



TUGAS AKHIR EE 184801

**ANALISA KOORDINASI PROTEKSI DENGAN
MEMPERTIMBANGKAN ARC FLASH PADA PT.
INDONESIA POWER UP SURALAYA UNIT 4**

Eka Maudyna Isdyanti
NRP 07111745000064

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Margo Pujiyantara, MT.
I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST. MT

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



FINAL PROJECT EE 184801

***ANALYSIS OF PROTECTION COORDINATION
WITH CONSIDERING ARC FLASH AT PT.
INDONESIA POWER UP SURALAYA UNIT 4***

Eka Maudyna Isdyanti
NRP 07111745000064

Advisor

Dr. Ir. Margo Pujiyantara, MT.
I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST. MT

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

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “***Analisa Koordinasi Proteksi dengan Mempertimbangkan Arc Flash pada PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4***” 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, Juli 2019



Eka Maudyna Isdyanti
NRP. 07111745000064

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

ANALISA KOORDINASI PROTEKSI DENGAN MEMPERTIMBANGKAN ARC FLASH PADA PT. INDONESIA POWER UP SURALAYA UNIT 4

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan

Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga

Departemen Teknik Elektro

Institut Teknologi Sepuluh Nopember



Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember



Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II



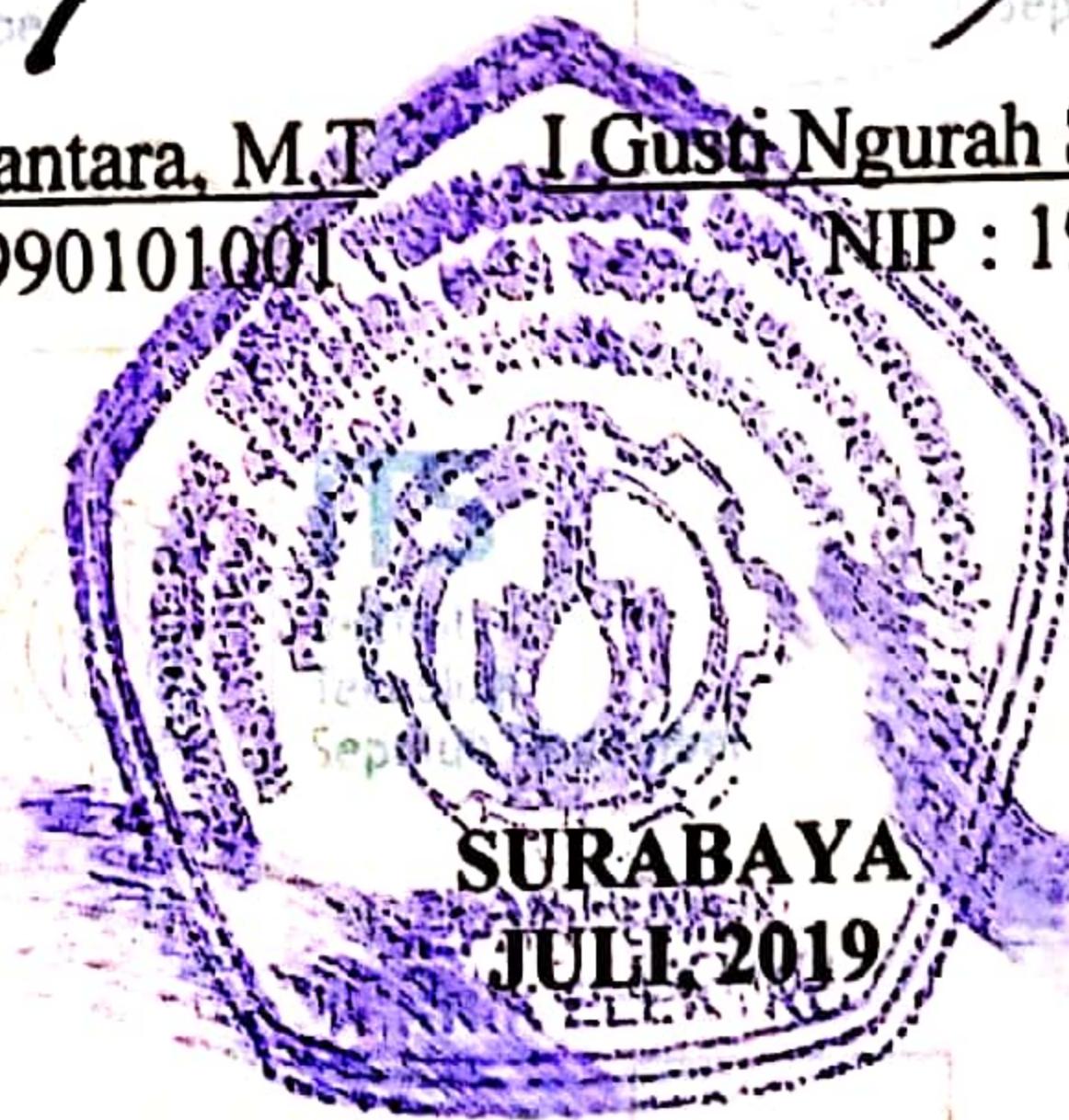
Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.

NIP: 196603181990101001



I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, S.T. M.T

NIP : 197301232002121001



Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

ANALISA KOORDINASI PROTEKSI DENGAN MEMPERTIMBANGKAN ARC FLASH PADA PT. INDONESIA POWER UP SURALAYA UNIT 4

Nama : Eka Maudyna Isdyanti
Pembimbing : Dr. Ir. Margo Pujiyantara, M.T.
I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, S.T. M.T

ABSTRAK

Dalam penyaluran tenaga listrik dengan jarak yang jauh akan mengalami bermacam gangguan yang akan mempengaruhi kontinuitas pelayanan tenaga listrik, sehingga dibutuhkan kehandalan sistem agar penyaluran tenaga listrik menjadi optimal. Dilihat dari beberapa penyebab gangguan sistem tenaga listrik, khususnya pada PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4, salah satunya yaitu gangguan arus lebih dibutuhkan koordinasi proteksi *over current relay* pada jaringan tegangan menengah dengan mempertimbangkan *arc flash* untuk mengamankan peralatan listrik pada jaringan tersebut. Lama waktu pemadaman busur api pada kondisi *existing* menyebabkan nilai insiden energi *arc flash* mencapai level 4, sehingga perlu dilakukan *resetting* hingga mencapai level 2 dan level 3.

Berdasarkan perhitungan insiden energi *arc flash* dapat dikembangkan menjadi metode modifikasi yang menghasilkan nilai insiden energi *arc flash* yang lebih rendah karena dipertimbangkan kontribusi arus hubung singkat dalam masing-masing periode dan waktu pemadaman busur api. Nilai insiden energi *arc flash* tersebut digunakan dalam perhitungan jarak aman bagi pekerja yaitu antara 12 m hingga 13 m untuk tegangan 6,3 kV dan 2,5 m hingga 3m untuk tegangan 0,38 kV dan dapat dikelompokkan ke dalam beberapa kategori sesuai standar NFPA 70 E tahun 2015. Pengelompokan kategori nilai insiden energi *arc flash* tersebut berfungsi dalam menentukan alat pelindung diri yang harus digunakan.

Kata Kunci : koordinasi proteksi, *over current relay*, *arc flash*.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

ANALYSIS OF PROTECTION COORDINATION WITH CONSIDERING ARC FLASH ON PT. INDONESIA POWER UP SURALAYA UNIT 4

Name : Eka Maudyna Isdyanti
Advisor : Dr. Ir. Margo Pujiyantara, M.T.
I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, S.T. M.T

ABSTRACT

In the distribution of electrical power with long distance, there will be a variety of disruption that will affect the continuity of electric power service, so that system reliability is needed so that the distribution of electric power becomes optimal. Several cause of the power system disruption , especially on PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4, one of the disruption is over current disruption, so over current relay (OCR) protection coordination with considering arc flash is needed to protect the electrical equipment on the medium voltage. The length time of arc flash extinguishing on existing condition cause incident energy value reach level 4, so it needs to be resetting until it reaches level 2and level 3

Based on arc flash energy calculations can be developed into a modification method that produces the incident energy value lower because it is considered the current contribution of each period and time in arc flash extinguishing. The value of arc flash incident energy is used in calculating safe distance for workers are between 12 m until 13 m for 6,3 kV and 2,5 m until 3 m for 0,38 kV and can be grouped into several categories according to the 2015th NFPA 70E standard. The categories of arc flash incident energy value is used in determining the personal protective equipment that must be used.

Keywords : protection coordination, over current relay, arc flash.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, atas berkat rahmat dan hidayah yang telah diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik.

Pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan rasa syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa dan terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua dan adik tercinta, yang dengan penuh kasih sayang, kesabaran dan pengertian yang tulus dan ikhlas membesarakan, mendoakan, dan mendidik serta tidak pernah berhenti memberikan dukungan baik riil maupun materiil kepada penulis
2. Seluruh dosen Teknik Elektro, khususnya konsentrasi Teknik Sistem Tenaga yang telah membimbing penulis dalam menuntut ilmu di Fakultas Teknologi Elektro, ITS.
3. Bapak Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT dan Bapak I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST. MT selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
4. Bapak Heru Setyo N selaku supervisor senior PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 1-4
5. Karyawan PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 1-4, khususnya departemen HAR Listrik 1-4, Pak Subkhan, Mas Burhan, Mas Syarif, Mas Rafi, Mas Anas, serta teman-teman D3 Teknik Elektro UNDIP, dan S1 Teknik Elektro UNTIRTA.
6. Chandra Nurrochman, yang tidak pernah bosan mendengar keluh kesahku dalam perjuangan menyelesaikan studi ini.
7. Untuk teman-teman lintas jalur Fakultas Teknologi Elektro 2017, khususnya konsentrasi Teknik Sistem Tenaga, dan teman-teman DUNANGES.
8. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan laoran proyek akhir ini, sehingga kritik dan saran dari semua pihak sangat diharapkan. Penulis berharap semoga penulisan laporan proyek akhir ini dapat memberikan manfaat bagi penulis sendiri serta kalangan civitas akademika lainnya.

