 630 kVA hingga sampai ke beban PDC\_01 378 kVA. Rele-rele yang beroperasi antara lain rele R-HU1S, rele R-89S1, rele R-252S1, rele R-252H1 dan pengaman LVCB CBH1. *Single Line Diagram* tipikal 1 bisa dilihat pada Gambar 4.1.



**Gambar 4.1** *Single Line Diagram* Rele Arus Lebih Fasa Tipikal 1

Untuk menampilkan kurva waktu TCC rele arus lebih, maka diperlukan data pengaturan rele eksisting pada sistem kelistrikan tersebut. Data eksisting dari rele-rele pengaman yang beroperasi pada tipikal 1 bisa dilihat pada Tabel 4.2.

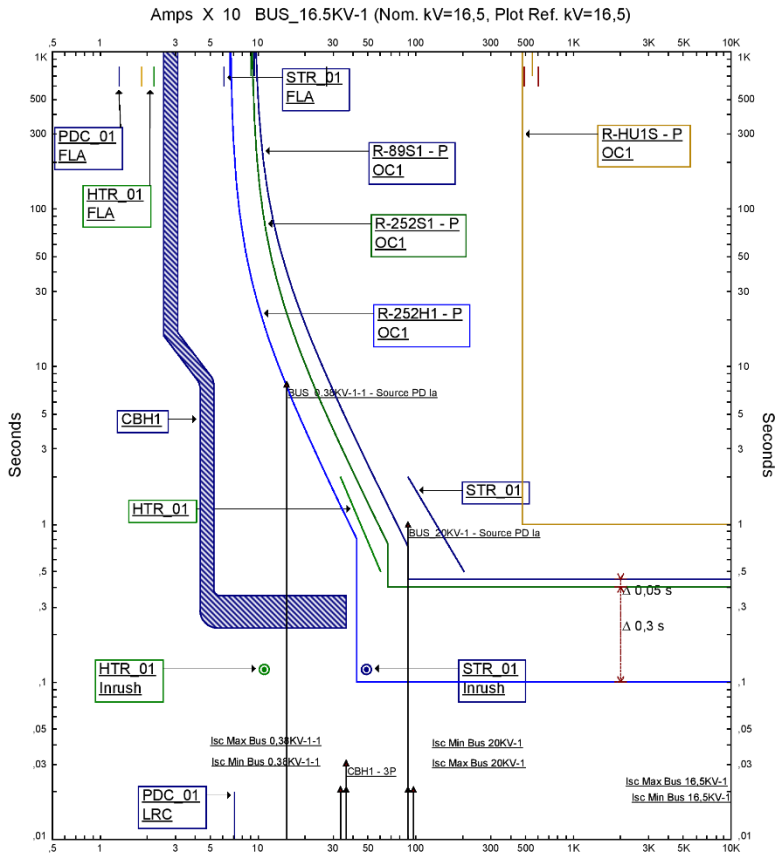
**Tabel 4.2** Data Rele Arus Lebih Fasa Kondisi Eksisting Tipikal 1

No	Rele ID & Model	CT Rasio	Setting	
1	R-HU1S Bus 16,5KV-1 VA TECH HYDRO GmbH Argus 1	5000/1	<i>Curve Type</i>	<i>Extreamly Inverse</i>
			<i>Pickup Range</i>	0,05 – 2,5
			<i>Pickup</i>	1,1
			<i>Relays Amp</i>	1,1/5500
			<i>Time Dial</i>	0,1
			<i>Instantaneous</i>	
			<i>Pickup Range</i>	0,05 – 2,5
			<i>Pickup</i>	0,95
			<i>Relays Amp</i>	0,95/4750
2	R-89S1 Bus 16,5KV-1 VA TECH HYDRO GmbH Argus 1	100/1	<i>Curve Type</i>	<i>Extreamly Inverse</i>
			<i>Pickup Range</i>	0,05 – 2,5
			<i>Pickup</i>	0,95
			<i>Relays Amp</i>	0,95/95
			<i>Time Dial</i>	0,8
			<i>Instantaneous</i>	
			<i>Pickup Range</i>	3 – 52,5
			<i>Pickup</i>	9
			<i>Relays Amp</i>	9/900
3	R-252S1 Bus 20KV-1 VA TECH HYDRO GmbH Argus 1	100/1	<i>Curve Type</i>	<i>Extreamly Inverse</i>
			<i>Pickup Range</i>	0,05 – 2,5
			<i>Pickup</i>	0,75
			<i>Relays Amp</i>	0,75/75
			<i>Time Dial</i>	0,5
			<i>Instantaneous</i>	
<i>Pickup Range</i>	0,05 – 2,5			

**Tabel 4.2** Data Rele Eksisting Tipikal 1 (lanjutan)

			<i>Pickup</i>	5,5
			<i>Relays Amp</i>	3/550
			<i>Delay</i>	0,4
4	R-252H1 Bus 20KV-1 VA TECH HYDRO GmbH Argus 1	50/1	<i>Curve Type</i>	<i>Extreamly Inverse</i>
			<i>Pickup Range</i>	0,05 – 2,5
			<i>Pickup</i>	1,1
			<i>Relays Amp</i>	1,1/55
			<i>Time Dial</i>	0,4
			<i>Instantaneous</i>	
			<i>Pickup Range</i>	3 – 52,5
			<i>Pickup</i>	7
			<i>Relays Amp</i>	3/350
			<i>Delay</i>	0,1
5	CBH1 Bus 0,38KV-1-1 SIEMENS 3WN1/5, 3WS1 (3JC, 4JC)		<i>I Sensor</i>	1600
			<i>LT Pickup</i>	0,65
			<i>LT Band</i>	2
			<i>ST Band</i>	0,22
			<i>ST Pickup</i>	2
			<i>Instantaneous</i>	<i>Disable</i>

Data eksisting pengaturan rele arus lebih pada Tabel 4.2, selanjutnya diinputkan kedalam *relay editor* pada simulasi untuk menghasilkan plot dari kurva waktu TCC. Hasil dari plot kurva waktu TCC bisa dilihat pada Gambar 4.2 dan dapat dianalisa koordinasi tiap rele yang bekerja. Dari hasil plot tersebut, dapat diketahui bahwa LVCB CBH1 memiliki pengaturan waktu *ST Band* 0,22 detik. Untuk mendapatkan nilai insiden energi *arc flash* yang relatif lebih kecil pada bus BUS\_0.38KV-1-1 maka diatur menjadi 0,15. Selanjutnya adalah pengaturan nilai *Short Time Pickup* LVCB CBH1, dimana nilainya yang terlalu kecil sehingga berpotensi akan *trip* saat beban *PDC\_01 start*. Kemudian *gradding time* antara rele R-252S1 dan rele R-89S1 terlalu kecil yaitu 0,05 detik, berdasarkan standar IEEE 1584-2002, rentang waktu *gradding time* yaitu dari 0,2 – 0,4 detik, sehingga perlu dilakukan pengaturan ulang *time delay* masing-masing rele untuk meminimalisir kerja rele yang bersamaan ketika terjadi gangguan.



**Gambar 4.2** Kurva Koordinasi Rele Arus Lebih Tipikal 1 Eksisting

Dengan pertimbangan hasil analisa koordinasi rele arus lebih gangguan fasa tipikal 1, maka diperlukan *resetting* koordinasi rele arus lebih. Berikut ini adalah perhitungannya:

**CBH1**

- Manufacturer : Siemens
- Model : 3WN1/5, 3WS1 (3JC, 4JC)
- I FLA Sek HTR 1 : 957,2 A
- Sensor : 1600



Isc min : 12,61 kA

Isc max : 15,8 kA

Long-Time

LT Pickup:

$$1,05 \times FLA \text{ HTR } 1 < Iset < 1,4 \times FLA \text{ HTR } 1$$

$$1,05 \times 957,2 < Iset < 1,4 \times 957,2$$

$$1005,06 < Iset < 1340,08$$

$$\frac{1005,06}{1600} < Tap < \frac{1340,08}{1600}$$

$$0,62816 < Tap < 0,83755$$

Dipilih:

Tap = 0,65

Iset = 1040

LT Band = 2

Short-Time

ST Pickup:

$$1,6 \times FLA \text{ HTR } 1 < Iset < 0,8 \times Isc \text{ min}$$

$$1,6 \times 957,2 < Iset < 1,4 \times 12610$$

$$1531,52 < Iset < 12610$$

$$\frac{1531,52}{1600} < Tap < \frac{12610}{1600}$$

$$0,9572 < Tap < 11,04$$

Dipilih:

Tap = 4

Iset = 4160

ST Band = 0,15

**Rele 252H1**

Manufacturer : VA TECH HYDRO GmbH

Model : Argus 1

Curve Type : *Extreamly Inverse*

I FLA Primer HTR 1 : 18,19 A

C/T Rasio : 50/1

Isc min : 0,642 kA

Isc max : 0,802 kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times FLA \text{ HTR } 1 < Iset < 1,4 \times FLA \text{ HTR } 1$$

$$1,05 \times 18,19 < Iset < 1,4 \times 18,19$$

$$19,1 < I_{set} < 25,47$$

$$\frac{19,1}{50/1} < Tap < \frac{25,47}{50/1}$$

$$0,382 < Tap < 0,509$$

Dipilih:

$$Tap = 0,4$$

$$I_{set} = 20$$

### Time Dial

Dipilih waktu operasi (td) = 0,1 s

$$K = \frac{td \times \left[ \left( \frac{I}{I_s} \right)^2 - 1 \right]}{80}$$

$$K = \frac{0,1 \times \left[ \left( \frac{802}{20} \right)^2 - 1 \right]}{80}$$

$$K = 2$$

### Instantaneous Pickup

$$1,6 \times FLA \text{ HTR } 1 < I_{\gg} < 0,8 \times I_{sc \text{ min}}$$

$$1,6 \times 18,19 < I_{\gg} < 0,8 \times 642$$

$$29,104 < I_{\gg} < 513,6$$

$$\frac{29,104}{50/1} < Tap < \frac{513,6}{50/1}$$

$$0,582 < Tap < 10,272$$

Dipilih:

$$Tap = 6$$

$$I_{set} = 300$$

$$Time Delay = 0,1 \text{ detik}$$

### Rele-252S1

<i>Manufacturer</i>	: VA TECH HYDRO GmbH
<i>Model</i>	: Argus 1
<i>Curve Type</i>	: <i>Extreamly Inverse</i>
I FLA Sek STR 1	: 50,52 A
C/T Rasio	: 100/1
Isc min	: 0,642 kA
Isc max	: 0,802 kA

### Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times FLA \text{ STR } 1 < I_{set} < 1,4 \times FLA \text{ HTR } 1$$

$$1,05 \times 50,52 < I_{set} < 1,4 \times 50,52$$

$$53,046 < I_{set} < 73,7592$$

$$\frac{53,046}{100/1} < Tap < \frac{73,7592}{100/1}$$

$$0,53 < Tap < 0,737$$

Dipilih:

$$Tap = 0,55$$

$$I_{set} = 55$$

### Time Dial

Dipilih waktu operasi (td) = 0,4 detik

$$K = \frac{td \times \left[ \left( \frac{I}{I_s} \right)^2 - 1 \right]}{80}$$

$$K = \frac{0,4 \times \left[ \left( \frac{802}{55} \right)^2 - 1 \right]}{80}$$

$$K = 1,058$$

### Instantaneous Pickup

$$1,6 \times FLA \text{ STR } 1 < I_{>>} < 0,8 \times I_{sc \text{ min}}$$

$$1,6 \times 50,52 < I_{>>} < 0,8 \times 642$$

$$80,832 < I_{>>} < 513,6$$

$$\frac{80,832}{100/1} < Tap < \frac{513,6}{100/1}$$

$$0,808 < Tap < 5,136$$

Dipilih:

$$Tap = 3,5$$

$$I_{set} = 350$$

$$Time \text{ Delay} = 0,3 \text{ detik}$$

### **Rele 89S1**

*Manufacturer* : VA TECH HYDRO GmbH

*Model* : Argus 1

*Curve Type* : *Extreamly Inverse*

I FLA Primer STR 1 : 61,23 A

C/T Rasio : 100/1  
 Isc min : 0,778 kA  
 Isc max : 0,972 kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times FLA STR 1 < I_{set} < 1,4 \times FLA HTR 1$$

$$1,05 \times 61,23 < I_{set} < 1,4 \times 61,23$$

$$64,291 < I_{set} < 85,722$$

$$\frac{64,291}{100/1} < Tap < \frac{85,722}{100/1}$$

$$0,6429 < Tap < 0,8572$$

Dipilih:

Tap = 0,85  
 Iset = 85

Time Dial

Dipilih waktu operasi (td) = 0,6 detik

$$K = \frac{td \times \left[ \left( \frac{I}{I_s} \right)^2 - 1 \right]}{80}$$

$$K = \frac{0,6 \times \left[ \left( \frac{972}{85} \right)^2 - 1 \right]}{80}$$

$$K = 0,973$$

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times FLA STR 1 < I_{\gg} < 0,8 \times Isc min$$

$$1,6 \times 61,23 < I_{\gg} < 0,8 \times 778$$

$$97,968 < I_{\gg} < 622,4$$

$$\frac{97,968}{100/1} < Tap < \frac{622,4}{100/1}$$

$$0,9796 < Tap < 6,224$$

Dipilih:

Tap = 6,2  
 Iset = 620  
 Time Delay = 0,5 s

### Rele HU1S

<i>Manufacturer</i>	: VA TECH HYDRO GmbH
<i>Model</i>	: Argus 1
<i>Curve Type</i>	: <i>Extreamly Inverse</i>
I FLA Gen 1	: 4899 A
C/T Rasio	: 5000/1
Isc min	: 102,6 kA
Isc max	: 126,4 kA

### Time Overcurrent Pickup

$$\begin{aligned}1,05 \times FLA \text{ Gen 1} &< I_{set} < 1,4 \times FLA \text{ Gen 1} \\1,05 \times 4899 &< I_{set} < 1,4 \times 4899 \\5143,95 &< I_{set} < 6858,6 \\5143,95 &< I_{set} < 6858,6 \\ \frac{5143,95}{5000/1} &< Tap < \frac{6858,6}{5000/1} \\1,0288 &< Tap < 1,3717\end{aligned}$$

Dipilih:

$$\begin{aligned}Tap &= 1,1 \\I_{set} &= 5500\end{aligned}$$

### Time Dial

Dipilih waktu operasi (td) = 0,3 detik

$$\begin{aligned}K &= \frac{td \times \left[ \left( \frac{I}{I_s} \right)^2 - 1 \right]}{80} \\K &= \frac{0,3 \times \left[ \left( \frac{126400}{5500} \right)^2 - 1 \right]}{80} \\K &= 1,97\end{aligned}$$

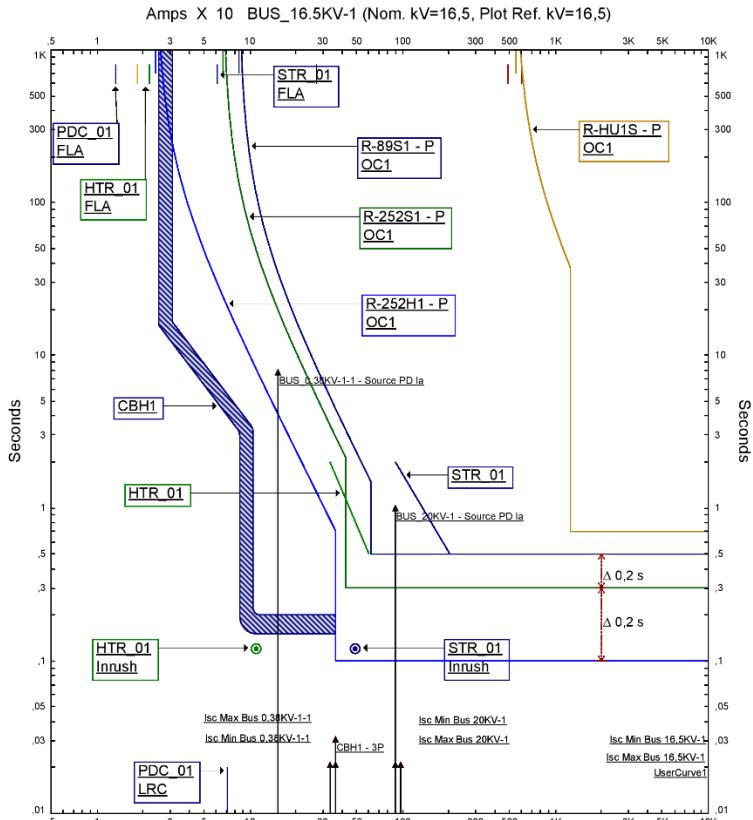
### Instantaneous Pickup

$$\begin{aligned}1,6 \times FLA \text{ Gen 1} &< I_{\gg} < 0,8 \times I_{sc \text{ min}} \\1,6 \times 4899 &< I_{\gg} < 0,8 \times 102600 \\7838,4 &< I_{\gg} < 82080 \\7838,4 &< I_{\gg} < 82080 \\ \frac{7838,4}{5000/1} &< Tap < \frac{82080}{5000/1} \\1,56 &< Tap < 16,416\end{aligned}$$

Dipilih:

Tap = 2,5  
Iset = 12500  
Time Delay = 0,7 s

Dari hasil perhitungan tersebut, kemudian diinputkan kembali ke *relay editor* pada simulasi. Hasil plot kurva waktu TCC kondisi *resetting* pada tipikal 1 rele arus lebih gangguan fasa dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Kurva Koordinasi Rele Arus Lebih Tipikal 1 *Resetting*

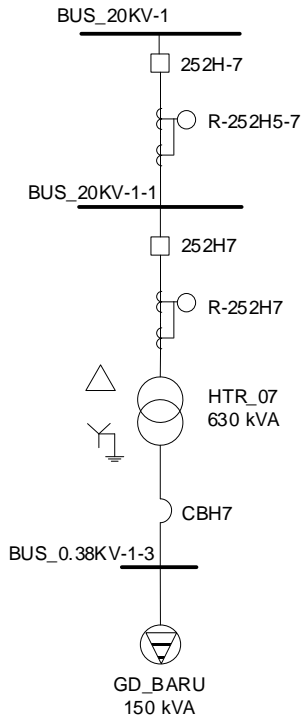
Berdasarkan data *resetting* dan kurva TCC pada Gambar 4.3, maka terdapat beberapa hasil urutan waktu *trip* rele menggunakan simulasi pada tiap bus tipikal 1 rele arus lebih gangguan fasa, yaitu:

- Gangguan hubung singkat tiga fasa kondisi 30 *cycle* pada bus BUS\_0.38KV-1-1 bernilai 14,559 kA. Peralatan pengaman LVCB CBH1 *trip* pada waktu 0,2 detik. Selanjutnya rele R-252H1 (51) mendeteksi gangguan sebesar 0,282 kA pada waktu 0,808 detik dan CB 252H1 *trip* pada waktu 0,858 detik. Setelah itu rele R-252S1 (51) mendeteksi gangguan sebesar 0,282 kA pada waktu 3,343 detik dan CB 252S1 *trip* pada waktu 3,393 detik. Rele terakhir yang beroperasi yaitu rele R-89S1 yang mendeteksi gangguan sebesar 0,356 kA pada waktu 4,715 detik dan CB 89S1 *trip* pada waktu 4,765 detik.
- Gangguan hubung singkat tiga fasa kondisi 30 *cycle* pada bus BUS\_20KV-1 bernilai 0,741 kA. Peralatan pengaman yang pertama beroperasi adalah rele R-252S1 (50) dan mendeteksi gangguan pada waktu 0,3 detik lalu CB 252S1 *trip* pada waktu 0,35 detik. Setelah itu rele R-89S1 (50) mendeteksi gangguan sebesar 0,934 kA pada waktu 0,5 detik dan CB 89S1 *trip* pada waktu 0,55 detik.
- Gangguan hubung singkat tiga fasa kondisi 30 *cycle* pada bus BUS\_16.5KV-1 bernilai 17,484 kA. Peralatan pengaman yang beroperasi adalah rele R-HU1S (50) dan rele R-HU2S (50) masing-masing rele mendeteksi gangguan pada waktu 0,7 detik, lalu CB HU1S dan CB HU2S *trip* pada waktu 0,75 detik.