Surabaya, Juli 2019

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN JUDUL	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	v
HALAMAN PENGESAHAN.....	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR.....	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan	3
1.5 Metodologi Penelitian	3
1.6 Sistematika Laporan.....	4
1.7 Relevansi	5
BAB 2 DASAR TEORI.....	7
2.1 Gangguan Sistem Tenaga Listrik	7
2.2 Karakteristik Arus Lebih [2]	8
2.3 <i>Ground Fault Relay</i>	10
2.4 Motor Protection Relay	10
2.5 <i>Arching Flash</i>	11
BAB 3 SISTEM KELISTRIKAN PT. INDONESIA POWER UP SURALAYA UNIT 4	21
3.1 Sistem Kelistrikan PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4	21
3.2 Beban-Beban pada PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4	22
BAB 4 SIMULASI DAN ANALISA ARC FLASH DI PT. INDONESIA POWER UP SURALAYA UNIT 4.....	25
4.1 Hasil Simulasi Insiden Energi <i>Arc Flash</i> Menggunakan Perangkat Lunak ETAP 12.6.0 (<i>Existing</i>).....	25
4.2 Koordinasi Relay Arus Lebih dan Relay Gangguan Tanah	29

4.3 Hasil Simulasi Insiden Energi <i>Arc Flash</i> Setelah Dilakukan <i>Resetting</i>	75
4.4 Perhitungan FPB Berdasarkan Hasil Perhitungan Insiden Energi <i>Arc Flash</i>	89
BAB 5 KESIMPULAN	101
5.1 Kesimpulan	101
5.2 Saran	102
DAFTAR PUSTAKA	103

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	(a) 3 fasa ; (b) 2 fasa; (c) 2 fasa ke tanah; (d) 1 fasa ke tanah	7
Gambar 2.2	Jaringan Sistem Tenaga Listrik	8
Gambar 3.1	Sistem Kelistrikan PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4.....	21
Gambar 4.1	<i>Single Line Diagram Case</i> Satu Tipikal Satu	30
Gambar 4.2	Kurva Koordinasi Arus Lebih <i>Case</i> Satu Tipikal Satu (<i>Existing</i>)	31
Gambar 4.3	Plot <i>Time Current Curve (TCC) Resetting Case</i> Satu Tipikal Satu 37	
Gambar 4.4	Kurva Koordinasi Ground Fault <i>Case</i> Satu Tipikal Satu (<i>Existing</i>)	38
Gambar 4.5	Plot <i>Time Current Curve (TCC) Resetting Ground Fault Case</i> Satu Tipikal Satu	41
Gambar 4.6	<i>Single Line Diagram Case</i> Satu Tipikal Dua.....	42
Gambar 4.7	Kurva Koordinasi Arus Lebih <i>Case</i> Satu Tipikal Dua (<i>Existing</i>)	43
Gambar 4.8	Plot <i>Time Current Curve (TCC) Resetting Case</i> Satu Tipikal Dua.....	48
Gambar 4.9	Kurva Koordinasi <i>Ground Fault Case</i> Satu Tipikal Dua (<i>Existing</i>)	49
Gambar 4.10	Plot <i>Time Current Curve (TCC) Ground Faut Resetting Case</i> Satu Tipikal Dua	51
Gambar 4.11	<i>Single Line Diagram Case</i> Satu Tipikal Tiga.....	52
Gambar 4.12	Kurva Koordinasi Arus Lebih <i>Case</i> Satu Tipikal Tiga (<i>Existing</i>)	53
Gambar 4.13	Plot <i>Time Current Curve (TCC) Resetting Case</i> Satu Tipikal Tiga	55
Gambar 4.14	Kurva Koordinasi <i>Ground Fault Case</i> Satu Tipikal Tiga (<i>Existing</i>)	56
Gambar 4.15	<i>Single Line Diagram Case</i> Dua Tipikal Satu.....	57
Gambar 4.16	Kurva Koordinasi Arus Lebih <i>Case</i> Dua Tipikal Satu (<i>Existing</i>)	58
Gambar 4.17	Plot <i>Time Current Curve (TCC) Resetting Case</i> Dua Tipikal Satu	62
Gambar 4.18	Kurva Koordinasi <i>Ground Fault Case</i> Dua Tipikal Satu (<i>Existing</i>)	63

Gambar 4.19 Plot <i>Time Current Curve</i> (TCC) <i>Resetting Ground Fault Case Dua Tipikal Satu</i>	65
Gambar 4.20 <i>Single Line Diagram Case Dua Tipikal Dua</i>	66
Gambar 4.21 Kurva Koordinasi Arus Lebih <i>Case Dua Tipikal Dua (Existing)</i>	67
Gambar 4.22 Kurva Koordinasi <i>Ground Fault Case Dua Tipikal Dua (Existing)</i>	68
Gambar 4.23 <i>Single Line Diagram Case Dua Tipikal Tiga</i>	69
Gambar 4.24 Kurva Koordinasi Arus Lebih <i>Case Dua Tipikal Tiga (Existing)</i>	70
Gambar 4.25 Kurva Koordinasi <i>Ground Fault Case Dua Tipikal Tiga (Existing)</i>	71

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Faktor α dan β tergantung pada kurva arus vs waktu	9
Tabel 2.2	<i>Operation Time Setting</i>	10
Tabel 2.3	Faktor untuk Peralatan dan Kelas Tegangan	14
Tabel 2.4	Faktor untuk Peralatan dan Kelas Tegangan (Lanjutan)	15
Tabel 2.5	Jarak Antar Konduktor	15
Tabel 2.6	Jarak Aman Pekerja.....	15
Tabel 2.7	Pengelompokan Domain Waktu Perhitungan Arc Flash Modifikasi	16
Tabel 2.8	Klasifikasi PPE berdasarkan NFPA 70E tahun 2015	18
Tabel 2.9	Klasifikasi PPE berdasarkan NFPA 70E tahun 2015 (Lanjutan)	19
Tabel 3.1	Data Generator	22
Tabel 3.2	Data Transformator	22
Tabel 3.3	Data Beban Motor 6,3 kV	23
Tabel 3.4	Data Beban Motor dan Lumped Load 0,38 kV	23
Tabel 3.5	Data Beban Motor dan Lumped Load 0,38 kV (Lanjutan)	24
Tabel 4.1	Hasil simulasi insiden energi pada sistem <i>existing</i> PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 <i>case 1</i> sebelum dipasang <i>isolating transformer</i>	25
Tabel 4.2	Hasil simulasi insiden energi pada sistem <i>existing</i> PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 <i>case 1</i> sebelum dipasang <i>isolating transformer</i> (Lanjutan)	26
Tabel 4.3	Hasil simulasi insiden energi pada sistem <i>existing</i> PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 <i>case 2</i> sebelum dipasang <i>isolating transformer</i>	26
Tabel 4.4	Hasil simulasi insiden energi pada sistem <i>existing</i> PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 <i>case 2</i> sebelum dipasang <i>isolating transformer</i> (Lanjutan)	27
Tabel 4.5	Hasil simulasi insiden energi pada sistem <i>existing</i> PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 <i>case 1</i> setelah dipasang <i>isolating transformer</i>	27
Tabel 4.6	Hasil simulasi insiden energi pada sistem <i>existing</i> PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 <i>case 1</i> setelah dipasang <i>isolating transformer</i> (Lanjutan)	28

Tabel 4.7	Hasil simulasi insiden energi pada sistem <i>existing</i> PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 <i>case 2</i> setelah dipasang <i>isolating transformer</i>	28
Tabel 4.8	Hasil simulasi insiden energi pada sistem <i>existing</i> PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 <i>case 2</i> setelah dipasang <i>isolating transformer</i> (Lanjutan)	29
Tabel 4.9	<i>Resetting Arus Lebih</i> pada Peralatan di PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4.....	72
Tabel 4.10	<i>Resetting Arus Lebih</i> pada Peralatan di PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 (Lanjutan)	73
Tabel 4.11	<i>Resetting Ground Fault</i> pada Peralatan di PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4.....	74
Tabel 4.12	<i>Resetting Ground Fault</i> pada Peralatan di PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 (Lanjutan)	75
Tabel 4.13	Nilai Insiden Energi <i>Case Satu</i> Setelah dilakukan <i>Resetting</i> Berdasarkan Simulasi ETAP 12.6.0	76
Tabel 4.14	Nilai Insiden Energi <i>Case Dua</i> Setelah dilakukan <i>Resetting</i> Berdasarkan Simulasi ETAP 12.6.0	76
Tabel 4.15	Nilai Insiden Energi <i>Case Dua</i> Setelah dilakukan <i>Resetting</i> Berdasarkan Simulasi ETAP 12.6.0 (Lanjutan)	77
Tabel 4.16	Perbandingan Perhitungan Nilai Insiden Energi <i>Arc Flash</i> sesuai Standar IEEE 1584-2002 dengan Metode Modifikasi pada <i>Case Satu</i>	88
Tabel 4.17	Perbandingan Perhitungan Nilai Insiden Energi <i>Arc Flash</i> sesuai Standar IEEE 1584-2002 dengan Metode Modifikasi pada <i>Case Dua</i>	88
Tabel 4.18	Perbandingan Perhitungan Nilai Insiden Energi <i>Arc Flash</i> sesuai Standar IEEE 1584-2002 dengan Metode Modifikasi pada <i>Case Dua</i> (Lanjutan)	89
Tabel 4.19	Perbandingan Nilai FPB Berdasarkan Standar IEEE 1584-2002 dan Metode Modifikasi pada <i>Case Satu</i>	95
Tabel 4.20	Perbandingan Nilai FPB Berdasarkan Standar IEEE 1584-2002 dan Metode Modifikasi pada <i>Case Dua</i>	96
Tabel 4.21	Jenis PPE yang harus digunakan berdasarkan nilai insiden energi sesuai perhitungan standar IEEE 1584-2002.....	97
Tabel 4.22	Jenis PPE yang harus digunakan berdasarkan nilai insiden energi sesuai perhitungan standar IEEE 1584-2002 (Lanjutan)	98

Tabel 4.23	Jenis PPE yang harus digunakan berdasarkan nilai insiden energi sesuai perhitungan modifikasi	98
Tabel 4.24	Jenis PPE yang harus digunakan berdasarkan nilai insiden energi sesuai perhitungan modifikasi (Lanjutan)	99
Tabel 4.25	Jenis PPE yang harus digunakan berdasarkan nilai insiden energi sesuai perhitungan modifikasi (Lanjutan)	100

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Listrik menjadi kebutuhan primer setiap manusia, terlihat dari hampir semua peralatan harus dioperasikan menggunakan listrik, sehingga kebutuhan listrik mengalami peningkatan. Pihak pemerintah melalui Perusahaan Listrik Negara (PLN) terus berupaya meningkatkan rasio elektrifikasi hingga mencapai 100 % sehingga dapat mengaliri listrik hingga ke pelosok daerah. Gangguan dari dalam sistem maupun dari luar sistem memungkinkan dapat terjadi dalam penyaluran tenaga listrik dengan jarak yang jauh. Gangguan dari dalam sistem biasanya terjadi karena adanya tegangan dan arus lebih, pemasangan yang kurang baik, kesalahan mekanis karena proses penuaan, beban lebih maupun kerusakan material. Gangguan mekanis karena pekerjaan galian saluran lain, pengaruh cuaca, maupun pengaruh lingkungan seperti pohon dan lain-lain menjadi penyebab gangguan dari luar sistem. Gangguan tersebut dapat bersifat temporer dan permanen. Kontinuitas pelayanan tenaga listrik dapat dipengaruhi oleh adanya gangguan tersebut, sehingga dibutuhkan kehandalan sistem agar penyaluran tenaga listrik dari pembangkit hingga konsumen menjadi optimal.

PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 merupakan sebuah BUMN yang menangani tentang pembangkitan tenaga listrik dan merupakan anak perusahaan dari PT. PLN (Persero). PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 ini terletak di kotamadya Cilegon dan memiliki kapasitas 400 MW. Ranah kerja dari PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 ini yaitu membangkitkan listrik dengan mengubah air yang dipanaskan dengan batu bara, dimana uap air hasil pemanasan tersebut digunakan untuk menggerakan turbin. Poros turbin tersebut dikopel dengan poros generator, sehingga ketika turbin bergerak, maka generator tersebut akan bekerja untuk membangkitkan listrik tersebut. PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 ini terinterkoneksi dengan pembangkit lain, sehingga listrik yang dihasilkan akan disalurkan untuk menerangi Pulau Jawa, Pulau Madura dan Bali. Mengingat besarnya kapasitas daya listrik yang dihasilkan terhadap bahaya *arc flash* yang mungkin terjadi, maka dari itu diperlukan suatu sistem proteksi untuk mengamankan perlatan yang ada. Sistem proteksi yang digunakan pada PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 meliputi proteksi *over speed*, *under speed*, *distance relay*, *over*

temperature, under voltage, over voltage, over current, under frequency, over frequency, dan lain-lain.

Dari banyaknya sistem proteksi yang digunakan, akan dibuat koordinasi proteksi salah satunya mengenai arus lebih (*over current*). Koordinasi proteksi arus lebih dengan mempertimbangkan *arc flash* ini bertujuan untuk mengamankan peralatan pembangkitan dari bahaya arus lebih. Pada koordinasi proteksi ini akan dilakukan simulasi menggunakan ETAP 12.6.0 untuk mengetahui apakah nilai *setting relay* yang diterapkan sudah tepat dan dapat melindungi dari bahaya *arc flash*. Lalu dihitung pula besar insiden energi, jarak aman dan menentukan PPE yang digunakan sesuai NFPA 70E tahun 2015.

1.2 Permasalahan

Berdasarkan latar belakang masalah yang telah dipaparkan sebelumnya, maka penulis dapat merumuskan masalah sebagai berikut :

1. Mensimulasikan *arc flash* pada kondisi *existing* PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4
2. Melakukan *resetting* koordinasi proteksi pada PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4
3. Mensimulasikan dan menghitung besar insiden energi *arc flash* setelah dilakukan *resetting* sesuai standar IEEE 1584-2002
4. Menghitung nilai insiden energi *arc flash* setelah dilakukan *resetting* dengan metode modifikasi perhitungan
5. Membandingkan nilai insiden energi *arc flash* sesuai standar IEEE 1584-2002 dan metode modifikasi
6. Menghitung dan membandingkan besar *Flash Protection Boundary* (FPB) berdasarkan perhitungan sesuai standar IEEE 1584-2002 dan metode modifikasi
7. Menentukan jenis PPE (*Personal Protective Equipment*) yang digunakan berdasarkan kategori *arc flash* sesuai standar NFPA 70 E tahun 2015.

1.3 Batasan Masalah

Mengingat luasnya materi dan terbatasnya alokasi waktu, maka pembahasan pada tugas akhir ini meliputi :

1. Pembahasan ini dikhkususkan pada perhitungan nilai *setting relay* pada tegangan 6,3 kV dan 0,38 kV
2. Relay yang digunakan yaitu *Over Current Relay Inverse* dan *Definite, Ground Fault Relay*

3. Konfigurasi saluran yang digunakan hanya pada unit 4.
4. Metode yang digunakan dalam perhitungan energi *arc flash* yaitu metode modifikasi perhitungan.
5. Penentuan PPE berdasarkan NFPA 70E tahun 2015.
6. Software yang digunakan yaitu ETAP 12.6.0

1.4 Tujuan

Tujuan dari penulisan tugas akhir dengan tema proteksi mempertimbangkan *arc flash* ini yaitu :

1. Untuk mengetahui besar insiden energi *arc flash* pada kondisi *existing* PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 berdasarkan hasil simulasi
2. Untuk mendapatkan nilai *resetting* koordinasi proteksi pada PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4
3. Untuk mengetahui besar insiden energi *arc flash* setelah dilakukan *resetting* sesuai standar IEEE 1584-2002 berdasarkan hasil simulasi dan perhitungan
4. Untuk mengetahui nilai insiden energi *arc flash* setelah dilakukan *resetting* dengan metode modifikasi perhitungan
5. Untuk membandingkan nilai insiden energi *arc flash* sesuai standar IEEE 1584-2002 dan metode modifikasi
6. Untuk mendapatkan besar *Flash Protection Boundary* (FPB) dan membandingkan besar *Flash Protection Boundary* sesuai standar IEEE 1584-2002 dan metode modifikasi
7. Untuk menentukan jenis PPE (*Personal Protective Equipment*) yang digunakan berdasarkan kategori *arc flash* sesuai standar NFPA 70 E tahun 2015.

1.5 Metodologi Penelitian

Metode yang digunakan dalam proses penggeraan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mempelajari jurnal-jurnal dan buku-buku yang berkaitan dengan tema tugas akhir ini meliputi analisa sistem tenaga, arus hubung singkat, koordinasi proteksi, dan perhitungan energi *arching flash*.

2. Pengumpulan Data

Pengumpulan data mengenai sistem proteksi terhadap bahaya *arching flash* dilakukan pada PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 guna dilakukan analisa.

3. Pemodelan Sistem

Data yang diperoleh dari PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 dimodelkan menggunakan *software* ETAP 12.6.0. Pemodelan yang dibuat mengenai sistem proteksi PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 dengan memasukkan data *rating* peralatan yang ada pada *software* ETAP 12.6.0

4. Simulasi

Permodelan sistem proteksi pada PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 dengan menggunakan *software* ETAP 12.6.0 diolah untuk mengetahui keadaan mula sistem proteksi, dan dilakukan *resetting* koordinasi apabila *setting* yang sudah ada belum terkoordinasi dengan baik.

5. Analisis Data

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan sebelumnya didapatkan *setting* koordinasi proteksi yang baru untuk dilakukan analisa dalam menentukan apakah *setting* koordinasi yang baru sudah dapat diterapkan.

6. Penyusunan Buku Tugas Akhir

Penyusunan buku dalam bentuk kesimpulan akhir dari rangkaian metodologi yang telah dilakukan.

1.6 Sistematika Laporan

Pembahasan tugas akhir ini dibagi menjadi lima bab yang saling berhubungan satu sama lain. Adapun sistematika penulisan tugas akhir sebagai berikut :

BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini berisikan tentang latar belakang penulis dalam pemilihan topik, permasalahan, batas masalah, tujuan, metodologi penelitian, sistematika laporan dan relevansi.

BAB 2 DASAR TEORI

Bab ini berisikan tentang sistem proteksi dan *arc flash*. Adapun pokok bahasan pada bab ini diantaranya yaitu gangguan pada sistem tenaga listrik, karakteristik arus lebih, *ground fault relay*,

motor *protection relay*, arching *flash*, *flash protection boundary*, dan *personal protective equipment*.

BAB 3 SISTEM KELISTRIKAN PT. INDONESIA POWER UP SURALAYA UNIT 4

Bab ini berisikan tentang sistem kelistrikan di PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4, spesifikasi data generator, data transformator dan data beban serta pembahasan metodologi dan simulasi menggunakan *software* ETAP 12.6.0

BAB IV SIMULASI DAN ANALISA ARC FLASH DI PT. INDONESIA POWER UP SURALAYA UNIT 4

Bab ini berisikan simulasi dan analisa mengenai sistem proteksi *over current* dan *ground fault* dengan memasukkan parameter *arc flash* dengan menggunakan *software* ETAP 12.6.0. Setelah disimulasikan akan dilakukan analisa dari hasil simulasi tersebut, dan dilakukan perhitungan *arching flash* meliputi besar insiden energi *arc flash*, *flash protection boundary*, dan *personal protective equipment*.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisikan kesimpulan dan saran dari pembahasan yang telah dibahas sebelumnya.

1.7 Relevansi

Berdasarkan tugas akhir dengan tema proteksi ini, penulis berharap tugas akhir ini dapat memberikan manfaat seperti

1. Dapat dijadikan acuan bagi PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 dalam sistem proteksi *over current* dengan mempertimbangkan *arc flash* agar sistem menjadi handal.
2. Dapat dijadikan sebagai referensi bagi civitas akademik lainnya yang akan mengambil penelitian dengan tema serupa.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

BAB 2

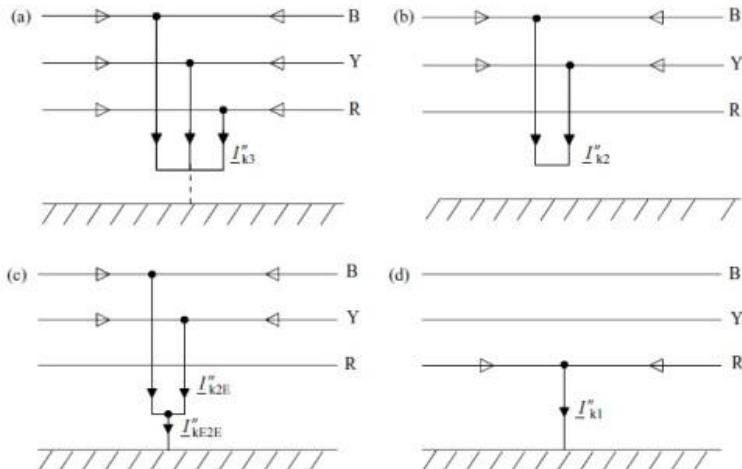
DASAR TEORI

2.1 Gangguan Sistem Tenaga Listrik

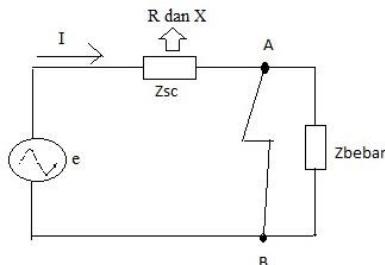
Menurut Marsudi, Djiteng (2006), kejadian yang menyebabkan bekerjanya relay dan mengakibatkan putusnya pemutus tenaga (PMT) sehingga aliran daya yang melalui PMT menjadi terputus disebut gangguan dalam sistem tenaga listrik. Gangguan dapat bersifat temporer dan permanen. Jika gangguan dapat hilang dengan sendirinya setelah PMT trip dan sistem dapat kembali normal setelah PMT dimasukkan kembali disebut gangguan temporer. Sedangkan jika gangguan dapat diatasi setelah penyebab ganggunannya dihilangkan seperti kerusakan peralatan dll disebut gangguan permanen [1]

2.1.1 Gangguan Hubung Singkat [2]

Menurut Sarimun, Wahyudi (2016), dalam sistem tenaga listrik akan terdapat gangguan yang disebabkan oleh petir, pepohonan, binatang atau tembusnya isolasi. Gangguan-gangguan tersebut meliputi gangguan antar fasa (gangguan tiga fasa dan gangguan dua fasa) maupun gangguan antar fasa dengan tanah seperti ditunjukkan dalam gambar 2.1.