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

Koordinasi rele arus lebih tipikal 2 merupakan koordinasi pengaman dari bus BUS\_20KV-1 dengan level tegangan 20 kV, lalu menuju trafo HTR\_07 yang merupakan trafo *step down* dari tegangan 20 kV menjadi 0,38 kV berkapasitas 630 kVA hingga sampai ke beban GD\_BARU 150 kVA. Rele-rele yang beroperasi antara lain rele R-252H5-7, rele R-252H7, dan pengaman LVCB CBH7. *Single Line Diagram* tipikal 1 bisa dilihat pada Gambar 4.4.

Untuk menampilkan kurva waktu TCC rele arus lebih, maka diperlukan data pengaturan rele eksisting pada sistem kelistrikan tersebut. Data eksisting dari rele-rele pengaman yang beroperasi pada tipikal 2 bisa dilihat pada Tabel 4.3.



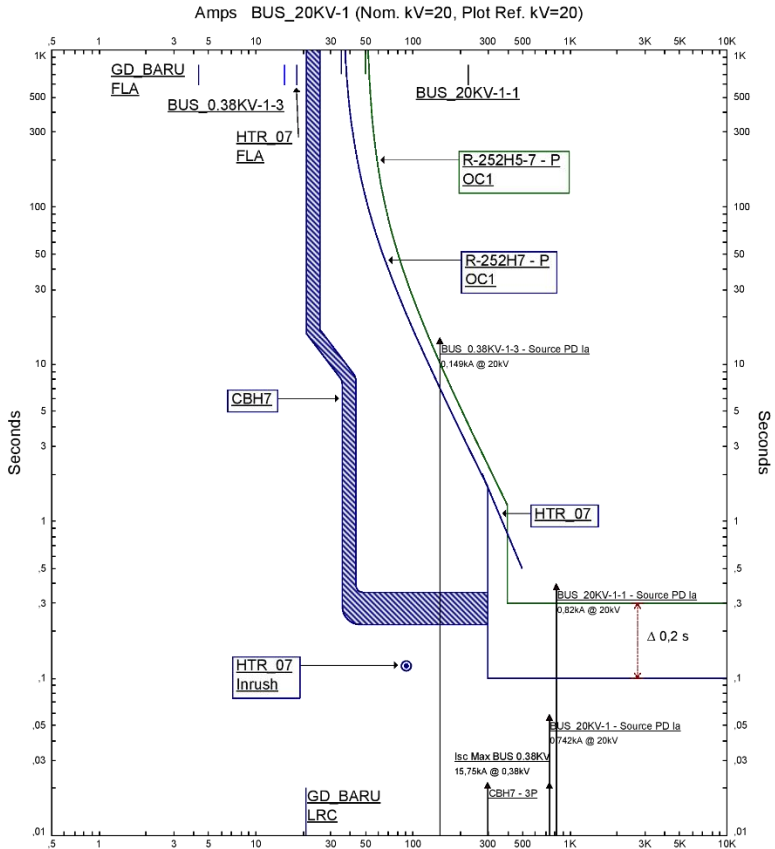
**Gambar 4.4** Single Line Diagram Rele Arus Lebih Fasa Tipikal 2

Data eksisting pengaturan rele arus lebih pada Tabel 4.3, selanjutnya diinputkan kedalam *relay editor* pada simulasi untuk menghasilkan plot dari kurva waktu TCC. Hasil dari plot kurva waktu TCC bisa dilihat pada Gambar 4.5 dan dapat dianalisa koordinasi tiap rele yang bekerja. Dari hasil plot tersebut, dapat diketahui bahwa pengaturan arus *pickup instantaneous* rele R-252H7 terletak sebelah kanan dari arus *arc* pada bus BUS\_0.38KV-1-3, artinya pengaturan Iset terlalu besar sehingga perlu dilakukan pengaturan ulang nilai Iset agar arus *arc* dapat menyentuh kurva rele R-252H7 pada bagian *instantaneous* bukan pada bagian inversnya. Nilai *ST Band* LVCB CBH7 diturunkan untuk mendapatkan nilai insiden energi *arc flash* yang relatif lebih kecil pada bus BUS\_0.38KV-1-1, yaitu diatur menjadi 0,15.



**Tabel 4.3** Data Rele Arus Lebih Fasa Kondisi Eksisting Tipikal 2

No	Rele ID & Model	CT Rasio	Setting	
1	R-252H5-7 Bus 20KV-1 VA TECH HYDRO GmbH Argus 1	50/1	<i>Curve Type</i>	<i>Extreamly Inverse</i>
			<i>Pickup Range</i>	0,05 – 2,5
			<i>Pickup</i>	1
			<i>Relays Amp</i>	1/50
			<i>Time Dial</i>	1
			<i>Instantaneous</i>	
			<i>Pickup Range</i>	3 – 52,5
			<i>Pickup</i>	8
			<i>Relays Amp</i>	8/400
2	R-252H7 Bus 20KV-1-1 VA TECH HYDRO GmbH Argus 1	50/1	<i>Curve Type</i>	<i>Extreamly Inverse</i>
			<i>Pickup Range</i>	0,05 – 2,5
			<i>Pickup</i>	0,7
			<i>Relays Amp</i>	0,7/35
			<i>Time Dial</i>	1,5
			<i>Instantaneous</i>	
			<i>Pickup Range</i>	3 – 52,5
			<i>Pickup</i>	6
			<i>Relays Amp</i>	4/300
3	CBH7 Bus 0,38KV-1-3 SIEMENS 3WN1/5, 3WS1 (3JC, 4JC)		<i>I Sensor</i>	1600
			<i>LT Pickup</i>	0,65
			<i>LT Band</i>	2
			<i>ST Band</i>	0,22
			<i>ST Pickup</i>	2
			<i>Instantaneous</i>	<i>Disable</i>



**Gambar 4.5** Kurva Koordinasi Rele Arus Lebih Fasa Tipikal 2 Eksisting

Dengan pertimbangan hasil analisa koordinasi rele arus lebih gangguan fasa tipikal 2, maka diperlukan *resetting* koordinasi rele arus lebih. Berikut ini adalah perhitungannya:

**CBH7**

- Manufacturer : Siemens
- Model : 3WN1/5, 3WS1 (3JC, 4JC)
- I FLA Sek HTR 7 : 957,2 A
- Sensor : 1600

Isc min : 12,61 kA  
Isc max : 15,75 kA

Long-Time

LT Pickup:

$$\begin{aligned} 1,05 \times FLA \text{ HTR } 7 &< Iset < 1,4 \times FLA \text{ HTR } 7 \\ 1,05 \times 957,2 &< Iset < 1,4 \times 957,2 \\ 1005,06 &< Iset < 1340,08 \\ \frac{1005,06}{1600} &< Tap < \frac{1340,08}{1600} \\ 0,62816 &< Tap < 0,83755 \end{aligned}$$

Dipilih:

Tap = 0,65  
Iset = 1040  
LT Band = 2

Short-Time

ST Pickup:

$$\begin{aligned} 1,6 \times FLA \text{ HTR } 7 &< Iset < 0,8 \times Isc \text{ min} \\ 1,6 \times 957,2 &< Iset < 1,4 \times 12610 \\ 1531,52 &< Iset < 12610 \\ \frac{1531,52}{1600} &< Tap < \frac{12610}{1600} \\ 0,9572 &< Tap < 7,88 \end{aligned}$$

Dipilih:

Tap = 2  
Iset = 2080  
ST Band = 0,15

**Rele 252H7**

Manufacturer : VA TECH HYDRO GmbH  
Model : Argus 1  
Curve Type : *Extreamly Inverse*  
I FLA Primer HTR 7 : 18,19 A  
C/T Rasio : 50/1  
Isc min : 0,642 kA  
Isc max : 0,802 kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times FLA \text{ HTR } 7 < I_{set} < 1,4 \times FLA \text{ HTR } 7$$

$$1,05 \times 18,19 < I_{set} < 1,4 \times 18,19$$

$$19,1 < I_{set} < 25,47$$

$$19,1 < \frac{I_{set}}{50/1} < \frac{25,47}{50/1}$$

$$0,382 < Tap < 0,509$$

Dipilih:

$$Tap = 0,4$$

$$I_{set} = 20$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (td) = 0,1 s

$$K = \frac{td \times \left[ \left( \frac{I}{I_s} \right)^2 - 1 \right]}{80}$$

$$K = \frac{0,1 \times \left[ \left( \frac{802}{25} \right)^2 - 1 \right]}{80}$$

$$K = 2$$

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times FLA \text{ HTR } 7 < I_{>>} < 0,8 \times I_{sc \text{ min}}$$

$$1,6 \times 18,19 < I_{>>} < 0,8 \times 642$$

$$29,104 < I_{>>} < 513,6$$

$$29,104 < \frac{I_{>>}}{50/1} < \frac{513,6}{50/1}$$

$$0,582 < Tap < 10,272$$

Dipilih:

$$Tap = 6$$

$$I_{set} = 300$$

$$Time \text{ Delay} = 0,1 \text{ detik}$$

**Rele 252H5-7**

Manufacturer : VA TECH HYDRO GmbH

Model : Argus 1

Curve Type : *Extreamly Inverse*

I FLA HTR 7 & HTR 5 : 36,38 A

C/T Rasio : 50/1  
 Isc min : 0,642 kA  
 Isc max : 0,802 kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times FLA \text{ HTR } 7 \ \& \ 5 < I_{set} < 1,4 \times FLA \text{ HTR } 7 \ \& \ 5$$

$$1,05 \times 36,38 < I_{set} < 1,4 \times 36,38$$

$$38,2 < I_{set} < 50,93$$

$$\frac{38,2}{50/1} < Tap < \frac{50,93}{50/1}$$

$$0,764 < Tap < 1,02$$

Dipilih:  
 Tap = 0,8  
 Iset = 40

Time Dial

Dipilih waktu operasi (td) = 0,3 detik

$$K = \frac{td \times \left[ \left( \frac{I}{I_s} \right)^2 - 1 \right]}{80}$$

$$K = \frac{0,3 \times \left[ \left( \frac{802}{40} \right)^2 - 1 \right]}{80}$$

$$K = 1,5$$

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times FLA \text{ HTR } 7 \ \& \ 5 < I_{\gg} < 0,8 \times Isc \ min$$

$$1,6 \times 36,38 < I_{\gg} < 0,8 \times 642$$

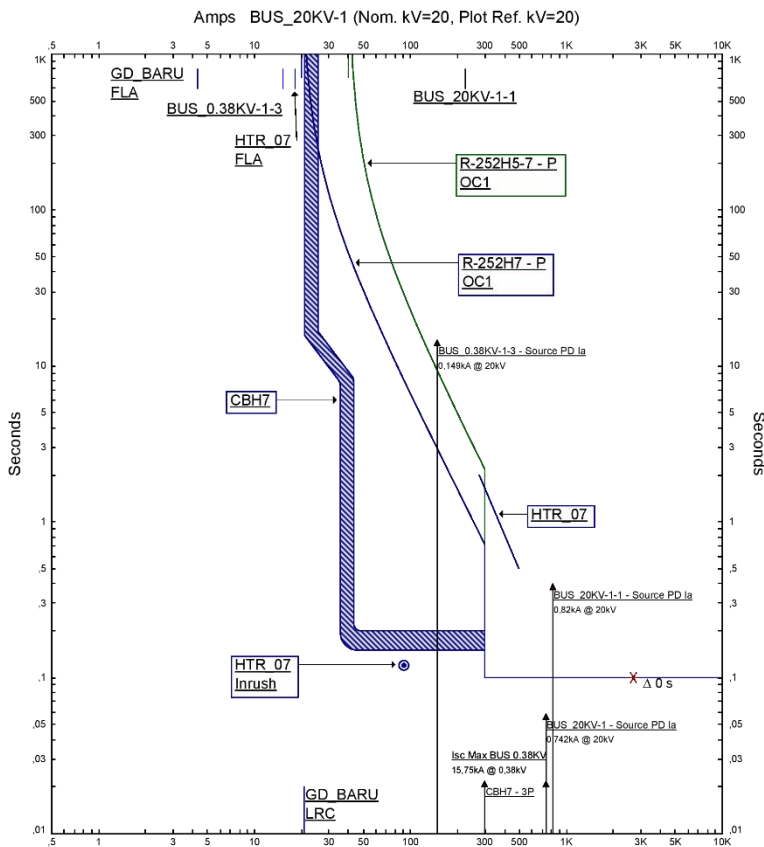
$$58,2 < I_{\gg} < 513,6$$

$$\frac{58,2}{50/1} < Tap < \frac{513,6}{50/1}$$

$$1,164 < Tap < 10,272$$

Dipilih:  
 Tap = 6  
 Iset = 300  
 Time Delay = 0,1 detik

Dari hasil perhitungan tersebut, kemudian diinputkan kembali ke *relay editor* pada simulasi. Hasil plot kurva waktu TCC kondisi *resetting* pada tipikal 2 dapat dilihat pada Gambar 4.6.



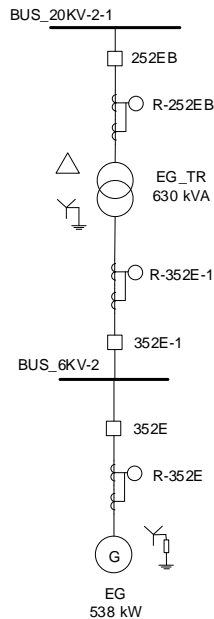
**Gambar 4.6** Kurva Koordinasi Rele Arus Lebih Fasa Tipikal 2 *Resetting*

Berdasarkan data *resetting* dan kurva TCC pada Gambar 4.6, maka terdapat beberapa hasil urutan waktu *trip* rele menggunakan simulasi pada tiap bus tipikal 2 rele arus lebih gangguan fasa, yaitu:

- Gangguan hubung singkat tiga fasa kondisi 30 *cycle* pada bus BUS\_0.38KV-1-3 bernilai 14,559 kA. Peralatan pengaman LVCB CBH7 *trip* pada waktu 0,2 detik. Selanjutnya rele R-252H7 (51) mendeteksi gangguan sebesar 0,282 kA pada waktu 0,808 detik dan CB 252H7 *trip* pada waktu 0,858 detik. Setelah itu rele R-252H5-7 (51) mendeteksi gangguan sebesar 0,282 kA pada waktu 2,461 detik dan CB 252H5-7 *trip* pada waktu 2,511 detik.
- Gangguan hubung singkat tiga fasa kondisi 30 *cycle* pada bus BUS\_20KV-1 bernilai 0,741 kA. Peralatan pengaman yang pertama beroperasi adalah rele R-252H5-7 (50) dan mendeteksi gangguan pada waktu 0,1 detik lalu CB 252H5-7 *trip* pada waktu 0,15 detik.

### 4.2.3 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa Tipikal 3

Koordinasi rele arus lebih tipikal 3 merupakan koordinasi pengaman dari *emergency* generator EG dengan level tegangan 6 kV berkapasitas 538 kW, menuju trafo *step up* EG\_TR menjadi 20 kV berkapasitas 630 kVA. *Single Line Diagram* tipikal 3 bisa dilihat pada Gambar 4.7.



**Gambar 4.7** *Single Line Diagram* Rele Arus Lebih Fasa Tipikal 3

Saluran ini berfungsi sebagai pemasok daya awal bila terjadi *blackout* pada sistem kelistrikan utama pembangkit. Rele-rele yang beroperasi antara lain rele R-352E, rele R-352E-1 dan rele R-352EB. Pada simulasi rele arus lebih gangguan fasa tipikal 3 ini, generator EG diatur hanya untuk menyuplai beban PDC 06 dengan kapasitas 250 kVA. Oleh karena itu pada saat melakukan simulasi, CB 252H6-E harus dalam keadaan terbuka agar generator EG tidak *overload* dan kontribusi arus hubung singkat dari sistem distrbusi 20 kV tidak diperhitungkan.

Untuk menampilkan kurva waktu TCC rele arus lebih, maka diperlukan data pengaturan rele eksisting pada sistem kelistrikan tersebut. Data eksisting dari rele-rele pengaman yang beroperasi pada tipikal 2 bisa dilihat pada Tabel 4.4. Data eksisting pengaturan rele arus lebih pada Tabel 4.4, selanjutnya diinputkan kedalam *relay editor* pada simulasi untuk menghasilkan plot dari kurva waktu TCC. Hasil dari plot kurva waktu TCC bisa dilihat pada Gambar 4.8 dan dapat dianalisa koordinasi tiap rele yang bekerja. Dari hasil plot tersebut, dapat diketahui bahwa *gradding time* antara rele R-352EB, rele R-352E-1 dan rele R-352E sudah sesuai standar. Termal trafo EG dan arus *inrush* yang dihasilkannya juga sudah terlindungi oleh rele R-352EB.

**Tabel 4.4** Data Rele Arus Lebih Fasa Kondisi Eksisting Tipikal 3

No	Rele ID & Model	CT Rasio	Setting	
1	R-352E Bus 6KV-2 VA TECH HYDRO GmbH Argus 1	100/1	<i>Curve Type</i>	<i>Extreamly Inverse</i>
			<i>Pickup Range</i>	0,05 – 2,5
			<i>Pickup</i>	0,9
			<i>Relays Amp</i>	0,9/90
			<i>Time Dial</i>	1
			<i>Instantaneous</i>	
			<i>Pickup Range</i>	3 – 52,5
			<i>Pickup</i>	9
			<i>Relays Amp</i>	9/900
			<i>Delay</i>	0,7

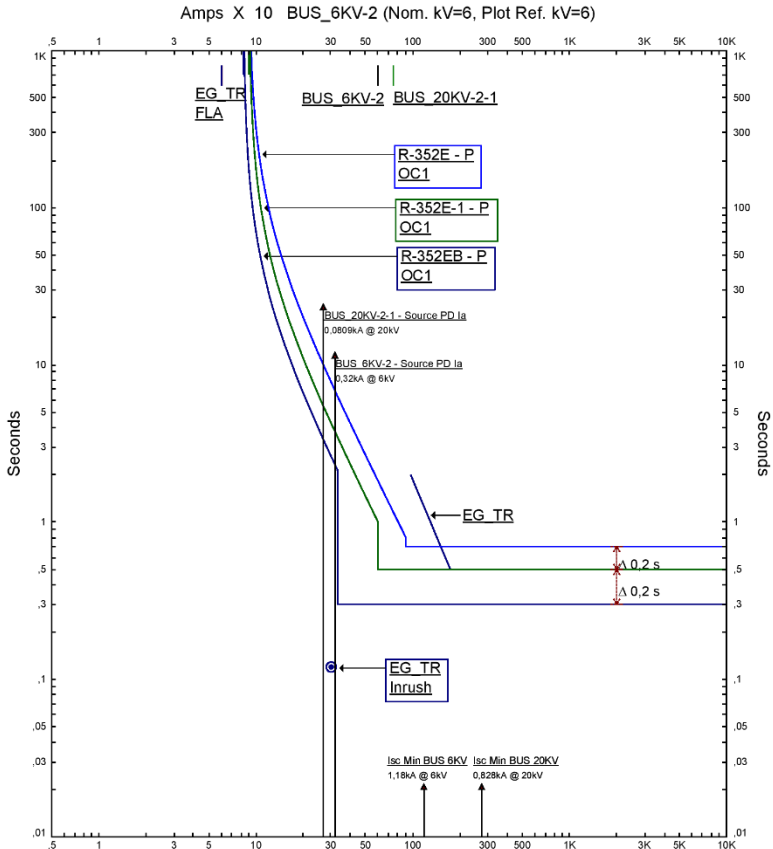


**Tabel 4.4** Data Rele Arus Lebih Fasa Kondisi Eksisting Tipikal 3 (lanjutan)

2	R-352E-1 Bus 6KV-2 VA TECH HYDRO GmbH Argus 1	100/1	<i>Curve Type</i>	<i>Extreamly Inverse</i>
			<i>Pickup Range</i>	0,05 – 2,5
			<i>Pickup</i>	0,9
			<i>Relays Amp</i>	0,9/90
			<i>Time Dial</i>	0,55
			<i>Instantaneous</i>	
			<i>Pickup Range</i>	3 – 52,5
			<i>Pickup</i>	6
			<i>Relays Amp</i>	6/600
			<i>Delay</i>	0,5
3	R-352EB Bus 6KV-2 VA TECH HYDRO GmbH Argus 1	50/1	<i>Curve Type</i>	<i>Extreamly Inverse</i>
			<i>Pickup Range</i>	0,05 – 2,5
			<i>Pickup</i>	0,5
			<i>Relays Amp</i>	0,5/25
			<i>Time Dial</i>	0,4
			<i>Instantaneous</i>	
			<i>Pickup Range</i>	0,05 – 2,5
			<i>Pickup</i>	2
			<i>Relays Amp</i>	2/100
			<i>Delay</i>	0,3

Ketika terjadi arus *arcing* baik pada bus 6 kV atau pada bus 20 kV, nilai insiden energi *arc flash* yang dihasilkan akan lebih besar karena rele pengaman yang beroperasi adalah rele invers (51). Pengaturan ulang nilai Iset atau *pickup* untuk rele R-352EB, rele R-352E-1 dan rele R-352E dilakukan agar nilai insiden energi *arc flash* yang dihasilkan menjadi lebih kecil. Nilai Iset atau *pickup* masing-masing rele diatur lebih kecil, sehingga arus *arcing* pada bus 6 kV dan bus 20 kV bisa diisolasi oleh rele *instantaneous* (50) dengan waktu pemutusan yang lebih cepat daripada rele inversnya.

Nilai arus hubung singkat tiga fasa minimum pada bus 6 kV dan 20 kV masing-masing yaitu 1,18 kA dan 0,828 kA. Sedangkan nilai arus *arcing* pada bus 6 kV dan 20 kV memiliki nilai yang lebih kecil dari nilai arus hubung singkatnya, yaitu 0,32 kA dan 0,0809 kA.



**Gambar 4.8** Kurva Koordinasi Rele Arus Lebih Fasa Tipikal 3 Eksisting

Dengan pertimbangan hasil analisa koordinasi rele arus lebih gangguan fasa tipikal 3, maka diperlukan *resetting* koordinasi rele arus lebih. Berikut ini adalah perhitungannya:

**Rele 352EB**

- Manufacturer* : VA TECH HYDRO GmbH
- Model* : Argus 1
- Curve Type* : *Extreamly Inverse*
- I FLA Primer EG\_TR : 18,19 A

C/T Rasio : 50/1  
 Isc min : 0,193kA  
 Isc max : 0,24 kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times FLA \text{ EG TR} < I_{set} < 1,4 \times FLA \text{ EG TR}$$

$$1,05 \times 18,19 < I_{set} < 1,4 \times 18,19$$

$$19,1 < I_{set} < 25,47$$

$$\frac{19,1}{50/1} < Tap < \frac{25,47}{50/1}$$

$$0,382 < Tap < 0,509$$

Dipilih:  
 Tap = 0,4  
 Iset = 20

Time Dial

Dipilih waktu operasi (td) = 0,1 s

$$K = \frac{td \times \left[ \left( \frac{I}{I_s} \right)^2 - 1 \right]}{80}$$

$$K = \frac{0,1 \times \left[ \left( \frac{240}{20} \right)^2 - 1 \right]}{80}$$

K = 0,04  
 Dipilih K = 0,15

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times FLA \text{ EG TR} < I_{\gg} < 0,8 \times Isc \text{ min}$$

$$1,6 \times 18,19 < I_{\gg} < 0,8 \times 193$$

$$29,104 < I_{\gg} < 154,4$$

$$\frac{29,104}{50/1} < Tap < \frac{154,4}{50/1}$$

$$0,582 < Tap < 3,088$$

Dipilih:  
 Tap = 0,8  
 Iset = 40  
 Time Delay = 0,2 detik

### **Rele 352E-1**

<i>Manufacturer</i>	: VA TECH HYDRO GmbH
<i>Model</i>	: Argus 1
<i>Curve Type</i>	: <i>Extreamly Inverse</i>
I FLA Sek EG_TR	: 60,62 A
C/T Rasio	: 100/1
Isc min	: 0,229 kA
Isc max	: 0,353 kA

### **Time Overcurrent Pickup**

$$\begin{aligned}1,05 \times FLA \text{ EG TR} < I_{set} < 1,4 \times FLA \text{ EG TR} \\1,05 \times 60,62 < I_{set} < 1,4 \times 60,62 \\63,651 < I_{set} < 84,868 \\63,651 < \frac{100}{Tap} < 84,868 \\0,6365 < Tap < 0,8486\end{aligned}$$

Dipilih:

$$\begin{aligned}Tap &= 0,75 \\I_{set} &= 75 \text{ A}\end{aligned}$$

### **Time Dial**

Dipilih waktu operasi (td) = 0,4 detik

$$K = \frac{td \times \left[ \left( \frac{I}{I_S} \right)^2 - 1 \right]}{80}$$
$$K = \frac{0,4 \times \left[ \left( \frac{353}{75} \right)^2 - 1 \right]}{80}$$

$$K = 0,1$$

Dipilih  $K = 0,2$

### **Instantaneous Pickup**

$$\begin{aligned}1,6 \times FLA \text{ EG TR} < I_{\gg} < 0,8 \times I_{sc \text{ min}} \\1,6 \times 60,62 < I_{\gg} < 0,8 \times 229 \\80,832 < I_{\gg} < 183,2 \\80,832 < \frac{100}{Tap} < 183,2 \\0,808 < Tap < 1,83\end{aligned}$$

Dipilih:

$Tap = 1,8$   
 $I_{set} = 180 \text{ A}$   
 $Time \ Delay = 0,5 \text{ detik}$

### **Rele 352E**

*Manufacturer* : VA TECH HYDRO GmbH  
*Model* : Argus 1  
*Curve Type* : *Extreamly Inverse*  
*I FLA EG* : 60,9 A  
*C/T Rasio* : 100/1  
*Isc min* : 0,229 kA  
*Isc max* : 0,353 kA

#### **Time Overcurrent Pickup**

$$1,05 \times FLA \ EG < I_{set} < 1,4 \times FLA \ EG$$
$$1,05 \times 60,9 < I_{set} < 1,4 \times 60,9$$
$$63,945 < I_{set} < 85,26$$
$$\frac{63,945}{100/1} < Tap < \frac{85,26}{100/1}$$
$$0,63945 < Tap < 0,8526$$

Dipilih:

$Tap = 0,85$   
 $I_{set} = 85$

#### **Time Dial**

Dipilih waktu operasi (td) = 0,5 detik

$$K = \frac{td \times \left[ \left( \frac{I}{I_s} \right)^2 - 1 \right]}{80}$$
$$K = \frac{0,5 \times \left[ \left( \frac{353}{85} \right)^2 - 1 \right]}{80}$$

$K = 0,1$ , dipilih  $K = 0,2$

#### **Instantaneous Pickup**

$$1,6 \times FLA \ EG \ TR < I_{\gg} < 0,8 \times I_{sc \ min}$$
$$1,6 \times 60,9 < I_{\gg} < 0,8 \times 229$$
$$97,44 < I_{\gg} < 183,2$$

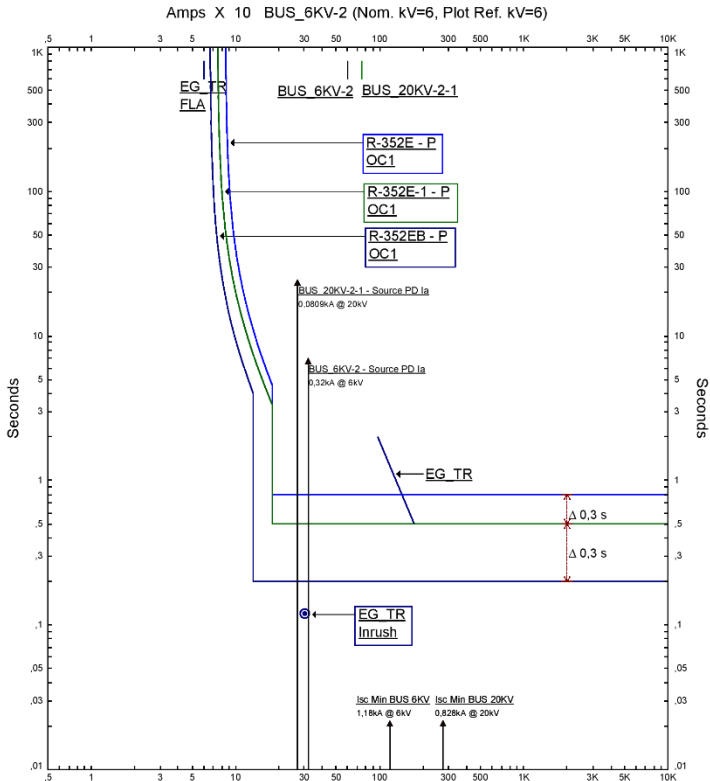
$$\frac{97,44}{100/1} < Tap < \frac{183,2}{100/1}$$

$$0,9744 < Tap < 1,832$$

Dipilih:

- Tap = 1,8
- Iset = 180 A
- Time Delay = 0,8 detik

Dari hasil perhitungan tersebut, kemudian diinputkan kembali ke *relay editor* pada simulasi. Hasil plot kurva waktu TCC kondisi *resetting* pada tipikal 3 dapat dilihat pada Gambar 4.9.



**Gambar 4.9** Kurva Koordinasi Rele Arus Lebih Fasa Tipikal 3 *Resetting*

### 4.3 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan ke Tanah

Sama halnya dengan rele arus lebih gangguan fasa, studi hubung singkat diperlukan untuk penentuan pengaturan rele. Hubung singkat yang digunakan dalam perhitungan yaitu hubung singkat satu fasa ke tanah. Nilai tersebut bisa didapatkan dari simulasi atau jika sistem diketanahkan, misalnya dengan sistem NGR (*Neutral Ground Resistant*) maka besarnya arus hubung singkat satu fasa ke tanah maksimumnya adalah nilai arus pada NGR yang dipasang tersebut. Sedangkan jika pentanahan trafonya menggunakan *solid grounding*, maka besarnya arus hubung singkat satu fasa ke tanah hampir sama dengan besarnya arus hubung singkat 3 fasa. Parameter yang digunakan pada koordinasi rele arus lebih gangguan ke tanah hanya *instantaneous pickup* dan waktu tunda atau *delay timenya* saja. Penggunaan CT rele arus lebih gangguan ke tanah, berbeda dengan CT rele arus lebih gangguan fasa, sehingga membutuhkan 2 buah CT untuk proteksi gangguan antar fasa dan proteksi gangguan fasa ke tanah.

Pada sistem kelistrikan PT. PJB UP Cirata, seperti sudah dibahas di bab sebelumnya, bahwa terdapat beberapa level tegangan yang digunakan dalam sistem distribusi dengan tipe radialnya itu. Tiga level tegangan utama yang digunakan untuk kebutuhan internal pembangkit yaitu 16,5 kV, 20 kV dan 0,38 kV. Jenis pentanahan yang digunakan bisa dilihat pada Tabel 4.5.

**Tabel 4.5** Jenis Pentanahan Peralatan

No	Peralatan	Rating Tegangan (kV)	Pentanahan
1	Generator Utama	16,5	NGR 10 A
2	Transformator STR	16,5/20	NGR 800 A
3	Transformator HTR	20/0,38	Solid
4	Transformator EG_TR	6/20	Solid
5	Generator EG	6	NGR 10 A

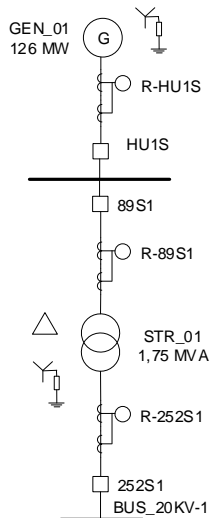
Koordinasi pengaman arus lebih gangguan ke tanah dapat dipisahkan menjadi zona-zona berdasarkan level tegangan pada peralatan, misalnya dari tegangan keluaran generator ke sisi primer trafo, sisi sekunder trafo ke beban, atau juga antar trafo, karena jika terjadi gangguan pada salah satu level tegangan tertentu pengaman pada tegangan berbeda tidak merasakan gangguan. Perhitungan pengaturan rele arus lebih akan dijelaskan pada sub bab berikut ini:

### 4.3.1 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan ke Tanah Tipikal 1

Koordinasi rele arus lebih gangguan ke tanah tipikal 1 terdiri dari dua zona, karena berada pada dua level tegangan yang berbeda, yaitu tegangan 16,5 kV dari generator GEN\_01 ke sisi primer trafo STR\_01 dan tegangan 20 kV dari sisi sekunder trafo STR\_01 ke sisi primer trafo HTR\_01.

#### Zona 1

Zona 1 merupakan koordinasi pengamanan dari generator GEN\_01 dengan level tegangan 16,5 kV berkapasitas 128 MW, menuju trafo *step up* STR\_01 menjadi 20 kV berkapasitas 1,75 MVA. Pada generator GEN\_01 menggunakan sistem pentanahan tipe NGR dengan nilai arus hubung singkat satu fasa ke tanah maksimum dibatasi 10 Ampere, sedangkan pada sisi primer trafo STR\_01 dihubung delta. Rele-rele yang beroperasi antara lain rele R-HU1S dan rele R-89S1. *Single Line Diagram* rele arus lebih gangguan ke tanah tipikal 1 untuk zona 1 bisa dilihat pada Gambar 4.10.