Gambar 2.1 (a) 3 fasa ; (b) 2 fasa; (c) 2 fasa ke tanah; (d) 1 fasa ke tanah



Gambar 2.2 Jaringan Sistem Tenaga Listrik

Gambar 2.2 menunjukkan bahwa penyaluran tenaga listrik di dalam sistem tenaga listrik berasal dari sumber bolak-balik (AC) hingga beban. Sehingga impedansi hubung singkat (Z_{SC}) yang terjadi selama penyaluran tenaga listrik merupakan penjumlahan dari impedansi sumber dan impedansi jaringan, dimana masing-masing impedansi tersebut terdiri dari tahanan (R) dan reaktansi (X).

Ketika sistem tenaga listrik sudah terhubung dengan beban, maka seolah-olah terbentuk rangkaian *close loop* dan arus akan mengalir dari sumber menuju beban yang besarnya dipengaruhi oleh kapasitas dari beban itu sendiri (VA dan Watt). Dan dalam pengoperasiannya memungkinkan terjadinya gangguan hubung singkat antara titik A dan B yang menimbulkan arus hubung singkat di antara kedua titik tersebut yang nilainya melebihi arus pada kondisi normal. Arus hubung singkat tersebut dipengaruhi oleh kapasitas sumber, impedansi sumber, dan impedansi jaringan yang nantinya menjadi impedansi hubung singkat, dimana besarnya impedansi hubung singkat dapat dihitung melalui rumus dibawah ini [1] :

$$Z_{SC} = \sqrt{(R^2 + X^2)} \quad (2.1)$$

Dimana :

Z_{SC} = Impedansi hubung singkat (ohm, pu)

R = Tahanan sistem (ohm, pu)

X = Rektansi sistem (ohm, pu)

2.2 Karakteristik Arus Lebih [2]

Dalam buku *Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik* [2], Sarimun, Wahyudi, menyebutkan bahwa hubungan kerja antara besar arus dan waktu kerja relay berdasarkan standar IEC 60255-3 dan BS 142 1966 dibagi menjadi :

1. Instantaneous Relay (I>>)

Relay dengan karakteristik ini akan bekerja saat gangguan itu terjadi (tanpa waktu tunda) atau masih bekerja dengan waktu cepat sebesar 50 hingga 100 milidetik. Besarnya arus gangguan hubung singkat yang dipilih akan menentukan kapan relay akan bekerja. Karakteristik relay ini biasanya di set pada relay OCR dan GFR dan disebut juga setelan momen/instant/ cepat dalam sistem distribusi tegangan menengah. Setelan moment :

a) Setelan arus

$$\frac{1,6 \times \text{FLA}}{n_{CT}} < I_{\text{SET}} < \frac{0,8 \times I_{\text{SC MIN}}}{n_{CT}} \quad (2.2)$$

$$\frac{1,6 \times \text{FLA}}{n_{CT}} < \text{Tap} < \frac{0,8 \times I_{\text{SC MIN}}}{n_{CT}} \quad (2.3)$$

b) Setelan waktu (t) : 50 s/d 100 milidetik (untuk *outgoing*), bila *incoming feeder* setelan waktunya lebih besar dari setelan waktu *outgoing feeder*.

2. Definite Time Relay

Relay dengan karakteristik *definite* bekerja sesuai dengan setelan arus beban seperti pada *instantaneous*, dan waktu kerja relay dengan karakteristik *definite* lebih lama dibandingkan dengan karakteristik *instantaneous*.

3. Inverse Time Relay

Relay dengan karakteristik *inverse* akan memiliki waktu kerja yang berbanding terbalik dengan besaran arus yang terjadi, yang berarti semakin besar arus gangguan maka semakin kecil waktu yang dibutuhkan untuk pemutus tenaga (PMT) untuk memutus rangkaian. Karakteristik *inverse* sesuai IEC 60255-3 dan BS 142 1966 sebagai berikut :

$$t = \frac{\beta}{\left[\left(\frac{I_f}{I_{\text{set}}} \right)^{\alpha} - 1 \right]} T_{\text{ms}} \text{ (detik)} \quad (2.4)$$

$$T_{\text{ms}} = \frac{\left[\left(\frac{I_f}{I_{\text{set}}} \right)^{\alpha} - 1 \right]}{\beta} t \quad (2.5)$$

Tabel 2.1 Faktor α dan β tergantung pada kurva arus vs waktu

Nama Kurva	α	B
Standard Inverse	0,02	0,14
Very Inverse	1	13,5
Extremely Inverse	2	80
Long Inverse	1	120

Sedangkan, untuk *setting* arus pada kurva *inverse* yaitu

$$\frac{1,05 \times \text{FLA}}{n_{CT}} < I_{\text{SET}} < \frac{1,4 \times \text{FLA}}{n_{CT}} \quad (2.6)$$

$$\frac{1,05 \times \text{FLA}}{n_{CT}} < \text{Tap} < \frac{1,4 \times \text{FLA}}{n_{CT}} \quad (2.7)$$

2.3 Ground Fault Relay

Gangguan tanah merupakan gangguan yang paling sering terjadi, dan dideteksi oleh relay yang berbeda dari yang digunakan untuk gangguan fasa yaitu relay GFR (*Ground Fault Relay*). Ketika terjadi gangguan fasa tanah, arus gangguan tersebut disuplai oleh arus urutan nol yang berasal dari koneksi netral trafo tegangan tinggi yang nantinya akan menjadi sumber arus *ground fault* dan nilainya cenderung kecil [3]. Nilai *setting ground fault relay* yaitu

$$\frac{10\% \times I_{\text{SC L-G}}}{n_{CT}} < I_{\text{SET}} < \frac{50\% \times I_{\text{SC L-G}}}{n_{CT}} \quad (2.8)$$

$$\frac{10\% \times I_{\text{SC L-G}}}{n_{CT}} < \text{Tap} < \frac{50\% \times I_{\text{SC L-G}}}{n_{CT}} \quad (2.9)$$

2.4 Motor Protection Relay

Relay yang digunakan dalam perlindungan motor induksi pada tegangan 6,3 kV di PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 yaitu Mitsubishi CMP3-10-M3. Berdasarkan relay yang digunakan, terdapat empat aspek yang diperhatikan yaitu [4] :

a. Termal

Menurut Sarimun, Wahyudi (2016) *setting thermal* digunakan untuk mengetahui apakah beban dalam keadaan *overload* dan biasanya di atur tetap sebesar 1,05 pu relay mulai merasakan keadaan *overload* tersebut.

$$\text{Setting Arus } (I_{\text{TH}}) = 1,05 \times \text{FLA} \quad (2.10)$$

Dalam menentukan setting waktu, *range operating time setting to trip* yang dapat dipilih yaitu 4-8-15-30-60-120-240-480 sec

Tabel 2.2 *Operation Time Setting*

<i>Operation Time Setting</i>	4	8	15	30	60	120	240	480
K _{TH}	32	64	120	240	480	960	1920	3840

b. Acceleration

Acceleration adalah pengaturan untuk arus starting motor. Dalam plant ini, acceleration hanya diatur waktunya saja.

c. Instantaneous

Pengaturan tap pada *instantaneous* motor induksi berdasarkan arus thermalnya (I_{TH}).

$$\text{Tap yang dipilih} = I_{TH} \times SC-I \quad (2.11)$$

$$= I_M \times CT \text{ sekunder} \times SC-I \quad (2.12)$$

Dalam mengatur *operation time* untuk *instantaneous*, *range* yang dapat dipilih yaitu

Lock-Inst-0,1-0,15-0,2 sec

d. Ground

$$\text{Tap yang dipilih} = EF-I \times 100\% \quad (2.13)$$

Dalam mengatur *operation time* (EF-T) pada *ground* motor induksi, *range operation time* yang dapat dipilih yaitu

Lock-0,1-0,2-0,3-0,4-0,5-0,6-0,7-0,8-0,9 sec

2.5 Arching Flash

Menurut Wiley, John (2010), arus listrik yang terionisasi di udara dan melepaskan sejumlah besar energi berupa cahaya yang terpancar dan konveksi panas disebut busur listrik atau *arc flash*. Busur listrik atau *arc flash* yang terjadi akibat hubung singkat menjadi penyebab dari sebagian besar kerusakan listrik dan dapat membahayakan pekerja. Kondisi bahaya yang disebabkan oleh pelepasan energi dari busur listrik disebut bahaya busur listrik [6]. Busur listrik atau *arc flash* dapat terjadi karena adanya arus *arching* (*arching fault current/I_a*) dan arus *bolted* (*bolted fault current/I_{bf}*). Arus *arching* atau *arching fault current* adalah arus gangguan yang mengalir melalui udara diantara dua konduktor atau konduktor dengan tanah dan menciptakan plasma busur listrik. Sedangkan arus *bolted* atau *bolted fault current* adalah arus hubung singkat yang terjadi diantara dua konduktor karena perbedaan potensial dimana impedansi atau resistansi antara dua konduktor sama dengan nol [6]. Maka dari itu dalam mengatasi bahaya *arc flash*, perlu dihitung besar arus arching, insiden energi, *flash protection boundary* dan menentukan jenis *personal protective equipment* yang akan digunakan.

A. Arus Arching IEEE 1584-2002 [6]

Arus *arching* ini berlaku untuk tegangan >5-15 kV

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \lg I_{bf} \quad (2.14)$$

dimana :

$$\lg = \log_{10}$$

I_a = Arus arc (dalam kA)

I_{bf} = Arus *bolted* gangguan tiga fasa pada bus (rms simetris) (dalam kA)

Rumus (2.14) dapat dijabarkan menjadi :

$$\lg I_a - 0,983 \lg I_{bf} = 0,00402$$

$$\lg I_a - \lg I_{bf}^{0,983} = 0,00402$$

$$\lg \left(\frac{I_a}{I_{bf}^{0,983}} \right) = 0,00402$$

$$\left(\frac{I_a}{I_{bf}^{0,983}} \right) = 10^{0,00402}$$

$$\left(\frac{I_a}{I_{bf}^{0,983}} \right) = 1,00929$$

$$I_a = 1,00929 I_{bf}^{0,983} \quad (2.15)$$

Sedangkan untuk tegangan dibawah 1 kV rumus yang digunakan untuk mencari arus *arching* yaitu [7] :

$$\begin{aligned} \lg I_a &= K + 0,662 \lg I_{bf} + 0,0966 V + 0,000526G \\ &\quad + 0,5588V (\lg I_{bf}) - 0,00304 G (\lg I_{bf}) \end{aligned} \quad (2.16)$$

dimana :

$$\lg = \log_{10}$$

I_a = Arus *arching* (kA)

K = -0,153 untuk *open air arc*

= -0,097 untuk *arc* dalam panel

I_{bf} = Arus *bolted* gangguan tiga fasa pada bus (rms simetris) (dalam kA)

V = Tegangan sistem (kV)