**Gambar 4.10** *Single Line Diagram* Rele Arus Lebih Ground Tipikal 1 Zona 1

Perhitungan untuk parameter pengaturan rele adalah sebagai berikut:



### **Rele 89S1**

*Manufacturer* : VA TECH HYDRO GmbH  
*Model* : Argus 1  
*Isc L-G* : 10 A (16,5 kV)  
*C/T Rasio* : 100/1

#### **Instantaneous Pickup**

$$\begin{aligned}10\% \times I_{sc LG} < I_{\gg} < 50\% \times I_{sc LG} \\10\% \times 10 < I_{\gg} < 50\% \times 10 \\1 < I_{\gg} < 5 \\ \frac{1}{100/1} < Tap < \frac{5}{100/1} \\0,01 < Tap < 0,05\end{aligned}$$

Dipilih:

*Tap* = 0,04  
*Iset* = 4 A  
*Time Delay* = 0,1 s

### **Rele HU1S**

*Manufacturer* : VA TECH HYDRO GmbH  
*Model* : Argus 1  
*Isc L-G* : 10 A (16,5 kV)  
*C/T Rasio* : 100/1

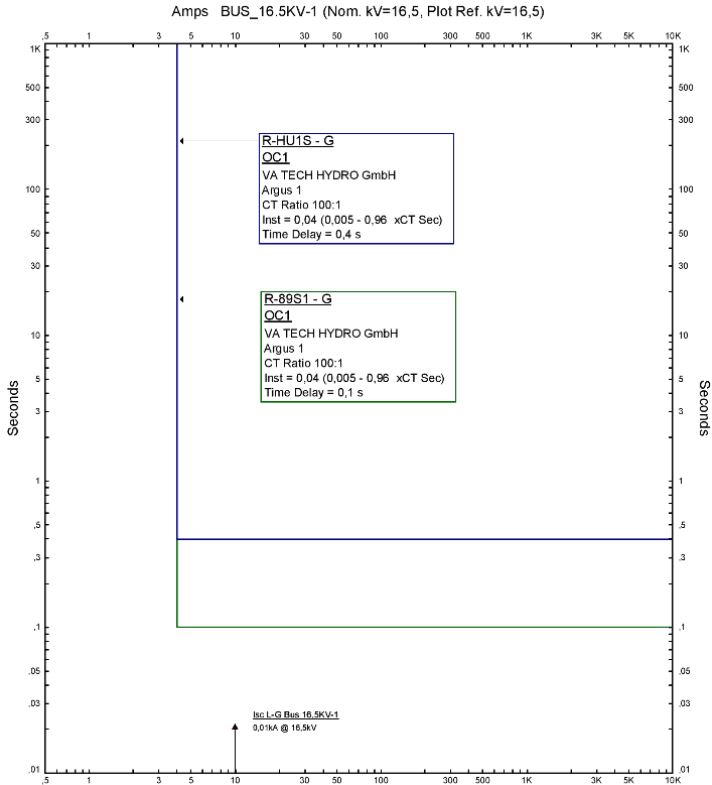
#### **Instantaneous Pickup**

$$\begin{aligned}10\% \times I_{sc LG} < I_{\gg} < 50\% \times I_{sc LG} \\10\% \times 10 < I_{\gg} < 50\% \times 10 \\1 < I_{\gg} < 5 \\ \frac{1}{100/1} < Tap < \frac{5}{100/1} \\0,01 < Tap < 0,05\end{aligned}$$

Dipilih:

*Tap* = 0,04  
*Iset* = 4 A  
*Time Delay* = 0,4 s

Dari hasil perhitungan tersebut, kemudian diinputkan ke *relay editor* pada simulasi. Hasil plot kurva waktu TCC rele arus lebih gangguan ke tanah tipikal 1 zona 1 dapat dilihat pada Gambar 4.11.

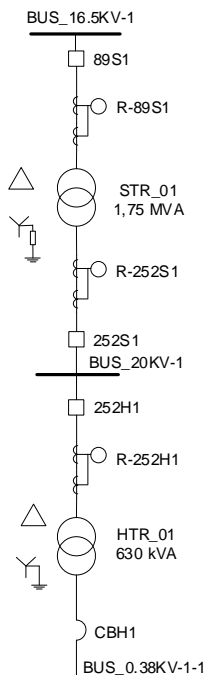


**Gambar 4.11** Kurva Koordinasi Rele Arus Lebih *Ground* Tipikal 1 Zona 1

## Zona 2

Zona 2 merupakan koordinasi pengaman mulai dari sisi sekunder trafo STR\_01 dengan level tegangan 20 kV berkapasitas 1,75 MVA, menuju trafo *step down* HTR\_01 menjadi 0,38 kV berkapasitas 630 kVA. Pada sisi sekunder trafo STR\_01 menggunakan sistem pentanahan tipe NGR dengan nilai arus hubung singkat satu fasa ke tanah maksimum

dibatasi 800 Ampere, sedangkan pada sisi primer trafo HTR\_01 dihubungkan delta. Rele-rele yang beroperasi antara lain rele R-252S1, dan rele R-252H1. *Single Line Diagram* rele arus lebih gangguan ke tanah tipikal 1 untuk zona 2 bisa dilihat pada Gambar 4.12.



**Gambar 4.12** *Single Line Diagram* Rele Arus Lebih *Ground* Tipikal 1 Zona 2

Perhitungan untuk parameter pengaturan rele seperti *Iset* dan *time delay* untuk rele 252H1 dan rele 252S1 adalah sebagai berikut:

**Rele 252H1**

*Manufacturer* : VA TECH HYDRO GmbH  
*Model* : Argus 1  
*Isc L-G* : 800 A (20 kV)  
*C/T Rasio* : 50/1

Instantaneous Pickup

$$\begin{aligned} 10\% \times I_{sc LG} < I_{\gg} < 50\% \times I_{sc LG} \\ 10\% \times 800 < I_{\gg} < 50\% \times 800 \\ 80 < I_{\gg} < 400 \\ \frac{80}{50/1} < Tap < \frac{400}{50/1} \\ 1,6 < Tap < 8 \end{aligned}$$

Dipilih:

$$\begin{aligned} Tap &= 2 \\ I_{set} &= 100 \text{ A} \\ Time Delay &= 0,1 \text{ s} \end{aligned}$$

**Rele 252S1**

Manufacturer : VA TECH HYDRO GmbH  
Model : Argus 1  
Isc L-G : 800 A (20 kV)  
C/T Rasio : 100/1

Instantaneous Pickup

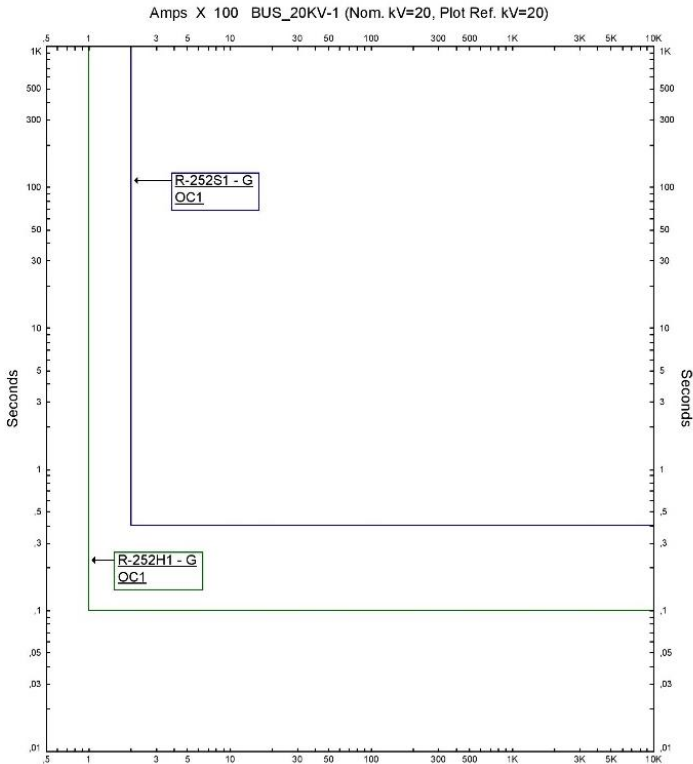
$$\begin{aligned} 10\% \times I_{sc LG} < I_{\gg} < 50\% \times I_{sc LG} \\ 10\% \times 800 < I_{\gg} < 50\% \times 800 \\ 80 < I_{\gg} < 400 \\ \frac{80}{100/1} < Tap < \frac{400}{100/1} \\ 0,8 < Tap < 4 \end{aligned}$$

Dipilih:

$$\begin{aligned} Tap &= 2 \\ I_{set} &= 200 \text{ A} \\ Time Delay &= 0,4 \text{ s} \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan tersebut, kemudian diinputkan ke *relay editor* pada simulasi. Hasil plot kurva waktu TCC rele arus lebih gangguan ke tanah tipikal 1 zona 2 dapat dilihat pada Gambar 4.13.

Pada pengaturan ini, rele arus lebih gangguan ke tanah diatur menggunakan rele *instantaneous*-nya saja, berbeda dengan rele gangguan fasa yang menggabungkan fungsi dari rele invers (51) dan rele *instantaneous* (50) untuk operasi pengamannya. Data arus hubung singkat yang digunakan adalah arus hubung singkat *line to ground* (L-G) yang didapatkan dari pengaturan NGR sistem.

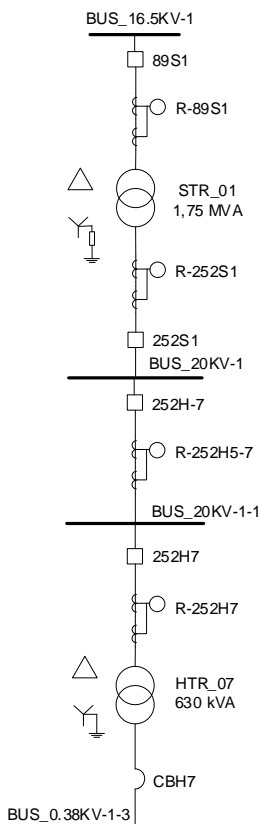


**Gambar 4.13** Kurva Koordinasi Rele Arus Lebih *Ground* Tipikal 1 Zona 2

#### 4.3.2 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan ke Tanah Tipikal 2

Koordinasi rele arus lebih gangguan ke tanah tipikal 2 hanya terdiri dari satu zona, karena berada pada satu level tegangan saja, yaitu tegangan 20 kV dari sisi sekunder trafo STR\_01 berkapasitas 1,75 MVA ke sisi primer trafo HTR\_07 berkapasitas 630 kVA. Pada sisi sekunder trafo STR\_01 menggunakan sistem pentanahan tipe NGR dengan nilai arus hubung singkat satu fasa ke tanah maksimum dibatasi sampai 800 Ampere, sedangkan pada sisi primer trafo HTR\_07 dihubung delta. Rele-rele yang beroperasi antara lain rele R-252H7 dan rele R-252H5-7. *Single*

*Line Diagram* rele arus lebih gangguan ke tanah tipikal 2 bisa dilihat pada Gambar 4.10.



**Gambar 4.14** Single Line Diagram Rele Arus Lebih Ground Tipikal 2

Perhitungan untuk parameter pengaturan rele seperti *Iset* dan *time delay* untuk rele 252H7 dan rele 252H5-7 adalah sebagai berikut:

### **Rele 252H7**

*Manufacturer* : VA TECH HYDRO GmbH  
*Model* : Argus 1  
*Isc L-G* : 800 A (20 kV)  
*C/T Rasio* : 50/1

Instantaneous Pickup

$$\begin{aligned} 10\% \times I_{sc LG} < I_{\gg} < 50\% \times I_{sc LG} \\ 10\% \times 800 < I_{\gg} < 50\% \times 800 \\ 80 < I_{\gg} < 400 \\ \frac{80}{50/1} < Tap < \frac{400}{50/1} \\ 1,6 < Tap < 8 \end{aligned}$$

Dipilih:

$$\begin{aligned} Tap &= 2 \\ I_{set} &= 100 \text{ A} \\ Time Delay &= 0,1 \text{ s} \end{aligned}$$

**Rele 252H5-7**

Manufacturer : VA TECH HYDRO GmbH  
Model : Argus 1  
Isc L-G : 800 A (20 kV)  
C/T Rasio : 50/1

Instantaneous Pickup

$$\begin{aligned} 10\% \times I_{sc LG} < I_{\gg} < 50\% \times I_{sc LG} \\ 10\% \times 800 < I_{\gg} < 50\% \times 800 \\ 80 < I_{\gg} < 400 \\ \frac{80}{50/1} < Tap < \frac{400}{50/1} \\ 1,6 < Tap < 8 \end{aligned}$$

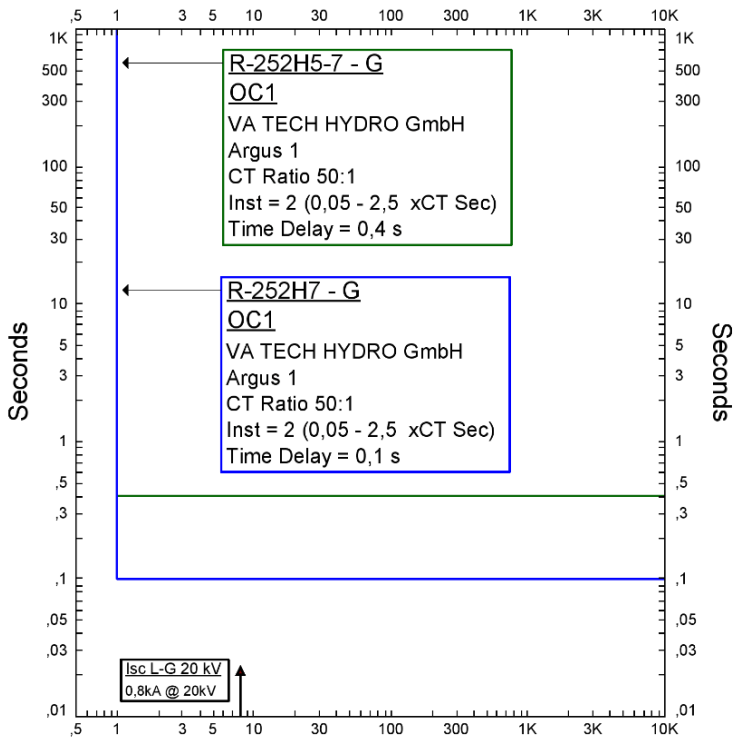
Dipilih:

$$\begin{aligned} Tap &= 2 \\ I_{set} &= 100 \text{ A} \\ Time Delay &= 0,4 \text{ s} \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan tersebut, kemudian diinputkan ke *relay editor* pada simulasi. Hasil plot kurva waktu TCC rele arus lebih gangguan ke tanah tipikal 2 dapat dilihat pada Gambar 4.15.

Pengaturan *gradding time* antara rele 252H7 dan rele 252H5-7 diatur 0,3 detik sesuai dengan standar IEEE 1584-2002. Arus hubung singkat *line to ground* yang terjadi pada tipikal ini dibatasi oleh nilai NGR yang dipasang yaitu 0,8 kA.

Amps X 100 BUS\_20KV-1 (Nom. kV=20, Plot Ref. kV=20)

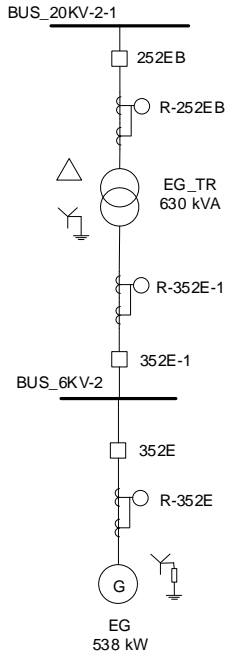


**Gambar 5.15** Kurva Koordinasi Rele Arus Lebih *Ground* Tipikal 2

### 4.3.3 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan ke Tanah Tipikal 3

Koordinasi rele arus lebih gangguan ke tanah tipikal 3, sama seperti pada tipikal 2 yaitu hanya terdiri dari satu zona, karena berada pada satu level tegangan saja, yaitu tegangan 6 kV dari *emergency* generator EG berkapasitas 538 kW ke sisi primer trafo EG\_TR berkapasitas 630 kVA. Pada generator EG menggunakan sistem pentanahan tipe NGR dengan nilai arus hubung singkat satu fasa ke tanah maksimum dibatasi sampai 10 Ampere, sedangkan pada sisi primer trafo HTR\_07 dihubung Y *solid*. Rele-rele yang beroperasi antara lain rele R-352E dan rele R-352E-1. *Single Line Diagram* rele arus lebih gangguan ke tanah tipikal 3 bisa dilihat pada Gambar 4.16.