G = Gap konduktor (lihat pada tabel 2.3)

Rumus (2.16) dapat dijabarkan menjadi :

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

$$\begin{aligned}
& \lg I_a - (0,662 + 0,5588V - 0,00304G) \lg I_{bf} \\
& \quad = K + 0,0966V + 0,000526G \\
\lg I_a - \lg I_{bf}^{(0,662+0,5588V-0,00304G)} &= K + 0,0966V + 0,000526G \\
\lg \left(\frac{I_a}{I_{bf}^{(0,662+0,5588V-0,00304G)}} \right) &= K + 0,0966V + 0,000526G \\
\left(\frac{I_a}{I_{bf}^{(0,662+0,5588V-0,00304G)}} \right) &= 10^{(K+0,0966V+0,000526G)} \\
I_a &= 10^{(K+0,0966V+0,000526G)} \times I_{bf}^{(0,662+0,5588V-0,00304G)} \quad (2.17)
\end{aligned}$$

B. Insiden Energi IEEE 1584-2002 [6]

Insiden energi yaitu jumlah energi pada permukaan yang dihasilkan selama busur listrik terjadi. Setelah didapatkan nilai arus arching, selanjutnya dapat dihitung nilai insiden energi normalisasi dengan rumus berikut :

$$\lg E_n = K_1 + K_2 + 1.081 \lg I_a + 0.0011 G \quad (2.18)$$

$$\lg E_n - 1.081 \lg I_a = K_1 + K_2 + 0.0011 G$$

$$\lg E_n - \lg I_a^{1.081} = K_1 + K_2 + 0.0011 G$$

$$\lg \left(\frac{E_n}{I_a^{1.081}} \right) = K_1 + K_2 + 0.0011 G$$

$$\left(\frac{E_n}{I_a^{1.081}} \right) = 10^{(K_1+K_2+0.0011G)}$$

$$E_n = I_a^{1.081} 10^{(K_1+K_2+0.0011G)} \quad (2.19)$$

dimana :

E_n = Insiden energi normalisasi (dalam kalori per sentimeter persegi)

K_1 = -0,792 untuk konfigurasi peralatan terbuka

= -0,555 untuk konfigurasi perlatan tertutup (dengan kotak)

K_2 = 0 untuk sistem *unrounded* atau *high-resistance grounded*

= -0,113 untuk sistem *ground*

G = Gap antara konduktor (dalam milimeter)

Setelah didapatkan besar insiden energi normalisasi, maka selanjutnya dapat dihitung besar insiden energi dengan memasukkan parameter faktor perhitungan, waktu *arching* dalam membersihkan gangguan, dan jarak dari titik *arc* terhadap pekerja menggunakan rumus dibawah ini :

$$E = C_f E_n \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610}{D}\right)^x \quad (2.20)$$

$$E = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610}{D}\right)^x \quad (2.21)$$

Persamaan (2.20) menggunakan standar CGS dalam cal/cm², sedangkan untuk mengubah ke standar SI dalam J/cm² maka dikali dengan faktor pengali 4,184. Dengan mensubstitusikan persamaan (2.15) dan (2.19) maka besarnya nilai insiden energi untuk tegangan menengah dapat ditunjukkan dalam persamaan (2.22) sebagai berikut

$$E = C_f (1,00929 I_{bf}^{0,983})^{1,081} 10^{(K_1+K_2+0,0011G)} \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610}{D}\right)^x \quad (2.22)$$

Sedangkan, besarnya nilai insiden energi untuk tegangan rendah didapat dengan mensubstitusikan persamaan (2.17) dan (2.19) yaitu

$$E = C_f (10^{(K+0,0966 V+0,000526G)} \times I_{bf}^{(0,662+0,5588V-0,00304G)})^{1,081} \\ \times 10^{(K_1+K_2+0,0011G)} \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610}{D}\right)^x \quad (2.23)$$

dimana :

- E = Insiden energi (dalam kalori per sentimeter persegi)
- C_f = faktor perhitungan bernilai 1,0 untuk tegangan diatas 1 kV
= faktor perhitungan bernilai 1,5 untuk tegangan pada atau dibawah 1 kV
- T = Waktu arc (dalam detik) untuk peralatan proteksi untuk membersihkan gangguan
- D = Jarak dari titik arc ke orang, yaitu jarak pekerja (dalam milimeter)
- X = Jarak eksponen, dapat dilihat pada tabel 2.3 dan 2.4

Tabel 2.3 Faktor untuk Peralatan dan Kelas Tegangan

Tegangan Sistem	Jenis Peralatan	Jenis Gap antara Konduktor (mm)	Faktor x Jarak
0,208-1	Open Air	10-40	2,000
	Switchgear	32	1,473
	MCC and panels	25	1,641
	Cable	13	2,000
>1-5	Open Air	13-102	2,000
	Switchgear	13-102	0,973
	Cable	13	2,000

Tabel 2.4 Faktor untuk Peralatan dan Kelas Tegangan (Lanjutan)

Tegangan Sistem	Jenis Peralatan	Jenis Gap antara Konduktor (mm)	Faktor x Jarak
>5-15	<i>Open Air</i>	13-153	2,000
	<i>Switchgear</i>	153	0,973
	<i>Cable</i>	13	2,000

Berdasarkan IEEE 1584-2002, klasifikasi jarak antar konduktor (*gap*) dan jarak aman bagi pekerja dibagi berdasarkan jenis peralatan, ditunjukkan pada tabel 2.5 dan tabel 2.6.

Tabel 2.5 Jarak Antar Konduktor

Kelas Peralatan	Jarak Antar Konduktor (mm)
15 kV switchgear	152
5 kV switchgear	104
Low-voltage switchgear	32
Low-voltage MCCs and panelboards	25
Cable	13
Other	<i>Not required</i>

Tabel 2.6 Jarak Aman Pekerja

Kelas Peralatan	Jarak Aman Pekerja (mm)
15 kV switchgear	910
5 kV switchgear	910
Low-voltage switchgear	610
Low-voltage MCCs and panelboards	455
Cable	455
Other	<i>To be determined in field</i>

C. Insiden Energi Modifikasi [7]

Perhitungan insiden energi dengan metode modifikasi merupakan pengembangan dari perhitungan insiden energi berdasarkan IEEE 1584-2002. Berkurangannya arus gangguan tiga fasa dan waktu pemutusan masing-masing *circuit breaker* dalam menghilangkan gangguan juga dipertimbangkan dalam metode modifikasi.

Dalam perhitungannya terdapat pengelompokan domain waktu yang akan ditunjukkan dalam tabel 2.6 berdasarkan konstanta waktu tipikal mesin berputar untuk fase peralihan hubung singkat tertentu.

Tabel 2.7 Pengelompokan Domain Waktu Perhitungan Arc Flash Modifikasi

Domain Waktu	Fase Peralihan	Komponen yang Menyumbang Arus Hubung Singkat
0-0,035	<i>Subtransient</i>	<i>Utility</i> , mesin sinkron, motor induksi >1000HP, motor induksi 50-1000HP, motor induksi <50 HP
0,035-0,08	<i>Transient</i>	<i>Utility</i> , mesin sinkron, motor induksi >1000HP, motor induksi 50-1000HP
0,08-0,8	<i>Transient</i>	<i>Utility</i> , mesin sinkron, motor induksi >1000HP
0,8-t (Arc clearing time)	<i>Steady State</i>	<i>Utility</i> , generator sinkron

Sehingga, perhitungan insiden energi dengan metode modifikasi menjadi penjumlahan besar insiden energi dari setiap domain waktu, ditunjukkan dalam persamaan (2.24) :

$$E_{total} = E_0 \text{ detik} + E_{0,0035 \text{ detik}} + E_{0,067 \text{ detik}} + E_{0,8 \text{ detik}} + E_{0,83 \text{ detik}} + E_t \text{ detik} \quad (2.24)$$

D. Flash Protection Boundary [6]

Batas jarak pendekatan terhadap bagian yang tidak terinsulasi dimana dapat menyebabkan luka bakar bagi seseorang di sekitarnya disebut *Flash Protection Boundary* [6]. Maka, besarnya *flash protection boundary* berdasarkan standar IEEE 1584-2002 harus dihitung agar dapat mengetahui besar jarak aman peralatan bertegangan terhadap pekerja ditunjukkan dalam persamaan (2.25) :

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (2.25)$$

dimana :

D_B = Jarak batas aman terhadap titik *arching* (mm)

C_f = faktor perhitungan bernilai 1,0 untuk tegangan diatas 1 kV

	= faktor perhitungan bernilai 1,5 untuk tegangan pada atau dibawah 1 kV
E_n	= Insiden energi (dalam kalori per sentimeter persegi) normalisasi untuk waktu dan jarak
E_B	= Insiden energy dalam J/cm^2 pada jarak batas aman. Dapat di atur pada nilai $5 J/cm^2$
t	= Waktu arc (dalam detik) untuk peralatan proteksi untuk membersihkan gangguan
x	= Jarak eksponen, dapat dilihat pada tabel 2
I_{bf}	= Arus <i>bolted</i> gangguan tiga fasa (rms simetri) (dalam kiloamperes)

Menurut Wiley, John (2010) dalam *Handbook of International Electrical Safety Practices* menyebutkan bahwa ada beberapa hal penting dalam memahami perlindungan terhadap bahaya *arc flash* yaitu

a) *Limited Approach Boundary*

Yaitu batas pendekatan pada jarak dari konduktor bertegangan dimana terdapat bahaya sengatan listrik. *Limited approach boundary* dapat dihitung dari nilai *flash protection boundary* berdasarkan standar IEEE 1584-2002.

b) *Restricted Approach Boundary*

Yaitu batas pendekatan pada jarak dari konduktor bertegangan dimana terdapat peningkatan risiko terkena sengatan listrik, karena busur listrik dikombinasikan dengan gerakan yang tidak disengaja untuk pekerja di dekat bagian bertegangan.

c) *Prohibited Approach Boundary*

Yaitu batas pendekatan pada jarak dari konduktor bertegangan dimana pekerja dianggap sama dengan melakukan kontak langsung dengan konduktor bertegangan

E. Personal Protective Equipment [8]

Besar insiden energi yang telah dihitung berdasarkan standar IEEE 1584-2002 atau berdasarkan modifikasi perhitungan tersebut diklasifikasikan sesuai standar NFPA 70E tahun 2015 untuk menentukan alat pelindung diri atau PPE yang digunakan. Dan alat pelindung diri yang harus digunakan untuk melindungi pekerja dari kemungkinan bahaya yang ada disebut *Personal Protective Equipment* [5].