**Gambar 4.16** Single Line Diagram Relé Arus Lebih Ground Tipikal 3

Perhitungan untuk parameter pengaturan rele seperti Iset dan *time delay* untuk rele R352E-1 dan rele R352E adalah sebagai berikut:

**Relé R-352E-1**

*Manufacturer* : VA TECH HYDRO GmbH  
*Model* : Argus 1  
*Isc L-G* : 10 A (6 kV)  
*C/T Rasio* : 100/1

**Instantaneous Pickup**

$$\begin{aligned}
 10\% \times I_{sc LG} < I_{set} < 50\% \times I_{sc LG} \\
 10\% \times 10 < I_{set} < 50\% \times 10 \\
 1 < I_{set} < 5
 \end{aligned}$$

$$\frac{1}{100/1} < Tap < \frac{5}{100/1}$$

$$0,01 < Tap < 0,05$$

Dipilih:

*Tap* = 0,04

*Iset* = 4 A

*Time Delay* = 0,1 s

### **Rele R-352E**

*Manufacturer* : VA TECH HYDRO GmbH

*Model* : Argus 1

*Isc L-G* : 10 A (6 kV)

*C/T Rasio* : 100/1

### **Instantaneous Pickup**

$$10\% \times I_{sc LG} < I_{\gg} < 50\% \times I_{sc LG}$$

$$10\% \times 10 < I_{\gg} < 50\% \times 10$$

$$1 < I_{\gg} < 5$$

$$\frac{1}{100/1} < Tap < \frac{5}{100/1}$$

$$0,01 < Tap < 0,05$$

Dipilih:

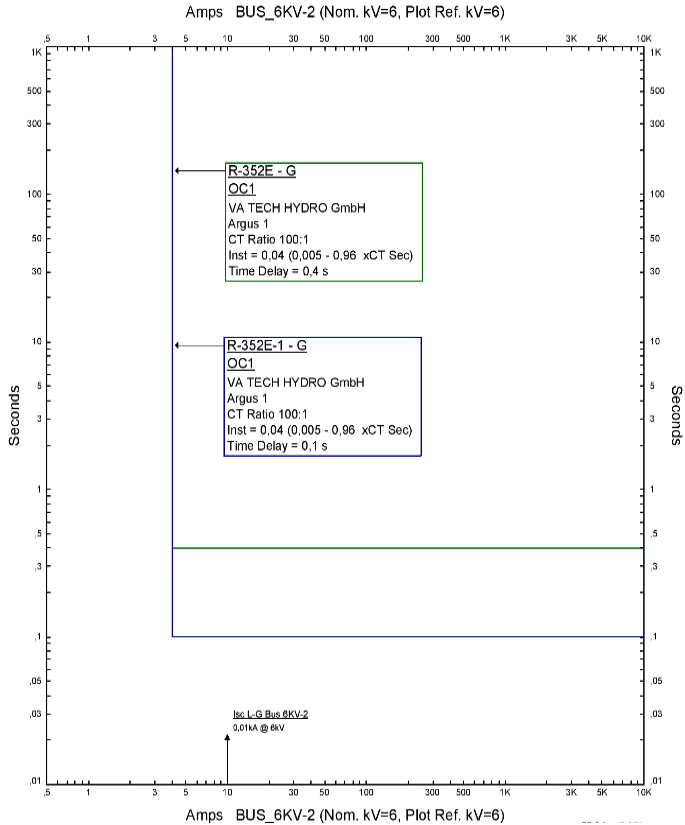
*Tap* = 0,04

*Iset* = 4 A

*Time Delay* = 0,4 s

Dari hasil perhitungan tersebut, kemudian diinputkan ke *relay editor* pada simulasi. Hasil plot kurva waktu TCC rele arus lebih gangguan ke tanah tipikal 2 dapat dilihat pada Gambar 4.17.

Sama seperti pada rele arus lebih gangguan ke tanah tipikal 2, penentuan *gradding time* untuk rele R-352E dan rele R-352E-1 diatur 0,3 detik sesuai dengan rentang waktu pada standar IEEE 1584-2002. Arus hubung singkat *line to ground* maksimum dibatasi hingga 10 A. Ketika ada gangguan ke tanah, maka R-352E akan mendeteksi gangguan pada waktu 0,1 detik dan CB 352-E *trip* pada waktu 0,15 detik. Selanjutnya rele R-352E-1 akan mendeteksi gangguan pada waktu 0,4 detik dan CB 352E-1 akan *trip* pada waktu 0,45 detik.



**Gambar 4.17** Kurva Koordinasi Rele Arus Lebih *Ground* Tipikal 3

#### 4.4 Hasil Simulasi Insiden Energi *Arc Flash* Kondisi *Resetting*

Setelah dilakukan perhitungan semua parameter untuk *resetting* koordinasi proteksi pada masing-masing tipikal yang ada, maka dengan menggunakan simulasi ETAP 12.6, besarnya insiden energi *arc flash* pada kondisi *resetting* di tiap-tiap bus dapat diketahui. Data insiden energi *arc flash* kondisi *resetting* dapat dilihat pada Tabel 4.6. Saat simulasi insiden energi *arc flash* pada bus 0,38 kV, semua bus 0,38 kV harus dalam kondisi *grounded*.

**Tabel 4.6** Hasil Simulasi Insiden Energi *Arc Flash* Kondisi *Resetting*

<b>BUS ID</b>	<b>Arus Bolted (kA)</b>	<b>Arus Arcing (kA)</b>	<b>FCT (s)</b>	<b>Insiden Energi (cal/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Kategori</b>
<b>BUS_20KV-1</b>	0,885	0,885	0,352	3,816	< Level 1
<b>BUS_20KV-1-1</b>	0,885	0,885	0,152	1,648	< Level 1
<b>BUS_20KV-2</b>	0,876	0,876	0,352	3,778	< Level 1
<b>BUS_20KV-2-1</b>	0,876	0,876	0,152	1,631	< Level 1
<b>BUS_20KV-3</b>	0,85	0,85	0,352	3,665	< Level 1
<b>BUS_20KV-4</b>	0,843	0,843	0,352	3,634	< Level 1
<b>BUS_6KV-2</b>	0,398	0,398	0,850	1,245	< Level 1
<b>BUS_0.38KV-1-1</b>	17,59	8,851	0,200	2,2	< Level 1
<b>BUS_0.38KV-1-2</b>	17,35	8,755	0,200	2,197	< Level 1
<b>BUS_0.38KV-1-3</b>	17,36	8,8	0,200	2,197	< Level 1
<b>BUS_0.38KV-1-4</b>	17,01	8,617	0,200	2,185	< Level 1
<b>BUS_0.38KV-2-1</b>	17,46	8,637	0,200	2,2	< Level 1
<b>BUS_0.38KV-2-2</b>	17,16	8,679	0,200	2,19	< Level 1
<b>BUS_0.38KV-2-3</b>	17,4	8,775	0,200	2,2	< Level 1
<b>BUS_0.38KV-3-1</b>	17,39	8,772	0,200	2,2	< Level 1
<b>BUS_0.38KV-3-2</b>	17,15	8,676	0,200	2,19	< Level 1
<b>BUS_0.38KV-4-1</b>	17,11	8,657	0,200	2,19	< Level 1
<b>BUS_0.38KV-4-2</b>	17,2	8,693	0,200	2,19	< Level 1

Berdasarkan hasil simulasi baik saat kondisi eksisting seperti ditampilkan pada Tabel 4.1 atau juga saat kondisi *resetting* seperti ditampilkan pada Tabel 4.6, dapat dilihat bahwa beberapa bus ada yang mengalami peningkatan ataupun penurunan nilai insiden energi *arc flash*. Misalnya pada bus 0,38 kV seperti BUS\_0.38KV-1-1 sampai bus BUS\_0.38KV-4-2 yang memiliki nilai insiden energi *arc flash* kondisi eksisting rata-rata 3,8 cal/cm<sup>2</sup>, setelah dilakukan *resetting* nilainya berkurang menjadi rata-rata 2,2 cal/cm<sup>2</sup>. Perbedaan nilai insiden energi *arc flash* pada saat kondisi eksisting dan kondisi *resetting*, dipengaruhi oleh pengaturan waktu dari koordinasi proteksi sistem. Semakin lama waktu rele arus lebih dalam melokalisir gangguan hubung singkat, maka akan mengakibatkan semakin besar nilai insiden energi *arc flash* yang dihasilkan. Sebaliknya, semakin cepat waktu rele arus lebih dalam melokalisir gangguan, maka nilai insiden energi *arc flash* bisa dikurangi.

#### 4.4.1 Perhitungan Insiden Energi Arc Flash Kondisi Resetting Dengan Menggunakan Standar IEEE 1584-2002

Selain menggunakan simulasi, penentuan parameter-parameter nilai insiden energi *arc flash* juga bisa dilakukan dengan perhitungan menggunakan metode yang sama dengan simulasi, yaitu berdasarkan standar IEEE 1584-2002. Pada sub bab ini akan dijelaskan perhitungan nilai insiden energi *arc flash* pada tiga level tegangan yang berbeda, yaitu tegangan 20 kV, tegangan 6 kV dan tegangan 0,38 kV.

Untuk tegangan kurang dari 1 kV (0,38 kV), persamaan arus *arcing* ( $I_a$ ) menggunakan persamaan (2.6), yaitu:

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

Dengan nilai  $K$  adalah -0,097 (konfigurasi box),  $V$  adalah 0,38 kV dan nilai  $G$  adalah 200 mm, maka:

$$\begin{aligned} \log I_a &= (-0,097) + 0,662 \log I_{bf} + 0,0966 (0,38) + 0,000526(200) \\ &\quad + 0,5588 (0,38) (\log I_{bf}) - 0,00304(200) (\log I_{bf}) \\ \log I_a &= 0,045 + 0,266 \log I_{bf} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Atau bisa disederhanakan menjadi:

$$I_a = 1,109 I_{bf}^{0,266} \quad (4.2)$$

Lalu untuk persamaan insiden energi menggunakan persamaan (2.12) yaitu:

$$E = C_f (1,109 I_{bf}^{0,266})^{1,081} 10^{(K_1 + K_2 + 0,0011 G)} \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610}{D}\right)^x$$

Dengan nilai  $C_f$  adalah 1,5,  $D$  adalah 455 mm,  $K_1$  adalah -0,555 (dalam box),  $K_2$  adalah -0,113 (sistem ditanahkan),  $G$  adalah 200 mm dan  $x$  adalah 1,641, maka didapatkan persamaan insiden energi *arc flash* berikut:

$$E = 4,837 x I_{bf}^{0,2875} x t \quad (4.3)$$

Sehingga dengan menggunakan persamaan (4.3), perhitungan nilai insiden energi *arc flash* pada tiap-tiap bus adalah sebagai berikut:

**BUS 0,38KV-1-1**

$$I_{bf} = 17,59 \text{ kA}; t = 0,2 \text{ detik}$$

$$E = 4,837 \times I_{bf}^{0,2875} \times t$$

$$E = 4,837 \times 17,59^{0,2875} \times 0,2$$

$$E = \mathbf{2,2 \text{ cal/cm}^2}$$

**BUS 0,38KV-1-2**

$$I_{bf} = 17,35 \text{ kA}; t = 0,2 \text{ detik}$$

$$E = 4,837 \times I_{bf}^{0,2875} \times t$$

$$E = 4,837 \times 17,35^{0,2875} \times 0,2$$

$$E = \mathbf{2,197 \text{ cal/cm}^2}$$

**BUS 0,38KV-1-3**

$$I_{bf} = 17,36 \text{ kA}; t = 0,2 \text{ detik}$$

$$E = 4,837 \times I_{bf}^{0,2875} \times t$$

$$E = 4,837 \times 17,36^{0,2875} \times 0,2$$

$$E = \mathbf{2,197 \text{ cal/cm}^2}$$

**BUS 0,38KV-1-4**

$$I_{bf} = 17,01 \text{ kA}; t = 0,2 \text{ detik}$$

$$E = 4,837 \times I_{bf}^{0,2875} \times t$$

$$E = 4,837 \times 17,01^{0,2875} \times 0,2$$

$$E = \mathbf{2,185 \text{ cal/cm}^2}$$

**BUS 0,38KV-2-1**

$$I_{bf} = 17,46 \text{ kA}; t = 0,2 \text{ detik}$$

$$E = 4,837 \times I_{bf}^{0,2875} \times t$$

$$E = 4,837 \times 17,46^{0,2875} \times 0,2$$

$$E = \mathbf{2,2 \text{ cal/cm}^2}$$

**BUS 0,38KV-2-2**

$$I_{bf} = 17,16 \text{ kA}; t = 0,2 \text{ detik}$$

$$E = 4,837 \times I_{bf}^{0,2875} \times t$$

$$E = 4,837 \times 17,16^{0,2875} \times 0,2$$

$$E = \mathbf{2,19 \text{ cal/cm}^2}$$

**BUS 0,38KV-2-3**

$$I_{bf} = 17,4 \text{ kA}; t = 0,2 \text{ detik}$$

$$E = 4,837 \times I_{bf}^{0,2875} \times t$$

$$E = 4,837 \times 17,4^{0,2875} \times 0,2$$

$$E = 2,2 \text{ cal/cm}^2$$

**BUS 0,38KV-3-1**

$$I_{bf} = 17,39 \text{ kA}; t = 0,2 \text{ detik}$$

$$E = 4,837 \times I_{bf}^{0,2875} \times t$$

$$E = 4,837 \times 17,39^{0,2875} \times 0,2$$

$$E = 2,2 \text{ cal/cm}^2$$

**BUS 0,38KV-3-2**

$$I_{bf} = 17,15 \text{ kA}; t = 0,2 \text{ detik}$$

$$E = 4,837 \times I_{bf}^{0,2875} \times t$$

$$E = 4,847 \times 17,15^{0,2875} \times 0,2$$

$$E = 2,19 \text{ cal/cm}^2$$

**BUS 0,38KV-4-1**

$$I_{bf} = 17,11 \text{ kA}; t = 0,2 \text{ detik}$$

$$E = 4,837 \times I_{bf}^{0,2875} \times t$$

$$E = 4,837 \times 17,11^{0,2875} \times 0,2$$

$$E = 2,19 \text{ cal/cm}^2$$

**BUS 0,38KV-4-2**

$$I_{bf} = 17,2 \text{ kA}; t = 0,2 \text{ detik}$$

$$E = 4,837 \times I_{bf}^{0,2875} \times t$$

$$E = 4,837 \times 17,2^{0,2875} \times 0,2$$

$$E = 2,19 \text{ cal/cm}^2$$

Berikutnya yaitu untuk tegangan antara 1 kV hingga tegangan 15 kV (6kV), persamaan insiden energi menggunakan persamaan (2.2) yaitu:

$$E = C_f (1,00929 I_{bf}^{0,983})^{1,081} 10^{(K_1 + K_2 + 0,0011 G)} \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610}{D} \right)^x$$

Dengan nilai  $C_f$  adalah 1,  $D$  adalah 910 mm,  $K_1$  adalah -0,555 (dalam box),  $K_2$  adalah -0,113 (sistem ditanahkan),  $G$  adalah 275 mm dan  $x$  adalah 0,973, maka didapatkan persamaan:

$$E = 1,372 \times I_{bf}^{1,0626} \times t \quad (4.4)$$

Jika nilai arus *bolted* tidak dalam rentan 0,7 kA sampai 106 kA meskipun level tegangan sistem antara 1 kV hingga tegangan 15 kV, maka dapat menggunakan Metode Lee pada persamaan (2.13) yaitu:

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

Dengan nilai  $D$  adalah 910 mm, level tegangan 6 kV dan konversi dari  $J/cm^2$  adalah 0,239  $cal/cm^2$ , maka persamaan insiden energi *arc flash* menjadi:

$$E = 3,7 \times I_{bf} \times t \quad (4.5)$$

Sehingga dengan menggunakan persamaan (4.5), perhitungan nilai insiden energi *arc flash* pada bus BUS\_6KV-2 adalah sebagai berikut:

### **BUS 6KV-2**

$$I_{bf} = 0,398 \text{ kA}; t = 0,850 \text{ detik}$$

$$E = 3,7 \times I_{bf} \times t$$

$$E = 3,7 \times 0,398 \times 0,85$$

$$E = \mathbf{1,251 \text{ cal/cm}^2}$$

Terakhir untuk tegangan > 15 kV (20kV), persamaan menentukan besar insiden energi *arc flash* menggunakan Metode Lee pada persamaan (2.13) sebagai berikut:

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

Dengan nilai  $D$  adalah 910 mm, level tegangan 20 kV dan konversi dari  $J/cm^2$  ke  $cal/cm^2$  adalah 0,239, maka didapatkan persamaan berikut:

$$E = 12,364 \times I_{bf} \times t \quad (4.6)$$

Sehingga dengan menggunakan persamaan (4.6), perhitungan nilai insiden energi *arc flash* pada bus 20 kV adalah sebagai berikut:



**BUS 20KV-1**

$$I_{bf} = 0,885 \text{ kA}; t = 0,352 \text{ detik}$$

$$E = 12,364 \times I_{bf} \times t$$

$$E = 12,364 \times 0,885 \times 0,352$$

$$E = 3,851 \text{ cal/cm}^2$$

**BUS 20KV-1-1**

$$I_{bf} = 0,885 \text{ kA}; t = 0,152 \text{ detik}$$

$$E = 12,364 \times I_{bf} \times t$$

$$E = 12,364 \times 0,885 \times 0,152$$

$$E = 1,66 \text{ cal/cm}^2$$

**BUS 20KV-2**

$$I_{bf} = 0,876 \text{ kA}; t = 0,352 \text{ detik}$$

$$E = 12,364 \times I_{bf} \times t$$

$$E = 12,364 \times 0,876 \times 0,352$$

$$E = 3,812 \text{ cal/cm}^2$$

**BUS 20KV-2-1**

$$I_{bf} = 0,876 \text{ kA}; t = 0,152 \text{ detik}$$

$$E = 12,364 \times I_{bf} \times t$$

$$E = 12,364 \times 0,876 \times 0,152$$

$$E = 1,64 \text{ cal/cm}^2$$

**BUS 20KV-3**

$$I_{bf} = 0,85 \text{ kA}; t = 0,352 \text{ detik}$$

$$E = 12,364 \times I_{bf} \times t$$

$$E = 12,364 \times 0,85 \times 0,352$$

$$E = 3,7 \text{ cal/cm}^2$$

**BUS 20KV-4**

$$I_{bf} = 0,843 \text{ kA}; t = 0,352 \text{ detik}$$

$$E = 12,364 \times I_{bf} \times t$$

$$E = 12,364 \times 0,843 \times 0,352$$

$$E = 3,67 \text{ cal/cm}^2$$

#### 4.4.2 Perhitungan Insiden Energi Arc Flash Kondisi Resetting Dengan Menggunakan Metode Modifikasi

Berbeda dengan perhitungan insiden energi *arc flash* pada standar IEEE 1584-2002, perhitungan insiden energi *arc flash* dengan menggunakan metode modifikasi dipertimbangkan berkurangnya nilai dari kontribusi arus hubung singkat berdasarkan periode gelombangnya, waktu pemutusan tiap CB (*Circuit Breaker*) di titik gangguan. Dengan metode ini, kontribusi arus hubung singkat pada tiap beban akan dikelompokkan kedalam beberapa domain waktu yang telah ditunjukkan pada Tabel 2.4.