Tabel 2.8 Klasifikasi PPE berdasarkan NFPA 70E tahun 2015

Kategori	Nilai Insiden Energi (cal/cm ²)	PPE yang digunakan
1	4 - 7,999	<ol style="list-style-type: none"> 1. Kemeja lengan panjang dan celana tahan api 2. Pelindung wajah yang membungkus wajah, dahi, telinga, leher atau <i>arc flash suit hood</i> harus dikenakan 3. Jaket tahan api 4. Helm <i>safety</i> 5. Kacamata <i>safety</i> 6. Pelindung pendengaran (sisipan saluran telinga) 7. Sarung tangan kulit. Jika sarung tangan isolasi karet dengan pelindung kulit digunakan, tidak perlu tambahan sarung tangan kulit atau sarung tangan tahan api 8. Sepatu kulit
2	8 – 24,999	<ol style="list-style-type: none"> 1. Kemeja lengan panjang dan celana tahan api 2. <i>Flash suit hood</i> atau pelindung wajah, dahi, telinga, leher dan <i>balaclava</i> tahan api 3. Jaket tahan api 4. Helm <i>safety</i> 5. Kacamata <i>safety</i> 6. Pelindung pendengaran (sisipan saluran telinga) 7. Sarung tangan kulit. Jika sarung tangan isolasi karet dengan pelindung kulit digunakan, tidak perlu tambahan sarung tangan kulit atau sarung tangan tahan api 8. Sepatu Kulit

Tabel 2.9 Klasifikasi PPE berdasarkan NFPA 70E tahun 2015 (Lanjutan)

Kategori	Nilai Insiden Energi (cal/cm ²)	PPE yang digunakan
3	25 – 39,999	<ol style="list-style-type: none"> 1. Kemeja lengan panjang dan celana tahan api 2. Pelindung wajah dan tubuh yang membungkus wajah, dahi, telinga, leher atau <i>arc flash suit hood</i> harus dikenakan 3. Jaket tahan busur api 4. Sarung tangan tahan api 5. Helm <i>safety</i> 6. Kacamata <i>safety</i> 7. Pelindung pendengaran (sisipan saluran telinga) 8. Sepatu kulit
4	≥ 40	<ol style="list-style-type: none"> 1. Kemeja lengan panjang dan celana tahan api 2. Pelindung wajah dan tubuh yang membungkus wajah, dahi, telinga, leher atau <i>arc flash suit hood</i> harus dikenakan 3. Jaket tahan api 4. Sarung tangan tahan api 5. Helm <i>safety</i> 6. Kacamata <i>safety</i> 7. Pelindung pendengaran (sisipan saluran telinga) 8. Sepatu kulit

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

BAB 3

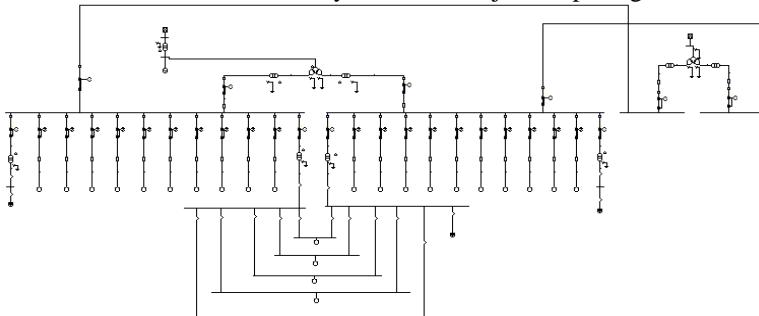
SISTEM KELISTRIKAN

PT. INDONESIA POWER UP SURALAYA UNIT 4

PT. Indonesia Power UP Suralaya merupakan salah satu anak perusahaan PT. PLN (Persero) yang bergerak di bidang pembangkitan tenaga listrik tenaga uap dengan kapasitas total 3400 MW dan terinterkoneksi dengan sistem kelistrikan Jawa-Madura-Bali melalui Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500 kV. PT. Indonesia Power UP Suralaya terdiri dari tujuh unit dimana unit satu hingga empat menghasilkan 4×400 MW dan unit lima hingga tujuh menghasilkan 3×600 MW. PT. Indonesia Power UP Suralaya ini merupakan PLTU terbesar di ASEAN yang berlokasi di kotamadya Cilegon, Banten.

3.1 Sistem Kelistrikan PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4

Sistem kelistrikan PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 ini berfungsi dalam pengoperasian mesin-mesin listrik dan operasional yang lain yang digunakan dalam pembangkitan tenaga listrik sebesar 400 MW. Pentingnya peran PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 ini terhadap kelistrikan Jawa-Madura-Bali mengharuskan sistem kelistrikan pada unit ini terjaga keandalannya agar dapat menghasilkan listrik secara kontinyu. Gangguan yang terjadi selama pembangkitan tenaga listrik, dan besar *arc flash* yang mungkin terjadi dapat mempengaruhi keandalan dan kontinuitas pelayanan tenaga listrik, sehingga dibutuhkan analisa terhadap sistem kelistrikan pada unit ini. Adapun *single line diagram* dari PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 ditunjukkan pada gambar 3.1



Gambar 3.1 Sistem Kelistrikan PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4

Pada pemakaian sendiri dari unit empat ini memiliki dua buah *Supply Station Transformer* (SST) yang berasal dari saluran transmisi 150 kV diturunkan menggunakan transformator *step down* menjadi 6,3 kV dan digunakan ketika generator belum menghasilkan energi listrik. Dua buah *Supply Station Transformer* ini tidak digunakan keduanya, melainkan satu SST sebagai *standby*. Setelah diturunkan menjadi 6,3 kV selanjutnya disalurkan melalui *start up bus* menuju *board A* dan *board B* dari *Unit Station Transformer* (UST) sehingga generator dapat beroperasi dan menghasilkan energi listrik sendiri. Data generator unit empat akan ditunjukkan pada tabel 3.1

Tabel 3.1 Data Generator

No.	ID Generator	MVA	MW	kV	PF (%)
1.	Generator 4	471	400,35	23	85

Setelah generator sudah dapat menghasilkan energi listrik sendiri, suplai dari SST akan terlepas dan energi listrik yang dihasilkan oleh generator tersebut disalurkan ke saluran transmisi 500 kV melalui Generator Transformer, dan disalurkan juga ke transformator UST untuk pemakaian sendiri dari unit empat. Unit empat sendiri terdiri dari beban-beban motor listrik yang beroperasi pada tegangan menengah 6,3 kV dan tegangan rendah 0,38 kV. Data transformator akan ditunjukkan pada tabel 3.2

Tabel 3.2 Data Transformator

No.	ID Transformator	Tegangan (kV)	Kapasitas Daya (MVA)
1.	Generator Transformer	23/500	470
2.	Trafo UST	23/6,3/6,3	46
3.	Trafo SST	150/6,3/6,3	46
4.	Trafo Aux 4A	6,3/0,38	1,6
5.	Trafo Aux 4B	6,3/0,38	1,6
6.	Trafo Precipitator 4A	6,3/0,38	1,6
7.	Trafo Precipitator 4B	6,3/0,38	1,6

3.2 Beban-Beban pada PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4

Beban-beban yang ada pada PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 bekerja pada tegangan operasi 6,3 kV dan 0,38 kV. Beban-beban

tersebut terdiri dari motor induksi tiga fasa pada tegangan 6,3 kV seperti *pulverizer* (MILL), *boiler feed pump* (BFP), *gas recirculation fan* (GRF), *forced draft fan* (FDF), *primary air fan* (PAF), *condensate pump* (CP), *circulating water pump* (CWP), *induced draft fan* (IDF). Dan beban-beban yang bekerja pada tegangan 0,38 kV berupa *lumped load* seperti *electrostatic precipitator*, *Essential Service Board 4* (ESB 4) dan UST & CT Power Centre 4 dan berupa motor induksi tiga fasa seperti Turbine MCC dan Boiler MCC. Data beban motor dan *lumped load* akan ditunjukkan pada tabel 3.3

Tabel 3.3 Data Beban Motor 6,3 kV

No.	ID Unit	Rating (kW)	FLA
1.	Pulverizer 4A	522	68
2.	Pulverizer 4B	522	68
3.	Boiler Feed Pump 4A	6383	702
4.	Boiler Feed Pump 4B	6383	702
5.	Gas Recirculation Fan 4A	580	70
6.	Gas Recirculation Fan 4B	580	70
7.	Forced Draft Fan 4A	1150	144
8.	Primary Air Fan 4A	1200	140
9.	Condensate Pump 4A	630	70
10.	Circulating Water Pump H	1500	220
11.	Circulating Water Pump I	1500	220
12.	Condensate Pump 4B	630	70
13.	Primary Air Fan 4B	1200	140
14.	Forced Draft Fan 4B	1150	140
15.	Induced Draft Fan 4A	2260	268
16.	Induced Draft Fan 4B	2260	268
17.	Boiler Feed Pump 4C	6383	702
18.	Pulverizer 4C	522	68
19.	Pulverizer 4D	522	68
20.	Pulverizer 4E	522	68

Tabel 3.4 Data Beban Motor dan Lumped Load 0,38 kV

No.	ID Unit	Rating (kW)	FLA
1.	Electrostatic Precipitator 4A	816	1459

Tabel 3.5 Data Beban Motor dan Lumped Load 0,38 kV (Lanjutan)

No.	ID Unit	Rating (kW)	FLA
2.	Electrostatic Precipitator 4B	816	1459
3.	Essential Service Board 4	425	759,7
4.	UST & CT Power Centre 4	170	303,9
5.	Boiler MCC 4A	604	1064
6.	Boiler MCC 4B	517	912,1
7.	Turbine MCC 4A	430	760
8.	Turbine MCC 4B	343	607,6

BAB 4

SIMULASI DAN ANALISA *ARC FLASH*

DI PT. INDONESIA POWER UP SURALAYA UNIT 4

4.1 Hasil Simulasi Insiden Energi *Arc Flash* Menggunakan Perangkat Lunak ETAP 12.6.0 (*Existing*)

Nilai arus hubung singkat pada kondisi *existing* dari PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 melebihi *breaking capacity* dari *circuit breaker* yang terpasang yaitu 40 kA, sehingga ketika mensimulasikan *arc flash*, nilai arus *arching* dan arus *bolted* menjadi diatas 40 kA. Maka dari itu, perlu dipasang *isolating transformer* yang digunakan untuk meredam arus hubung singkat yang terjadi. Dalam simulasi *arc flash* yang dilakukan pada PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 ini dilakukan menggunakan simulasi ETAP 12.6.0. Simulasi *arc flash* ini dilakukan pada tegangan 6,3 kV dan tegangan 0,38 kV dibagi dalam 2 *case* yaitu *case 1* ketika *Unit Station Transformer on* dan *Supply Station Transformer off* dan *case 2* ketika *Unit Station Transformer off* dan *Supply Station Transformer on..*. Pada *case 1* bus yang akan disimulasikan *arc flash* yaitu bus UST A, bus UST B, bus EP 4A, bus EP 4B, bus Aux 4A dan bus Aux 4B. Dan bus yang akan disimulasikan *arc flash* pada *case 2* yaitu bus UST A, bus UST B, bus SST A, bus SST B, bus EP 4A, bus EP 4B, bus Aux 4A dan bus Aux 4B. Berdasarkan simulasi *arc flash* tersebut ditampilkan nilai arus *arching*, arus *bolted*, *arching flash boundary* (AFB), nilai insiden energi dan FCT (*fault clearing time*). Dan nilai *working distance* pada tegangan 6,3 kV yaitu sebesar 91,44 cm. Sedangkan nilai *working distance* pada tegangan 0,38 kV yaitu 45,72 cm. Berikut akan ditunjukkan hasil simulasi insiden energi pada sistem *existing* PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 sebelum dipasang *isolating transformer* pada tabel 4.1 hingga tabel 4.4