Domain waktu yang digunakan yaitu 0-0,035 detik, 0,035-0,08 detik hingga 0,08-nilai FCT (*Fault Clearing Time*) tiap bus. Perhitungan nilai insiden energi *arc flash* pada masing-masing bus pada level tegangan 0,38 kV, 6 kV dan 20 kV adalah sebagai berikut:

##### **BUS 0.38KV-1-1 (FCT = 0,2 detik)**

*Domain waktu 0-0,035 detik (1/2 cycle):*

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 4,837 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf})^{0,2875} \times \Delta t$$

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 4,837 \times (15,21 + 2,38)^{0,2875} \times 0,035$$

$$E = 0,386 \text{ cal/cm}^2$$

*Domain waktu 0,035-0,08 detik (1,5-4 cycle):*

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 4,837 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf})^{0,2875} \times \Delta t$$

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 4,837 \times (14,85 + 0,953)^{0,2875} \times 0,045$$

$$E = 0,48 \text{ cal/cm}^2$$

*Domain waktu 0,08-0,2 detik (30 cycle):*

$$E_{0,12 \text{ detik}} = 4,837 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf})^{0,2875} \times \Delta t$$

$$E_{0,12 \text{ detik}} = 4,837 \times (15,21)^{0,2875} \times 0,12$$

$$E = 1,239 \text{ cal/cm}^2$$

**Total Insiden Energi Bus 0.38KV-1-1 :**

$$E = (0,386 + 0,48 + 1,239) \text{ cal/cm}^2 = 2,105 \text{ cal/cm}^2$$

**BUS 0.38KV-1-2 (FCT = 0,2 detik)***Domain waktu 0-0,035 detik (1/2 cycle):*

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 4,837 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf})^{0,2875} \times \Delta t$$

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 4,837 \times (15,23 + 2,12)^{0,2875} \times 0,035$$

$$E = 0,384 \text{ cal/cm}^2$$

*Domain waktu 0,035-0,08 detik (1,5-4 cycle):*

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 4,837 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf})^{0,2875} \times \Delta t$$

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 4,837 \times (14,86 + 0,847)^{0,2875} \times 0,045$$

$$E = 0,48 \text{ cal/cm}^2$$

*Domain waktu 0,08-0,2 detik (30 cycle):*

$$E_{0,12 \text{ detik}} = 4,837 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf})^{0,2875} \times \Delta t$$

$$E_{0,12 \text{ detik}} = 4,837 \times (15,23)^{0,2875} \times 0,12$$

$$E = 1,239 \text{ cal/cm}^2$$

**Total Insiden Energi Bus 0.38KV-1-2 :**

$$E = (0,348 + 0,48 + 1,239) \text{ cal/cm}^2 = 2,07 \text{ cal/cm}^2$$

**BUS 0.38KV-1-3 (FCT = 0,2 detik)***Domain waktu 0-0,035 detik (1/2 cycle):*

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 4,837 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf})^{0,2875} \times \Delta t$$

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 4,837 \times (15,22 + 1,4 + 0,84)^{0,2875} \times 0,035$$

$$E = 0,385 \text{ cal/cm}^2$$

*Domain waktu 0,035-0,08 detik (1,5-4 cycle):*

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 4,837 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf})^{0,2875} \times \Delta t$$

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 4,837 \times (14,86 + 0,56 + 0,336)^{0,2875} \times 0,045$$

$$E = 0,48 \text{ cal/cm}^2$$

*Domain waktu 0,08-0,2 detik (30 cycle):*

$$E_{0,12 \text{ detik}} = 4,837 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf})^{0,2875} \times \Delta t$$

$$E_{0,12 \text{ detik}} = 4,837 \times (15,22)^{0,2875} \times 0,12$$

$$E = 1,239 \text{ cal/cm}^2$$

**Total Insiden Energi Bus 0.38KV-1-3 :**

$$E = (0,385 + 0,48 + 1,239) \text{ cal/cm}^2 = 2,1 \text{ cal/cm}^2$$

**BUS 0.38KV-1-4 (FCT = 0,2 detik)**

*Domain waktu 0-0,035 detik (1/2 cycle):*

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 4,837 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf})^{0,2875} \times \Delta t$$

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 4,837 \times (15,61 + 1,4)^{0,2875} \times 0,035$$

$$E = 0,382 \text{ cal/cm}^2$$

*Domain waktu 0,035-0,08 detik (1,5-4 cycle):*

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 4,837 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf})^{0,2875} \times \Delta t$$

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 4,837 \times (15,19 + 0,56)^{0,2875} \times 0,045$$

$$E = 0,48 \text{ cal/cm}^2$$

*Domain waktu 0,08-0,2 detik (30 cycle):*

$$E_{0,12 \text{ detik}} = 4,837 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf})^{0,2875} \times \Delta t$$

$$E_{0,12 \text{ detik}} = 4,837 \times (15,61)^{0,2875} \times 0,12$$

$$E = 1,248 \text{ cal/cm}^2$$

**Total Insiden Energi Bus 0.38KV-1-4 :**

$$E = (0,382 + 0,48 + 1,248) \text{ cal/cm}^2 = 2,11 \text{ cal/cm}^2$$

**BUS 0.38KV-2-1 (FCT = 0,2 detik)**

*Domain waktu 0-0,035 detik (1/2 cycle):*

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 4,837 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf})^{0,2875} \times \Delta t$$

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 4,837 \times (15,66 + 1,4)^{0,2875} \times 0,035$$

$$E = 0,383 \text{ cal/cm}^2$$

*Domain waktu 0,035-0,08 detik (1,5-4 cycle):*

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 4,837 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf})^{0,2875} \times \Delta t$$

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 4,837 \times (15,37 + 0,56)^{0,2875} \times 0,045$$

$$E = 0,48 \text{ cal/cm}^2$$

*Domain waktu 0,08-0,2 detik (30 cycle):*

$$E_{0,12 \text{ detik}} = 4,837 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf})^{0,2875} \times \Delta t$$

$$E_{0,12 \text{ detik}} = 4,837 \times (15,66)^{0,2875} \times 0,12$$

$$E = 1,249 \text{ cal/cm}^2$$

**Total Insiden Energi Bus 0.38KV-2-1 :**

$$E = (0,383 + 0,48 + 1,249) \text{ cal/cm}^2 = 2,11 \text{ cal/cm}^2$$

**BUS 0.38KV-2-2 (FCT = 0,2 detik)**

*Domain waktu 0-0,035 detik (1/2 cycle):*

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 4,837 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf})^{0,2875} \times \Delta t$$

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 4,837 \times (15,05 + 2,12)^{0,2875} \times 0,035$$

$$E = 0,383 \text{ cal/cm}^2$$

*Domain waktu 0,035-0,08 detik (1,5-4 cycle):*

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 4,837 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf})^{0,2875} \times \Delta t$$

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 4,837 \times (14,81 + 0,847)^{0,2875} \times 0,045$$

$$E = 0,48 \text{ cal/cm}^2$$

*Domain waktu 0,08-0,2 detik (30 cycle):*

$$E_{0,12 \text{ detik}} = 4,837 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf})^{0,2875} \times \Delta t$$

$$E_{0,12 \text{ detik}} = 4,837 \times (15,05)^{0,2875} \times 0,12$$

$$E = 1,235 \text{ cal/cm}^2$$

**Total Insiden Energi Bus 0.38KV-2-2 :**

$$E = (0,383 + 0,48 + 1,235) \text{ cal/cm}^2 = 2,1 \text{ cal/cm}^2$$

**BUS 0.38KV-2-3 (FCT = 0,2 detik)**

*Domain waktu 0-0,035 detik (1/2 cycle):*

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 4,837 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf})^{0,2875} \times \Delta t$$

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 4,837 \times (15,02 + 2,38)^{0,2875} \times 0,035$$

$$E = 0,385 \text{ cal/cm}^2$$

*Domain waktu 0,035-0,08 detik (1,5-4 cycle):*

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 4,837 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf})^{0,2875} \times \Delta t$$

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 4,837 \times (14,8 + 0,953)^{0,2875} \times 0,045$$

$$E = 0,48 \text{ cal/cm}^2$$

*Domain waktu 0,08-0,2 detik (30 cycle):*

$$E_{0,12 \text{ detik}} = 4,837 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf})^{0,2875} \times \Delta t$$

$$E_{0,12 \text{ detik}} = 4,837 \times (15,02)^{0,2875} \times 0,12$$

$$E = 1,234 \text{ cal/cm}^2$$

**Total Insiden Energi Bus 0.38KV-2-3 :**

$$E = (0,385 + 0,48 + 1,234) \text{ cal/cm}^2 = 2,1 \text{ cal/cm}^2$$

**BUS 0.38KV-3-1 (FCT = 0,2 detik)***Domain waktu 0-0,035 detik (1/2 cycle):*

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 4,837 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf})^{0,2875} \times \Delta t$$

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 4,837 \times (15,01 + 2,38)^{0,2875} \times 0,035$$

$$E = 0,385 \text{ cal/cm}^2$$

*Domain waktu 0,035-0,08 detik (1,5-4 cycle):*

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 4,837 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf})^{0,2875} \times \Delta t$$

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 4,837 \times (14,88 + 0,953)^{0,2875} \times 0,045$$

$$E = 0,48 \text{ cal/cm}^2$$

*Domain waktu 0,08-0,2 detik (30 cycle):*

$$E_{0,12 \text{ detik}} = 4,837 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf})^{0,2875} \times \Delta t$$

$$E_{0,12 \text{ detik}} = 4,837 \times (15,01)^{0,2875} \times 0,12$$

$$E = 1,234 \text{ cal/cm}^2$$

**Total Insiden Energi Bus 0.38KV-3-1 :**

$$E = (0,385 + 0,48 + 1,234) \text{ cal/cm}^2 = 2,1 \text{ cal/cm}^2$$

**BUS 0.38KV-3-2 (FCT = 0,2 detik)***Domain waktu 0-0,035 detik (1/2 cycle):*

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 4,837 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf})^{0,2875} \times \Delta t$$

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 4,837 \times (15,04 + 2,12)^{0,2875} \times 0,035$$

$$E = 0,383 \text{ cal/cm}^2$$

*Domain waktu 0,035-0,08 detik (1,5-4 cycle):*

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 4,837 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf})^{0,2875} \times \Delta t$$

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 4,837 \times (14,89 + 0,847)^{0,2875} \times 0,045$$

$$E = 0,48 \text{ cal/cm}^2$$

*Domain waktu 0,08-0,2 detik (30 cycle):*

$$E_{0,12 \text{ detik}} = 4,837 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf})^{0,2875} \times \Delta t$$

$$E_{0,12 \text{ detik}} = 4,837 \times (15,04)^{0,2875} \times 0,12$$

$$E = 1,235 \text{ cal/cm}^2$$

**Total Insiden Energi Bus 0.38KV-3-2 :**

$$E = (0,383 + 0,48 + 1,235) \text{ cal/cm}^2 = 2,1 \text{ cal/cm}^2$$

**BUS 0.38KV-4-1 (FCT = 0,2 detik)***Domain waktu 0-0,035 detik (1/2 cycle):*

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 4,837 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf})^{0,2875} \times \Delta t$$

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 4,837 \times (14,99 + 2,12)^{0,2875} \times 0,035$$

$$E = 0,383 \text{ cal/cm}^2$$

*Domain waktu 0,035-0,08 detik (1,5-4 cycle):*

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 4,837 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf})^{0,2875} \times \Delta t$$

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 4,837 \times (14,84 + 0,847)^{0,2875} \times 0,045$$

$$E = 0,48 \text{ cal/cm}^2$$

*Domain waktu 0,08-0,2 detik (30 cycle):*

$$E_{0,12 \text{ detik}} = 4,837 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf})^{0,2875} \times \Delta t$$

$$E_{0,12 \text{ detik}} = 4,837 \times (14,99)^{0,2875} \times 0,12$$

$$E = 1,234 \text{ cal/cm}^2$$

**Total Insiden Energi Bus 0.38KV-4-1 :**

$$E = (0,383 + 0,48 + 1,234) \text{ cal/cm}^2 = 2,1 \text{ cal/cm}^2$$

**BUS 0.38KV-4-2 (FCT = 0,2 detik)***Domain waktu 0-0,035 detik (1/2 cycle):*

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 4,837 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf})^{0,2875} \times \Delta t$$

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 4,837 \times (14,82 + 2,38)^{0,2875} \times 0,035$$

$$E = 0,383 \text{ cal/cm}^2$$

*Domain waktu 0,035-0,08 detik (1,5-4 cycle):*

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 4,837 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf})^{0,2875} \times \Delta t$$

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 4,837 \times (14,68 + 0,953)^{0,2875} \times 0,045$$

$$E = 0,48 \text{ cal/cm}^2$$

*Domain waktu 0,08-0,2 detik (30 cycle):*

$$E_{0,12 \text{ detik}} = 4,837 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf})^{0,2875} \times \Delta t$$

$$E_{0,12 \text{ detik}} = 4,837 \times (14,82)^{0,2875} \times 0,12$$

$$E = 1,23 \text{ cal/cm}^2$$

**Total Insiden Energi Bus 0.38KV-4-2 :**

$$E = (0,383 + 0,48 + 1,23) \text{ cal/cm}^2 = 2,1 \text{ cal/cm}^2$$

**BUS 6KV-2 (FCT = 0,85 detik)**

*Domain waktu 0-0,035 detik (1/2 cycle):*

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 3,7 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf} \text{ Bus 6KV 2}) \times \Delta t$$

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 3,7 \times (0,32 + 0,083) \times 0,035$$

$$E = 0,052 \text{ cal/cm}^2$$

*Domain waktu 0,035-0,08 detik (1,5-4 cycle):*

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 3,7 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf} \text{ Bus 6KV 2}) \times \Delta t$$

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 3,7 \times (0,32 + 0,035) \times 0,045$$

$$E = 0,06 \text{ cal/cm}^2$$

*Domain waktu 0,08-0,85 detik (30 cycle):*

$$E_{0,77 \text{ detik}} = 3,7 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf} \text{ Bus 6KV 2}) \times \Delta t$$

$$E_{0,77 \text{ detik}} = 3,7 \times (0,32) \times 0,77$$

$$E = 0,91 \text{ cal/cm}^2$$

**Total Insiden Energi Bus 6KV-2 :**

$$E = (0,052 + 0,06 + 0,91) \text{ cal/cm}^2 = 1,02 \text{ cal/cm}^2$$

**BUS 20KV-1 (FCT = 0,352 detik)**

*Domain waktu 0-0,035 detik (1/2 cycle):*

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 12,364 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf} \text{ Bus 20KV 1}) \times \Delta t$$

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 12,364 \times (0,742 + 0,043 + 0,038 + 0,066) \times 0,035$$

$$E = 0,385 \text{ cal/cm}^2$$

*Domain waktu 0,035-0,08 detik (1,5-4 cycle):*

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 12,364 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf} \text{ Bus 20KV 1}) \times \Delta t$$

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 12,364 \times (0,742 + 0,018 + 0,016 + 0,028) \times 0,045$$

$$E = 0,318 \text{ cal/cm}^2$$

*Domain waktu 0,08-0,352 detik (30 cycle):*

$$E_{0,272 \text{ detik}} = 12,364 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf} \text{ Bus 20KV 1}) \times \Delta t$$

$$E_{0,272 \text{ detik}} = 12,364 \times (0,742) \times 0,272$$

$$E = 2,5 \text{ cal/cm}^2$$

**Total Insiden Energi Bus 20KV-1 :**

$$E = (0,385 + 0,318 + 2,5) \text{ cal/cm}^2 = 3,2 \text{ cal/cm}^2$$



**BUS 20KV-1-1 (FCT = 0,152 detik)**

Domain waktu 0-0,035 detik (1/2 cycle):

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 12,364 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf} \text{ Bus 20KV 1} - 1) \times \Delta t$$

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 12,364 \times (0,82 + 0,04 + 0,026) \times 0,035$$

$$E = 0,383 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035-0,08 detik (1,5-4 cycle):

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 12,364 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf} \text{ Bus 20KV 1} - 1) \times \Delta t$$

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 12,364 \times (0,775 + 0,017 + 0,011) \times 0,045$$

$$E = 0,447 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08-0,152 detik (30 cycle):

$$E_{0,072 \text{ detik}} = 12,364 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf} \text{ Bus 20KV 1} - 1) \times \Delta t$$

$$E_{0,072 \text{ detik}} = 12,364 \times (0,82) \times 0,072$$

$$E = 0,73 \text{ cal/cm}^2$$

**Total Insiden Energi Bus 20KV-1-1 :**

$$E = (0,383 + 0,447 + 0,73) \text{ cal/cm}^2 = 1,56 \text{ cal/cm}^2$$

**BUS 20KV-2 (FCT = 0,352 detik)**

Domain waktu 0-0,035 detik (1/2 cycle):

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 12,364 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf} \text{ Bus 20KV 2}) \times \Delta t$$

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 12,364 \times (0,771 + 0,026 + 0,039 + 0,043) \times 0,035$$

$$E = 0,38 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035-0,08 detik (1,5-4 cycle):

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 12,364 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf} \text{ Bus 20KV 2}) \times \Delta t$$

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 12,364 \times (0,771 + 0,011 + 0,016 + 0,018) \times 0,045$$

$$E = 0,454 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08-0,352 detik (30 cycle):

$$E_{0,272 \text{ detik}} = 12,364 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf} \text{ Bus 20KV 2}) \times \Delta t$$

$$E_{0,272 \text{ detik}} = 12,364 \times (0,771) \times 0,272$$

$$E = 2,6 \text{ cal/cm}^2$$

**Total Insiden Energi Bus 20KV-2 :**

$$E = (0,38 + 0,454 + 2,6) \text{ cal/cm}^2 = 3,434 \text{ cal/cm}^2$$

**BUS 20KV-2-1 (FCT = 0,152 detik)**

*Domain waktu 0-0,035 detik (1/2 cycle):*

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 12,364 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf} \text{ Bus 20KV 2 - 1}) \times \Delta t$$