Tabel 4.1 Hasil simulasi insiden energi pada sistem *existing* PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 *case 1* sebelum dipasang *isolating transformer*

Bus ID	Arus <i>arching</i> (kA)	Arus <i>bolted</i> (kA)	AFB	Insiden Energi (cal/cm ²)	FCT (s)	Kategori
Bus UST A	52,57	55,77	40,7	48,21	0,481	Level 4

Tabel 4.2 Hasil simulasi insiden energi pada sistem *existing* PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 *case 1* sebelum dipasang *isolating transformer* (Lanjutan)

Bus ID	Arus arching (kA)	Arus bolted (kA)	AFB	Insiden Energi (cal/cm ²)	FCT (s)	Kategori
Bus UST B	52,56	55,76	155,22	177,37	1,768	Level 4
Bus EP 4A	14,97	41,64	6,55	94,67	1,844	Level 4
Bus EP 4B	14,97	41,64	7,32	113,61	2,212	Level 4
Bus Aux 4A	16,37	46,56	7,99	131,27	2,321	Level 4
Bus Aux 4B	16,71	47,78	8,13	135,05	2,335	Level 4

Tabel 4.3 Hasil simulasi insiden energi pada sistem *existing* PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 *case 2* sebelum dipasang *isolating transformer*

Bus ID	Arus arching (kA)	Arus bolted (kA)	AFB	Insiden Energi (cal/cm ²)	FCT (s)	Kategori
Bus UST A	52,1	55,27	4,01	5,06	0,066	Level 1
Bus UST B	52,12	55,29	4,01	5,06	0,066	Level 1
Bus SST A	52,1	55,27	4,01	5,06	0,066	Level 1

Tabel 4.4 Hasil simulasi insiden energi pada sistem *existing* PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 *case 2* sebelum dipasang *isolating transformer* (Lanjutan)

Bus ID	Arus arching (kA)	Arus bolted (kA)	AFB	Insiden Energi (cal/cm ²)	FCT (s)	Kategori
Bus SST B	52,12	55,29	4,01	5,06	0,066	Level 1
Bus EP 4A	14,96	41,62	6,55	94,7	1,845	Level 4
Bus EP 4B	14,94	41,55	7,33	113,83	2,221	Level 4
Bus Aux 4A	16,37	46,56	7,99	131,27	2,321	Level 4
Bus Aux 4B	16,71	47,78	8,13	135,04	2,335	Level 4

Setelah dipasang *isolating transformer* nilai arus hubung singkatnya menjadi lebih kecil sehingga *breaking capacity circuit breaker* masih dapat bekerja. Berikut akan ditunjukkan hasil insiden energi pada sistem *existing* PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 setelah dipasang *isolating transformer* pada tabel 4.5 hingga tabel 4.8

Tabel 4.5 Hasil simulasi insiden energi pada sistem *existing* PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 *case 1* setelah dipasang *isolating transformer*

Bus ID	Arus arching (kA)	Arus bolted (kA)	AFB	Insiden Energi (cal/cm ²)	FCT (s)	Kategori
Bus UST A	25,81	27,05	47,93	56,53	1,216	Level 4

Tabel 4.6 Hasil simulasi insiden energi pada sistem *existing* PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 *case 1* setelah dipasang *isolating transformer* (Lanjutan)

Bus ID	Arus arching (kA)	Arus bolted (kA)	AFB	Insiden Energi (cal/cm ²)	FCT (s)	Kategori
Bus UST B	25,81	27,04	47,91	56,51	1,216	Level 4
Bus EP 4A	14,55	40,19	6,68	97,94	1,966	Level 4
Bus EP 4B	14,55	40,19	7,47	117,53	2,359	Level 4
Bus Aux 4A	15,92	44,98	8,2	137,04	2,497	Level 4
Bus Aux 4B	16,28	46,27	8,34	140,86	2,504	Level 4

Tabel 4.7 Hasil simulasi insiden energi pada sistem *existing* PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 *case 2* setelah dipasang *isolating transformer*

Bus ID	Arus arching (kA)	Arus bolted (kA)	AFB	Insiden Energi (cal/cm ²)	FCT (s)	Kategori
Bus UST A	25,17	26,36	31,24	37,28	0,824	Level 3
Bus UST B	25,19	26,39	31,27	37,32	0,824	Level 3
Bus SST A	25,17	26,36	56,87	66,77	1,476	Level 4

Tabel 4.8 Hasil simulasi insiden energi pada sistem *existing* PT. Indonesia Power UP Surabaya Unit 4 *case 2* setelah dipasang *isolating transformer* (Lanjutan)

Bus ID	Arus arching (kA)	Arus bolted (kA)	AFB	Insiden Energi (cal/cm ²)	FCT (s)	Kategori
Bus SST B	25,19	26,39	56,93	66,84	1,476	Level 4
Bus EP 4A	14,53	40,12	6,69	98,1	1,972	Level 4
Bus EP 4B	14,49	39,98	7,49	118,12	2,382	Level 4
Bus Aux 4A	15,92	44,98	8,2	137,04	2,497	Level 4
Bus Aux 4B	16,28	46,27	8,34	140,85	2,504	Level 4

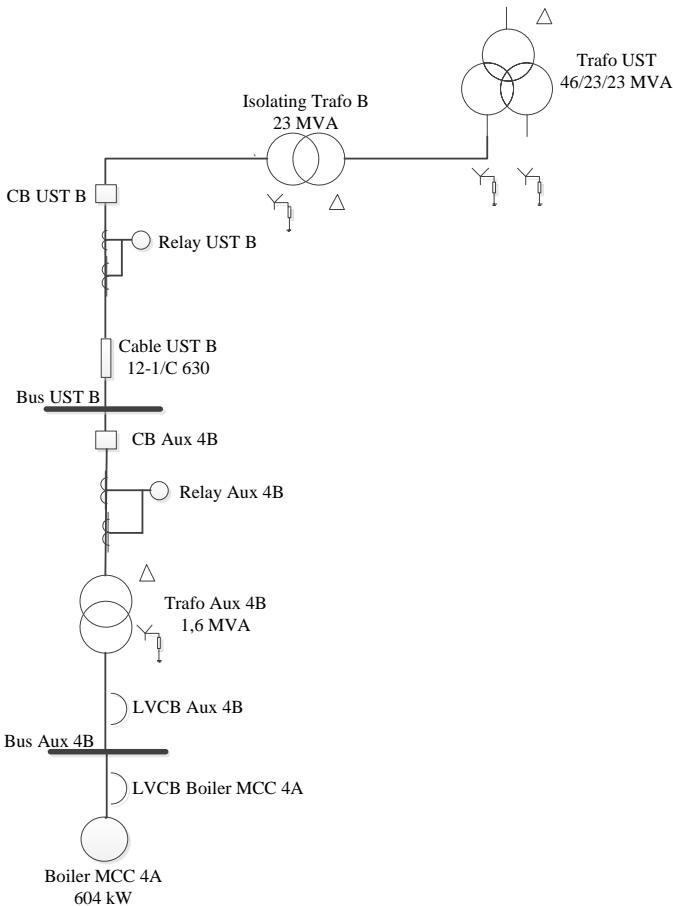
Kondisi *existing* yang digunakan dalam koordinasi arus lebih yaitu kondisi setelah dipasang *isolating transformer*.

4.2 Koordinasi Relay Arus Lebih dan Relay Gangguan Tanah

A. Case Satu Tipikal Satu

Case satu tipikal satu merupakan kondisi ketika sistem menggunakan sumber dari trafo UST, sehingga koordinasi sistem pengaman pada *case* satu tipikal satu ini dari sekunder trafo UST B dengan kapasitas daya sebesar 23 MVA hingga beban motor pada tegangan 0,38 kV. Pada contoh ini diambil salah satu motor yaitu Boiler MCC 4A dengan kapasitas 604 kW. Relay-relay yang akan di koordinasikan dalam *case* satu tipikal satu ini yaitu Relay UST B, relay Aux 4B, LVCB Aux 4B dan LVCB Boiler MCC 4A. Pada *case* satu tipikal satu ini dapat diterapkan juga untuk motor Boiler MCC 4B. Adapun *single line diagram* *case* satu tipikal satu ditunjukkan dalam gambar 4.1

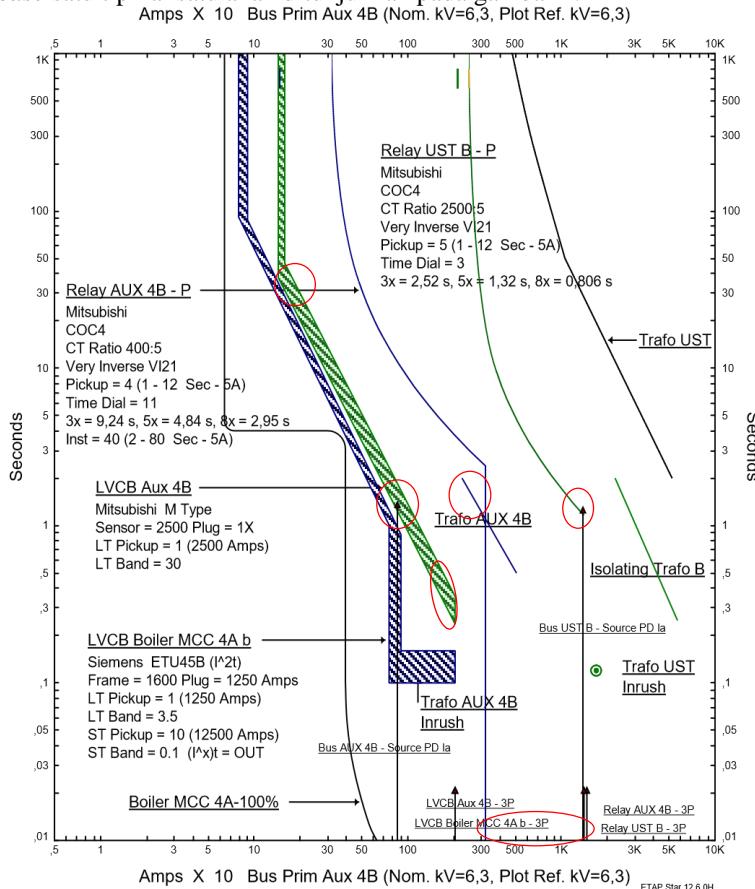
Pada *case* satu tipikal satu, ketika terjadi arus hubung singkat maksimal sebesar 33,18 kA pada motor boiler MCC 4A maka relay yang