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 12,364 \times (0,851 + 0,026) \times 0,035$$

$$E = 0,38 \text{ cal/cm}^2$$

*Domain waktu 0,035-0,08 detik (1,5-4 cycle):*

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 12,364 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf} \text{ Bus 20KV 2 - 1}) \times \Delta t$$

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 12,364 \times (0,805 + 0,011) \times 0,045$$

$$E = 0,454 \text{ cal/cm}^2$$

*Domain waktu 0,08-0,152 detik (30 cycle):*

$$E_{0,072 \text{ detik}} = 12,364 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf} \text{ Bus 20KV 2 - 1}) \times \Delta t$$

$$E_{0,072 \text{ detik}} = 12,364 \times (0,851) \times 0,072$$

$$E = 0,76 \text{ cal/cm}^2$$

**Total Insiden Energi Bus 20KV-2-1 :**

$$E = (0,38 + 0,454 + 0,76) \text{ cal/cm}^2 = 1,6 \text{ cal/cm}^2$$

**BUS 20KV-3 (FCT = 0,352 detik)**

*Domain waktu 0-0,035 detik (1/2 cycle):*

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 12,364 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf} \text{ Bus 20KV - 3}) \times \Delta t$$

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 12,364 \times (0,771 + 0,043 + 0,038) \times 0,035$$

$$E = 0,37 \text{ cal/cm}^2$$

*Domain waktu 0,035-0,08 detik (1,5-4 cycle):*

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 12,364 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf} \text{ Bus 20KV - 3}) \times \Delta t$$

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 12,364 \times (0,771 + 0,018 + 0,016) \times 0,045$$

$$E = 0,448 \text{ cal/cm}^2$$

*Domain waktu 0,08-0,352 detik (30 cycle):*

$$E_{0,272 \text{ detik}} = 12,364 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf} \text{ Bus 20KV - 3}) \times \Delta t$$

$$E_{0,272 \text{ detik}} = 12,364 \times (0,771) \times 0,272$$

$$E = 2,59 \text{ cal/cm}^2$$

**Total Insiden Energi Bus 20KV-3 :**

$$E = (0,37 + 0,448 + 2,59) \text{ cal/cm}^2 = 3,4 \text{ cal/cm}^2$$

### **BUS 20KV-4 (FCT = 0,302 detik)**

*Domain waktu 0-0,035 detik (1/2 cycle):*

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 12,364 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf} \text{ Bus 20KV} - 4) \times \Delta t$$

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 12,364 \times (0,763 + 0,038 + 0,043) \times 0,035$$

$$E = 0,365 \text{ cal/cm}^2$$

*Domain waktu 0,035-0,08 detik (1,5-4 cycle):*

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 12,364 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf} \text{ Bus 20KV} - 4) \times \Delta t$$

$$E_{0,045 \text{ detik}} = 12,364 \times (0,763 + 0,016 + 0,018) \times 0,045$$

$$E = 0,443 \text{ cal/cm}^2$$

*Domain waktu 0,08-0,352 detik (30 cycle):*

$$E_{0,272 \text{ detik}} = 12,364 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf} \text{ Bus 20KV} - 4) \times \Delta t$$

$$E_{0,272 \text{ detik}} = 12,364 \times (0,763) \times 0,272$$

$$E = 2,56 \text{ cal/cm}^2$$

**Total Insiden Energi Bus 20KV-4 :**

$$E = (0,365 + 0,443 + 2,56) \text{ cal/cm}^2 = 3,37 \text{ cal/cm}^2$$

## **4.5 Perhitungan FPB (Flash Protection Boundary)**

### **Berdasarkan Hasil Perhitungan Insiden Energi Arc Flash**

Perhitungan jarak aman atau FPB (*Flash Protection Boundary*), diperoleh dari hasil perhitungan nilai insiden energi *arc flash* pada sistem kelistrikan PT. PJB UP Cirata setelah dilakukan *resetting*, baik itu ketika menggunakan standar IEEE 1584-2002 atau juga saat menggunakan metode perhitungan modifikasi. Hasil perhitungan dari jarak aman ini akan digunakan sebagai acuan dalam menentukan titik aman bagi pekerja terhadap potensi bahaya *arc flash* yang terjadi. Perhitungan nilai jarak aman disesuaikan dengan level tegangan sistem yang digunakan. Untuk level tegangan kurang dari 1 kV, penentuan jarak aman bisa menggunakan persamaan (2.15). Lalu untuk level tegangan lebih dari 15 kV atau sistem diluar rentang pada standar IEEE 1584-2002, penentuan jarak aman bisa menggunakan persamaan Metode Lee seperti pada persamaan (2.16).

Perhitungan nilai jarak aman terbagi menjadi dua bagian, yaitu pada saat kondisi *resetting* dengan menggunakan standar IEEE 1584-2002 dan pada saat menggunakan metode modifikasi.

#### 4.5.1 Perhitungan FPB (*Flash Protection Boundary*) Kondisi *Resetting* Menggunakan Standar IEEE 1584-2002

Pada subbab 4.4.1 sebelumnya, telah dilakukan perhitungan insiden energi *arc flash* berdasarkan standar IEEE 1584-2002 pada masing-masing bus sesuai dengan level tegangannya. Pada level tegangan 0,38 kV, penentuan jarak aman berdasarkan hasil perhitungan insiden energi *arc flash* pada tiap bus. Sedangkan pada level tegangan 6 kV dan 20 kV menggunakan parameter arus *bolted* (Ibf). Perhitungan masing-masing bus yaitu sebagai berikut:

##### **BUS 0,38KV-1-1**

$$E = 2,2 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan batas jarak perlindungan (*Flash Protection Boundary*):

$$D_B = \left[ 4,184 C_f E_n \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} = \left[ 4,184 \left( \frac{E}{E_B} \right) D^x \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[ 4,184 \left( \frac{2,2}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}} = 660 \text{ mm} = 0,66 \text{ m}$$

##### **BUS 0,38KV-1-2**

$$E = 2,197 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan batas jarak perlindungan (*Flash Protection Boundary*):

$$D_B = \left[ 4,184 C_f E_n \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} = \left[ 4,184 \left( \frac{E}{E_B} \right) D^x \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[ 4,184 \left( \frac{2,197}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}} = 660 \text{ mm} = 0,66 \text{ m}$$

##### **BUS 0,38KV-1-3**

$$E = 2,197 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan batas jarak perlindungan (*Flash Protection Boundary*):

$$D_B = \left[ 4,184 C_f E_n \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} = \left[ 4,184 \left( \frac{E}{E_B} \right) D^x \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[ 4,184 \left( \frac{2,197}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}} = 660 \text{ mm} = 0,66 \text{ m}$$

**BUS 0,38KV-1-4**

$$E = 2,185 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan batas jarak perlindungan (*Flash Protection Boundary*):

$$D_B = \left[ 4,184 C_f E_n \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} = \left[ 4,184 \left( \frac{E}{E_B} \right) D^x \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[ 4,184 \left( \frac{2,185}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}} = 657 \text{ mm} = 0,657 \text{ m}$$

**BUS 0,38KV-2-1**

$$E = 2,2 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan batas jarak perlindungan (*Flash Protection Boundary*):

$$D_B = \left[ 4,184 C_f E_n \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} = \left[ 4,184 \left( \frac{E}{E_B} \right) D^x \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[ 4,184 \left( \frac{2,2}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}} = 660 \text{ mm} = 0,66 \text{ m}$$

**BUS 0,38KV-2-2**

$$E = 2,19 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan batas jarak perlindungan (*Flash Protection Boundary*):

$$D_B = \left[ 4,184 C_f E_n \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} = \left[ 4,184 \left( \frac{E}{E_B} \right) D^x \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[ 4,184 \left( \frac{2,19}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}} = 658 \text{ mm} = 0,658 \text{ m}$$

**BUS 0,38KV-2-3**

$$E = 2,2 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan batas jarak perlindungan (*Flash Protection Boundary*):

$$D_B = \left[ 4,184 C_f E_n \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} = \left[ 4,184 \left( \frac{E}{E_B} \right) D^x \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[ 4,184 \left( \frac{2,2}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}} = 660 \text{ mm} = 0,66 \text{ m}$$

**BUS 0,38KV-3-1**

$$E = 2,2 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan batas jarak perlindungan (*Flash Protection Boundary*):

$$D_B = \left[ 4,184 C_f E_n \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} = \left[ 4,184 \left( \frac{E}{E_B} \right) D^x \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[ 4,184 \left( \frac{2,2}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}} = 660 \text{ mm} = 0,66 \text{ m}$$

**BUS 0,38KV-3-2**

$$E = 2,19 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan batas jarak perlindungan (*Flash Protection Boundary*):

$$D_B = \left[ 4,184 C_f E_n \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} = \left[ 4,184 \left( \frac{E}{E_B} \right) D^x \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[ 4,184 \left( \frac{2,19}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}} = 658 \text{ mm} = 0,658 \text{ m}$$

**BUS 0,38KV-4-1**

$$E = 2,19 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan batas jarak perlindungan (*Flash Protection Boundary*):

$$D_B = \left[ 4,184 C_f E_n \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} = \left[ 4,184 \left( \frac{E}{E_B} \right) D^x \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[ 4,184 \left( \frac{2,19}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}} = 658 \text{ mm} = 0,658 \text{ m}$$

**BUS 0,38KV-4-2**

$$E = 2,19 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan batas jarak perlindungan (*Flash Protection Boundary*):

$$D_B = \left[ 4,184 C_f E_n \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} = \left[ 4,184 \left( \frac{E}{E_B} \right) D^x \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[ 4,184 \left( \frac{2,19}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}} = 658 \text{ mm} = 0,658 \text{ m}$$

**BUS 6KV-2**

$$E = 1,251 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan batas jarak perlindungan (*Flash Protection Boundary*):

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times V \times I_{bf} \times \left(\frac{t}{E_B}\right)}$$

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times 6 \times 0,398 \times \left(\frac{0,85}{5}\right)} = 933 \text{ mm} = 0,933 \text{ m}$$

**BUS 20KV-1**

$$E = 3,851 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan batas jarak perlindungan (*Flash Protection Boundary*):

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times V \times I_{bf} \times \left(\frac{t}{E_B}\right)}$$

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times 20 \times 0,885 \times \left(\frac{0,302}{5}\right)} = 1513 \text{ mm} = 1,513 \text{ m}$$

**BUS 20KV-1-1**

$$E = 1,66 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan batas jarak perlindungan (*Flash Protection Boundary*):

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times V \times I_{bf} \times \left(\frac{t}{E_B}\right)}$$

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times 20 \times 0,885 \times \left(\frac{0,302}{5}\right)} = 1513 \text{ mm} = 1,513 \text{ m}$$

**BUS 20KV-2**

$$E = 3,812 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan batas jarak perlindungan (*Flash Protection Boundary*):

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times V \times I_{bf} \times \left(\frac{t}{E_B}\right)}$$

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times 20 \times 0,876 \times \left(\frac{0,302}{5}\right)} = 1506 \text{ mm} = 1,5 \text{ m}$$

### **BUS 20KV-2-1**

$$E = 1,64 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan batas jarak perlindungan (*Flash Protection Boundary*):

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times V \times I_{bf} \times \left(\frac{t}{E_B}\right)}$$

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times 20 \times 0,876 \times \left(\frac{0,302}{5}\right)} = 1506 \text{ mm} = 1,5 \text{ m}$$

### **BUS 20KV-3**

$$E = 3,7 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan batas jarak perlindungan (*Flash Protection Boundary*):

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times V \times I_{bf} \times \left(\frac{t}{E_B}\right)}$$

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times 20 \times 0,85 \times \left(\frac{0,302}{5}\right)} = 1483 \text{ mm} = 1,483 \text{ m}$$

### **BUS 20KV-4**

$$E = 3,67 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan batas jarak perlindungan (*Flash Protection Boundary*):

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times V \times I_{bf} \times \left(\frac{t}{E_B}\right)}$$

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times 20 \times 0,843 \times \left(\frac{0,302}{5}\right)} = 1477 \text{ mm} = 1,477 \text{ m}$$



#### 4.5.2 Perhitungan FPB (*Flash Protection Boundary*) Kondisi *Resetting* Menggunakan Metode Modifikasi

Pada subbab 4.5.1, telah dilakukan perhitungan jarak aman pekerja dari potensi bahaya *arc flash*, berdasarkan standar IEEE 1584-2002 pada kondisi *resetting* untuk tiap bus sesuai dengan level tegangannya. Pada subbab ini, penentuan jarak aman bagi pekerja dihitung menggunakan hasil perhitungan insiden energi dengan metode modifikasi. Pada level tegangan 0,38 kV, penentuan jarak aman menggunakan persamaan seperti pada subbab 4.5.1, yang membedakan hanya pada nilai insiden energi *arc flash* saja. Sedangkan pada level tegangan 6 kV dan 20 kV, nilai jarak aman kondisi *resetting*, baik pada saat menggunakan standar IEEE 1584-2002 atau menggunakan standar modifikasi adalah sama. Hal ini karena parameter yang digunakan dalam persamaan adalah arus *boltd* (Ibf) bukan nilai insiden energi *arc flash* tiap metode. Perhitungan jarak aman untuk masing-masing bus 0,38 kV yaitu sebagai berikut:

##### **BUS 0,38KV-1-1**

$$E = 2,105 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan batas jarak perlindungan (*Flash Protection Boundary*):

$$D_B = \left[ 4,184 C_f E_n \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} = \left[ 4,184 \left( \frac{E}{E_B} \right) D^x \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[ 4,184 \left( \frac{2,105}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}} = 642 \text{ mm} = 0,642 \text{ m}$$

##### **BUS 0,38KV-1-2**

$$E = 2,07 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan batas jarak perlindungan (*Flash Protection Boundary*):

$$D_B = \left[ 4,184 C_f E_n \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} = \left[ 4,184 \left( \frac{E}{E_B} \right) D^x \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[ 4,184 \left( \frac{2,07}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}} = 636 \text{ mm} = 0,636 \text{ m}$$

**BUS 0,38KV-1-3**

$$E = 2,1 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan batas jarak perlindungan (*Flash Protection Boundary*):

$$D_B = \left[ 4,184 C_f E_n \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} = \left[ 4,184 \left( \frac{E}{E_B} \right) D^x \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[ 4,184 \left( \frac{2,1}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}} = 642 \text{ mm} = 0,642 \text{ m}$$

**BUS 0,38KV-1-4**

$$E = 2,11 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan batas jarak perlindungan (*Flash Protection Boundary*):

$$D_B = \left[ 4,184 C_f E_n \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} = \left[ 4,184 \left( \frac{E}{E_B} \right) D^x \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[ 4,184 \left( \frac{2,11}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}} = 643 \text{ mm} = 0,643 \text{ m}$$

**BUS 0,38KV-2-1**

$$E = 2,11 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan batas jarak perlindungan (*Flash Protection Boundary*):

$$D_B = \left[ 4,184 C_f E_n \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} = \left[ 4,184 \left( \frac{E}{E_B} \right) D^x \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[ 4,184 \left( \frac{2,11}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}} = 643 \text{ mm} = 0,643 \text{ m}$$

**BUS 0,38KV-2-2**

$$E = 2,1 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan batas jarak perlindungan (*Flash Protection Boundary*):

$$D_B = \left[ 4,184 C_f E_n \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} = \left[ 4,184 \left( \frac{E}{E_B} \right) D^x \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[ 4,184 \left( \frac{2,1}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}} = 642 \text{ mm} = 0,642 \text{ m}$$

**BUS 0,38KV-2-3**

$$E = 2,1 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan batas jarak perlindungan (*Flash Protection Boundary*):

$$D_B = \left[ 4,184 C_f E_n \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} = \left[ 4,184 \left( \frac{E}{E_B} \right) D^x \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[ 4,184 \left( \frac{2,1}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}} = 642 \text{ mm} = 0,642 \text{ m}$$

**BUS 0,38KV-3-1**

$$E = 2,1 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan batas jarak perlindungan (*Flash Protection Boundary*):

$$D_B = \left[ 4,184 C_f E_n \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} = \left[ 4,184 \left( \frac{E}{E_B} \right) D^x \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[ 4,184 \left( \frac{2,1}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}} = 642 \text{ mm} = 0,642 \text{ m}$$

**BUS 0,38KV-3-2**

$$E = 2,1 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan batas jarak perlindungan (*Flash Protection Boundary*):

$$D_B = \left[ 4,184 C_f E_n \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} = \left[ 4,184 \left( \frac{E}{E_B} \right) D^x \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[ 4,184 \left( \frac{2,1}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}} = 642 \text{ mm} = 0,642 \text{ m}$$

**BUS 0,38KV-4-1**

$$E = 2,1 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan batas jarak perlindungan (*Flash Protection Boundary*):

$$D_B = \left[ 4,184 C_f E_n \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} = \left[ 4,184 \left( \frac{E}{E_B} \right) D^x \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[ 4,184 \left( \frac{2,1}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}} = 642 \text{ mm} = 0,642 \text{ m}$$

### **BUS 0,38KV-4-2**

$$E = 2,1 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan batas jarak perlindungan (*Flash Protection Boundary*):

$$D_B = \left[ 4,184 C_f E_n \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} = \left[ 4,184 \left( \frac{E}{E_B} \right) D^x \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[ 4,184 \left( \frac{2,1}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}} = 642 \text{ mm} = 0,642 \text{ m}$$

### **4.6 Perbandingan Besar Energi Arc Flash Kondisi Resetting Berdasarkan Standar IEEE 1584-2002 dan Metode Modifikasi**

Perbandingan hasil perhitungan insiden energi *arc flash* antara simulasi, perhitungan sesuai standar IEEE 1584-2002 dan perhitungan modifikasi pada kondisi *resetting* sistem kelistrikan PT. PJB UP Cirata, dapat dilihat pada Tabel 4.7. Berdasarkan data pada tabel tersebut, dapat diketahui nilai insiden energi *arc flash* pada masing-masing metode. Nilai insiden energi *arc flash* menggunakan metode perhitungan modifikasi, memiliki nilai yang hampir sama dengan nilai insiden energi *arc flash*. Tapi nilai insiden energi *arc flash* menggunakan metode perhitungan modifikasi, memiliki nilai yang sedikit lebih kecil daripada perhitungan berdasarkan standar IEEE 1584-2002. Hal ini karena pada metode perhitungan modifikasi, mempertimbangkan berkurangnya arus kontribusi dari beban seperti motor induksi maupun motor sinkron, dari pembangkit atau juga dari *grid/utility* sesuai dengan periode waktu hubung singkat yang terjadi. Selain itu, metode modifikasi juga menjelaskan tentang perbedaan *time domain* atau sela waktu. Sela waktu tersebut dibagi menjadi beberapa bagian yaitu, pada waktu 0,5 *cycle*, waktu 1,5 sampai dengan 4 *cycle* dan waktu 30 *cycle* sampai waktu pemutusan gangguan atau FCT (*Fault Clearing Time*) untuk tiap CB (*Circuit Breaker*) dari masing-masing sumber yang memberikan arus kontribusi pada titik gangguan. Sedangkan pada perhitungan insiden energi *arc flash* menggunakan standar IEEE 1584-2002, berkurangnya arus kontribusi tidak dipertimbangkan dan waktu pemutusan CB (*Circuit Breaker*) dipilih waktu pemutusan terlama.

Berdasarkan parameter tersebut, metode perhitungan insiden energi *arc flash* dengan menggunakan metode perhitungan modifikasi memiliki hasil yang lebih akurat.

**Tabel 4.7** Perbandingan Besar Energi *Arc Flash* Kondisi *Resetting* antara Standar IEEE 1584-2002 dan Perhitungan Modifikasi

BUS ID	Insiden Energi (cal/cm <sup>2</sup> ) Simulasi Standar IEEE	L e v e l	Insiden Energi (cal/cm <sup>2</sup> ) Perhitungan Standar IEEE	L e v e l	Insiden Energi (cal/cm <sup>2</sup> ) Metode Modifikasi	L e v e l
BUS_20KV-1	3,816	1	3,851	1	3,2	1
BUS_20KV-1-1	1,648	1	1,66	1	1,56	1
BUS_20KV-2	3,778	1	3,812	1	3,434	1
BUS_20KV-2-1	1,631	1	1,64	1	1,6	1
BUS_20KV-3	3,665	1	3,7	1	3,4	1
BUS_20KV-4	3,634	1	3,67	1	3,37	1
BUS_6KV-2	1,245	1	1,251	1	1,02	1
BUS_0.38KV-1-1	2,2	1	2,2	1	2,105	1
BUS_0.38KV-1-2	2,197	1	2,197	1	2,07	1
BUS_0.38KV-1-3	2,197	1	2,197	1	2,1	1
BUS_0.38KV-1-4	2,185	1	2,185	1	2,11	1
BUS_0.38KV-2-1	2,2	1	2,2	1	2,11	1
BUS_0.38KV-2-2	2,19	1	2,19	1	2,1	1
BUS_0.38KV-2-3	2,2	1	2,2	1	2,1	1
BUS_0.38KV-3-1	2,2	1	2,2	1	2,1	1
BUS_0.38KV-3-2	2,19	1	2,19	1	2,1	1
BUS_0.38KV-4-1	2,19	1	2,19	1	2,1	1
BUS_0.38KV-4-2	2,19	1	2,19	1	2,1	1

#### 4.7 Perbandingan FPB (*Flash Protection Boundary*) dan PPE (*Personal Protective Equipment*) Standar IEEE 1584-2002 dan Metode Modifikasi

Setelah melakukan beberapa metode dalam penentuan FPB (*Flash Protection Boundary*) atau jarak aman dari bahaya *arc flash*, didapatkan hasil yaitu pada kondisi *resetting* kelistrikan PT. PJB UP Cirata dengan menggunakan perhitungan modifikasi, memiliki nilai yang sedikit lebih kecil dari pada perhitungan menggunakan standar IEEE 1584-2002 dan simulasi. Nilai FPB (*Flash Protection Boundary*) pada masing-masing metode bisa dilihat pada Tabel 4.8.

**Tabel 4.8** Perbandingan FPB (*Flash Protection Boundary*) Kondisi *Resetting* antara Standar IEEE 1584-2002 dan Perhitungan Modifikasi

BUS ID	FPB (m) Simulasi Standar IEEE	FPB (m) Perhitungan Standar IEEE	FPB (m) Metode Modifikasi
BUS_20KV-1	1,641	1,513	1,513
BUS_20KV-1-1	1,074	1,513	1,513
BUS_20KV-2	1,626	1,5	1,5
BUS_20KV-2-1	1,068	1,5	1,5
BUS_20KV-3	1,601	1,483	1,483
BUS_20KV-4	1,594	1,477	1,477
BUS_6KV-2	0,933	0,933	0,933
BUS_0.38KV-1-1	0,661	0,66	0,642
BUS_0.38KV-1-2	0,661	0,66	0,636
BUS_0.38KV-1-3	0,661	0,66	0,642
BUS_0.38KV-1-4	0,657	0,657	0,643
BUS_0.38KV-2-1	0,662	0,66	0,643
BUS_0.38KV-2-2	0,658	0,658	0,642
BUS_0.38KV-2-3	0,662	0,66	0,642
BUS_0.38KV-3-1	0,662	0,66	0,642
BUS_0.38KV-3-2	0,658	0,658	0,642
BUS_0.38KV-4-1	0,658	0,658	0,642
BUS_0.38KV-4-2	0,658	0,658	0,642

Ketika seorang pekerja melakukan aktifitas pekerjaan di dalam batas daerah yang memiliki potensi bahaya *arc flash*, maka ia harus mengenakan pakaian pelindung dan alat pelindung diri lainnya sesuai dengan standar yang digunakan, yaitu standar NFPA 70-E 2015. Berdasarkan hasil perhitungan insiden energi *arc flash* pada saat menggunakan standar IEE 1584-2002 dan juga metode modifikasi, maka didapatkan nilai insiden energi *arc flash* pada tiap bus yang telah ditentukan. Kemudian bus-bus tersebut dikelompokkan berdasarkan kategori level insiden energi *arc flash* yang dihasilkan. Selanjutnya menentukan jenis PPE (*Personal Protective Equipment*) atau APD (Alat Pelindung Diri) yang digunakan.

Jenis PPE (*Personal Protective Equipment*) yang harus digunakan berdasarkan kategori level insiden energi *arc flash* perhitungan standar IEEE 1584-2002 dapat dilihat pada Tabel 4.9.

**Tabel 4.9** Jenis PPE (*Personal Protective Equipment*) Kondisi *Resetting* Berdasarkan Standar IEEE 1584-2002

BUS ID	Insiden Energi (cal/cm <sup>2</sup> )	Kategori	Jenis PPE
BUS_20KV-1	3,851	Level 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Pakaian Tahan Busur Api Lengan Panjang</li> <li>➤ Celana Panjang</li> <li>➤ Pelindung Mata</li> <li>➤ Pelindung Kepala</li> <li>➤ Pelindung Telinga</li> <li>➤ Sarung Tangan</li> <li>➤ Sepatu Keselamatan</li> </ul>
BUS_20KV-1-1	1,66		
BUS_20KV-2	3,812		
BUS_20KV-2-1	1,64		
BUS_20KV-3	3,7		
BUS_20KV-4	3,67		
BUS_6KV-2	1,251		
BUS_0.38KV-1-1	2,2		
BUS_0.38KV-1-2	2,197		
BUS_0.38KV-1-3	2,197		
BUS_0.38KV-1-4	2,185		
BUS_0.38KV-2-1	2,2		
BUS_0.38KV-2-2	2,19		
BUS_0.38KV-2-3	2,2		
BUS_0.38KV-3-1	2,2		
BUS_0.38KV-3-2	2,19		
BUS_0.38KV-4-1	2,19		
BUS_0.38KV-4-2	2,19		

Sedangkan untuk jenis PPE (*Personal Protective Equipment*) yang harus digunakan berdasarkan kategori level insiden energi *arc flash* perhitungan modifikasi pada sistem kelistrikan PT. PJB UP Cirata dapat dilihat pada Tabel 4.10.

**Tabel 4.10** Jenis PPE (*Personal Protective Equipment*) Kondisi *Resetting* Berdasarkan Perhitungan Modifikasi

BUS ID	Insiden Energi (cal/cm <sup>2</sup> )	Kategori	Jenis PPE
BUS_20KV-1	3,2	Level 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Pakaian Tahan Busur Api Lengan Panjang</li> <li>➤ Celana Panjang</li> <li>➤ Pelindung Mata</li> <li>➤ Pelindung Kepala</li> <li>➤ Pelindung Telinga</li> <li>➤ Sarung Tangan</li> <li>➤ Sepatu Keselamatan</li> </ul>
BUS_20KV-1-1	1,56		
BUS_20KV-2	3,434		
BUS_20KV-2-1	1,6		
BUS_20KV-3	3,4		
BUS_20KV-4	3,37		
BUS_6KV-2	1,02		
BUS_0.38KV-1-1	2,105		
BUS_0.38KV-1-2	2,07		
BUS_0.38KV-1-3	2,1		
BUS_0.38KV-1-4	2,11		
BUS_0.38KV-2-1	2,11		
BUS_0.38KV-2-2	2,1		
BUS_0.38KV-2-3	2,1		
BUS_0.38KV-3-1	2,1		
BUS_0.38KV-3-2	2,1		
BUS_0.38KV-4-1	2,1		
BUS_0.38KV-4-2	2,1		

Berdasarkan Tabel 4.9 dan Tabel 4.10 dapat dilihat bahwa pada masing-masing metode, baik pada standar IEEE 1584-2002 maupun pada saat menggunakan metode modifikasi, didapatkan kategori level insiden energi *arc flash* yang sama yaitu level 1. Sehingga jenis PPE (*Personal Protective Equipment*) yang harus digunakan oleh pekerja adalah sama. Pada kategori level 1, sesuai standar NFPA 70-E 2015 jenis PPE yang harus digunakan adalah pakaian tahanapi, pelindung mata, pelindung telinga dan celana panjang.



## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisa terhadap nilai insiden energi *arc flash* serta koordinasi rele pengaman arus lebih pada PT PJB UP Cirata yang telah dilakukan, maka dapat diambil beberapa kesimpulan, yaitu:

1. Koordinasi proteksi terhadap sistem kelistrikan di PT PJB UP Cirata, terdapat pengaturan *gradding time* pada rele yang terlalu cepat, misalnya pada Rele R-89S1 dan rele R-252S1 yang memiliki selisih waktu 0,05 detik, serta pengaturan LT *pickup* LVCB yang memotong arus *start* misalnya pada CBH1 dan pengaturan *ST Band* yang sedikit lama yaitu 0,22 sehingga perlu diturunkan tanpa melampaui batas waktu antara 0,2 sampai 0,4 detik untuk mengurangi nilai insiden energi *arc flash* pada bus 0,38 kV.
2. Hasil simulasi nilai insiden energi *arc flash* pada kondisi eksisting di PT PJB UP Cirata menggunakan *software* ETAP berdasarkan standar IEEE 1584-2002, yaitu didapatkan nilai kategori level 1 ( $4 \text{ cal/cm}^2 \leq \text{level 1} < 8 \text{ cal/cm}^2$ ) untuk bus pada level tegangan 0,38 kV, 6 kV dan 20 kV.
3. Hasil simulasi nilai insiden energi *arc flash* pada kondisi *resetting*, yaitu berdasarkan standar IEEE 1584-2002 untuk bus pada level tegangan 0,38 kV serta Metode Lee untuk semua bus pada level tegangan 6 kV dan 20 kV, didapatkan nilai kategori 1 ( $4 \text{ cal/cm}^2 \leq \text{level 1} < 8 \text{ cal/cm}^2$ ). Kategori 1 merupakan kategori terkecil sesuai dengan standar NFPA 70-E 2015.
4. Perhitungan insiden energi *arc flash* menggunakan metode perhitungan modifikasi, yaitu mempertimbangkan waktu terjadinya gangguan hubung singkat berdasarkan *time domain* tiap *cycle*. Untuk waktu 0,5 *cycle* didapatkan  $\Delta t$  sebesar 0,035 detik, lalu pada saat 1,5 sampai 4 *cycle* didapatkan  $\Delta t$  sebesar 0,045 detik. Selanjutnya pada saat 30 *cycle*, nilai  $\Delta t$  disesuaikan dengan waktu pemutusan gangguan atau FCT (*Fault Clearing Time*) pada tiap bus, yaitu didapatkan  $\Delta t$  sebesar 0,272 detik untuk bus 20 kV, 0,77 detik untuk bus 6 kV dan 0,12 detik untuk bus 0,38 kV.
5. Perbandingan nilai insiden energi *arc flash* kondisi *resetting* antara metode standar IEE 1584-2002 dan metode perhitungan modifikasi,

didapatkan hasil yaitu nilai insiden energi *arc flash* dengan menggunakan metode modifikasi lebih kecil.

6. Sama halnya dengan hasil nilai insiden energi *arc flash*, pada metode perhitungan modifikasi didapatkan jarak aman atau FPB (*Flash Protective Boundary*) yang sedikit lebih kecil nilainya dari pada perhitungan dengan standar IEEE 1584-2002.
7. Secara keseluruhan, besar nilai insiden energi *arc flash* kondisi *resetting* di PT PJB UP Cirata berada pada kategori 1, artinya perlengkapan alat pelindung diri yang harus digunakan sesuai standar NFPA 70E-2015 yaitu pakaian lengan panjang dan celana panjang, pelindung wajah, jaket atau jas hujan yang tahan busur api. Serta peralatan keselamatan seperti kacamata keselamatan, pelindung kepala, pelindung pendengaran, sarung tangan dan sepatu keselamatan.

## 5.2 Saran

Berdasarkan hasil pertimbangan dari studi proteksi dengan mempertimbangkan *arc flash* yang dilakukan di PT PJB UP Cirata, maka ada beberapa saran yang dapat dijadikan masukan, yaitu sebagai berikut:

1. Untuk studi selanjutnya, dapat dilakukan analisa insiden energi *arc flash* pada bus 16,5 kV dengan penambahan rele diferensial.
2. Kalibrasi *gap* dan *work distance* pada masing-masing bus di sistem kelistrikan PT PJB UP Cirata agar sesuai dengan standar IEEE 1584-2002.
3. Pengaturan rele arus lebih yang didapat dari analisa dan hasil perhitungan pada tugas akhir ini, dapat dijadikan referensi untuk melakukan *setting* rele arus lebih pada kondisi sebenarnya.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. "Profile Company PT PJB UP Cirata", <URL: <https://www.ptpjb.com/artikel-71-unit-pembangkitan-cirata.htm>>, diakses pada 22 Oktober 2018.
- [2]. IEEE Std 1584-2002, "IEEE Guide for Performing Arc Flash Hazard Calculation", Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2002.
- [3]. Wu, Alex Y., "Modified Medium Voltage Arc Flash Incident Energy Calculation Method", IEEE Transaction on Industry Application, USA, 2008.
- [4]. NFPA 70E-2015, "Electrical Safety Requirements for Employee Workplaces", 2015.
- [5]. Stevenson, William D., "Elements of Power System Analysis 4th Edition", McGraw-Hill Inc., USA, 1983.
- [6]. Wahyudi, "Diktat Kuliah Sistem Pengaman Tenaga Listrik", Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2014.
- [7]. Penangsang, Ontoseno, "Diktat Kuliah Analisis Sistem Tenaga 2", Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2008.
- [8]. IEC Std 60909-2001, "Short-circuit Currents in Three-phase A.C. Systems", 2001.
- [9]. Paithankar, Y. G. dan S. R. Bhide, "Fundamentals of Power System Protection", Prentice-Hall, India, 2003.
- [10]. IEEE Std 242-2001<sup>TM</sup>, "IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems", Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 2002
- [11]. Blackburn, J. Lewis dan Thomas J. Domin, "Electrical Safety Code Manual", CRC Press, USA, 2007.
- [12]. Rao, Sunil S., "Switchgear Protection and Power Systems", Khanna Publisher, India, 2010.
- [13]. Jones, Ray A. dan Jane G. Jones, "Safety BASICS<sup>TM</sup> Handbook for Electrical Safety 2nd Edition", Cooper Busman, U.S.A, 2004.
- [14]. Keller, Kimberlay, "Electrical Safety Code Manual", Elsevier, Inc., USA, 2010.

*Halaman Ini Sengaja Dikosongkan*

## **LAMPIRAN**



## RIWAYAT HIDUP PENULIS



Agung Fauzi adalah seorang manusia sama seperti Anda yang sedang membaca ini. Lahir di Bandung, 10 Mei 1995 Masehi, berupa bayi dengan jenis kelamin laki-laki dari seorang ibu dengan jenis kelamin perempuan. Anak ke 3 dari 4 bersaudara. Tinggal di Bandung bersama orang tua dan orang lain yang biasa dikenal dengan sebutan tetangga. Sebelum melanjutkan pendidikan S1 di Teknik Elektro ITS, penulis pernah menempuh pendidikan Diploma III di Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, lebih jauh sebelum memulai semua itu, penulis harus membayar uang kuliah dan melengkapi syarat administrasi lainnya. Penulis hafal semua nama teman sekelasnya, tetapi tidak hafal semua presiden Kuba yang pernah menjabat, karena itu dirasa tidak perlu. Penulis bisa dihubungi melalui email [agungbaiq@gmail.com](mailto:agungbaiq@gmail.com).