Gambar 4.1 Single Line Diagram Case Satu Tipikal Satu

merasakan LVCB Boiler MCC 4A dan LVCB Aux 4B sebagai *back up* nya. Namun, *pick up long time* yang dipilih pada LVCB Boiler MCC 4A terlalu besar sehingga beresiko bersinggungan dengan LVCB Aux 4B dan *pick up short time* LVCB Boiler MCC 4A terlalu besar sehingga untuk penambahan *setting short time* pada LVCB Aux 4B menjadi besar juga sehingga ketika terjadi *arc flash* pada bus Aux 4B, LVCB Aux 4B membutuhkan waktu yang lebih lama dalam melokalisir gangguan *arc*

flash. Dan pada LVCB Aux 4B hanya menggunakan *setting long time* sehingga memungkinkan LVCB Aux 4B sebagai *back up* LVCB Boiler MCC 4A akan trip lebih lama atau dapat disebut grading antara LVCB Boiler MCC 4A dan LVCB Aux 4B lebih dari 0,2 s. Kurva *existing* pada case satu tipikal satu akan ditunjukkan pada gambar 4.2



Gambar 4.2 Kurva Koordinasi Arus Lebih Case Satu Tipikal Satu
(*Existing*)

Ketika terjadi arus hubung singkat hingga pada nilai maksimal 14,04 kA pada primer trafo AUX 4B maka relay yang bekerja yaitu relay Aux

4B dan relay UST B. Namun, *time delay* pada relay Aux 4B sebesar 0 s menyebabkan relay Aux 4B trip seketika dan *grading time* dengan relay UST B lebih dari 0,2 s. Dan *pick up instantaneous* relay Aux 4B terlalu besar sehingga tidak melindungi termal trafo Aux 4B. Relay UST B hanya menggunakan inverse yang menyebabkan ketika terjadi *arc flash* pada bus UST B, waktu yang dibutuhkan relay UST B dalam melokalisir gangguan menjadi lebih lama yaitu 1,24 s sehingga nilai insiden energinya menjadi lebih besar.

Berdasarkan hasil koordinasi relay arus lebih *case* satu tipikal satu seperti ditunjukkan pada gambar 4.2 maka perlu dilakukan *resetting* koordinasi relay arus lebih untuk meminimalisir resiko bersinggungan antara *pick up long time* LVCB Boiler MCC 4A dengan LVCB Aux 4B, waktu yang diperlukan dalam melokalisir *arc flash* menjadi lebih cepat, untuk melindungi termal trafo UST B, *grading time* sesuai standar IEEE 242 yaitu 0,2 s. Berikut perhitungannya :

a. LVCB Boiler MCC 4A

Manufaktur	Siemens
Model	ETU45B (I^2t)
Sensor	1.600 A
<i>Rating Plug</i>	1.250 A
Isc max kontribusi bus Aux 4B	33,66 kA
Isc min kontribusi bus Aux 4B	27,74 kA
FLA Boiler MCC 4A	1.064 A

Long Time Pickup

$$1,05 \times \text{FLA Boiler MCC} \quad < I_{set} < \quad 1,4 \times \text{FLA Boiler MCC} \quad 4A$$

$$1,05 \times 1.064 \text{ A} \quad < I_{set} < \quad 1,4 \times 1.064 \text{ A}$$

$$1.117,2 \quad < I_{set} < \quad 1.489,6$$

$$1.117,2 \quad < I_{set} < \quad 1.489,6$$

$$\frac{\text{Rating Plug}}{1.117,2} \quad < I_{set} < \quad \frac{\text{Rating Plug}}{1.489,6}$$

$$1.250 \quad < I_{set} < \quad 1.489,6$$

$$0,89376 \quad < I_{set} < \quad 1,19168$$

$$\text{Tap dipilih} = 1 (1.250 \text{ A})$$

$$\text{LT Band dipilih} = 3,5$$

Short Time Pick Up

1,6 x FLA Boiler MCC 4A	< Iset <	0,8 x I_{SC} MIN BUS AUX 4B
1,6 x 1.064 A	< Iset <	0,8 x 27.740 A
1.702,4	< Iset <	22.192
1.702,4	< Tap <	22.192
<i>Rating Plug</i> 1.702,4	< Tap <	<i>Rating Plug</i> 22.192
1.250	< Tap <	1.250
1,36192	< Tap <	17,7536

Tap yang dipilih = 6 (7.500 A)

ST Band dipilih = 0,1 s

Pada LVCB Aux 4B dilakukan *resetting* karena ketika terjadi *arc flash* sebesar 32,68 kA pada bus Aux 4B akan mengenai kurva *long time* LVCB Aux 4B pada 2,44 s. Sehingga untuk mempercepat memadamkan arus *arching* yang terjadi pada bus Aux 4B, akan ditambahkan *setting short time* pada LVCB Aux 4B. Berikut perhitungannya :

b. LVCB Aux 4B

Manufaktur	Mitsubishi
Model	M Type
Sensor	2.500 A
<i>Rating Plug</i>	2.500 A
Isc max bus Aux 4B	33,66 kA
Isc min bus Aux 4B	27,74 kA
FLA Trafo Aux 4B	2.431 A

Long Time Pickup

1,05 x FLA Trafo Aux 4B	< Iset <	1,4 x FLA Trafo Aux 4B
1,05 x 2.431 A	< Iset <	1,4 x 2.431 A
2.552,55	< Iset <	3.403,4
2.552,55	< Tap <	3.403,4
<i>Rating Plug</i> 2.552,55	< Tap <	<i>Rating Plug</i> 3.403,4
2.500		2.500

1,02

< Tap <

1,36

Tap yang dipilih = 1,05 (2.625 A)

LT Band = 30

Short Time Pick Up

1,6 x FLA Trafo Aux 4B	< Iset <	0,8 x $I_{SC \text{ MIN BUS AUX } 4B}$
1,6 x 2.431 A	< Iset <	0,8 x 27.740 A
3.889,6	< Iset <	22.192
3.889,6	< Tap <	22.192
<u>Rating Plug</u>		<u>Rating Plug</u>
3.889,6	< Tap <	22.192
2.500	< Tap <	2.500
1.55584	< Tap <	8,8768

Tap yang dipilih = 4 (10.000 A)

ST Band dipilih = 0,3

c. Relay Aux 4B

Manufaktur	Mitsubishi
Model	COC4
Kurva	<i>Very Inverse</i>
Rasio CT	400/5
Isc max kontribusi bus UST B	14,15 kA
Isc min kontribusi bus UST B	12,18 kA
FLA Aux 4A	146,6 A

Time Overcurrent Pickup

1,05 x FLA Aux 4B	< Iset <	1,4 x FLA Aux 4B
1,05 x 146,6 A	< Iset <	1,4 x 146,6 A
153,93	< Iset <	205,24
153,93	< Tap <	205,24
<u>n_{CT}</u>		<u>n_{CT}</u>
153,93	< Tap <	205,24
400/5	< Tap <	400/5
1,92	< Tap <	2,56

Tap yang dipilih = 2,56

$$\begin{array}{lcl} \text{Pick up range} & = 1 - 12 \text{ Sec} - 5\text{A} \\ \text{ISET YANG DIPILIH} & = 204,8 \end{array}$$

Time Dial

Pada trafo Aux 4B menggunakan kurva *very inverse*, sehingga nilai *time dial* pada *setting* relay Aux 4B yaitu

$$T_d = \frac{t \times \left(\left(\frac{I_{SC \text{ kontribusi max}}}{I_{set}} \right)^1 - 1 \right)}{13,5}$$

Ditentukan nilai waktu operasi (t) = 0,1 s

$$T_d = \frac{0,1 \text{ s} \times \left(\left(\frac{14.150}{204,8} \right)^1 - 1 \right)}{13,5} = 0,5$$

Time dial (T_d) berdasarkan perhitungan merupakan nilai T_d minimum, sehingga pada relay Aux 4B dipilih $T_d = 6,75$

Instantaneous Pick Up

1,6 x FLA Trafo Aux 4B	< Iset <	0,8 x $I_{SC \text{ MIN KONTRIBUSI BUS UST B}}$
1,6 x 146,6 A	< Iset <	0,8 x 12.180 A
234,56	< Iset <	9,744
234,56	< Tap <	9,744
$\frac{n_{CT}}{234,56}$	< Tap <	$\frac{n_{CT}}{9,744}$
$\frac{400/5}{234,56}$	< Tap <	$\frac{400/5}{9,744}$
2,932	< Tap <	121,8

Tap yang dipilih = 28

Pick up range = 2 – 80 Sec – 5A

ISET YANG DIPILIH = 2.240 A

Time Delay = 0,1 s

Pada relay UST B dilakukan *resetting* dengan penambahan *instantaneous* untuk mempercepat dalam melokalisir *arc flash*. Berikut perhitungannya :

d. Relay UST B

Manufaktur	Mitsubishi
Model	COC4
Kurva	<i>Very Inverse</i>
Rasio CT	2.500/5
Isc max kontribusi bus UST A	14,15 kA
Isc min kontribusi bus UST A	12,18 kA
FLA Aux 4A	2.108 A

Time Overcurrent Pickup

$$\begin{array}{lll}
 1,05 \times \text{FLA UST B} & < I_{\text{set}} < & 1,4 \times \text{FLA UST B} \\
 1,05 \times 2.108 \text{ A} & < I_{\text{set}} < & 1,4 \times 2.108 \text{ A} \\
 2.213,4 & < I_{\text{set}} < & 2.951,2 \\
 2.213,4 & < \text{Tap} < & 2.951,2 \\
 \frac{n_{CT}}{2.213,4} & < \text{Tap} < & \frac{n_{CT}}{2.951,2} \\
 \frac{2.500/5}{2.213,4} & < \text{Tap} < & \frac{2.500/5}{2.951,2} \\
 4,4268 & < \text{Tap} < & 5,9024
 \end{array}$$

Tap yang dipilih = 5,9

Pick up range = 1 - 12 Sec - 5A

$I_{\text{SET YANG DIPILIH}} = 2.950$

Time Dial

Pada trafo UST B menggunakan kurva *very inverse*, sehingga nilai *time dial* pada *setting relay* UST 4B yaitu

$$T_d = \frac{t \times \left(\left(\frac{I_{\text{SC kontribusi max}}}{I_{\text{set}}} \right)^1 - 1 \right)}{13,5}$$

Ditentukan nilai waktu operasi (t) = 0,3 s

$$T_d = \frac{0,3 \text{ s} \times \left(\left(\frac{14.150}{2.950} \right)^1 - 1 \right)}{13,5} = 0,084$$

Time dial (T_d) berdasarkan perhitungan merupakan nilai T_d minimum, sehingga pada relay Aux 4B dipilih $T_d = 3$

Instantaneous Pick Up

$$1,6 \times \text{FLA Trafo} < I_{\text{set}} < 0,8 \times I_{\text{SC MIN KONTRIBUSI BUS UST B}}$$

UST B

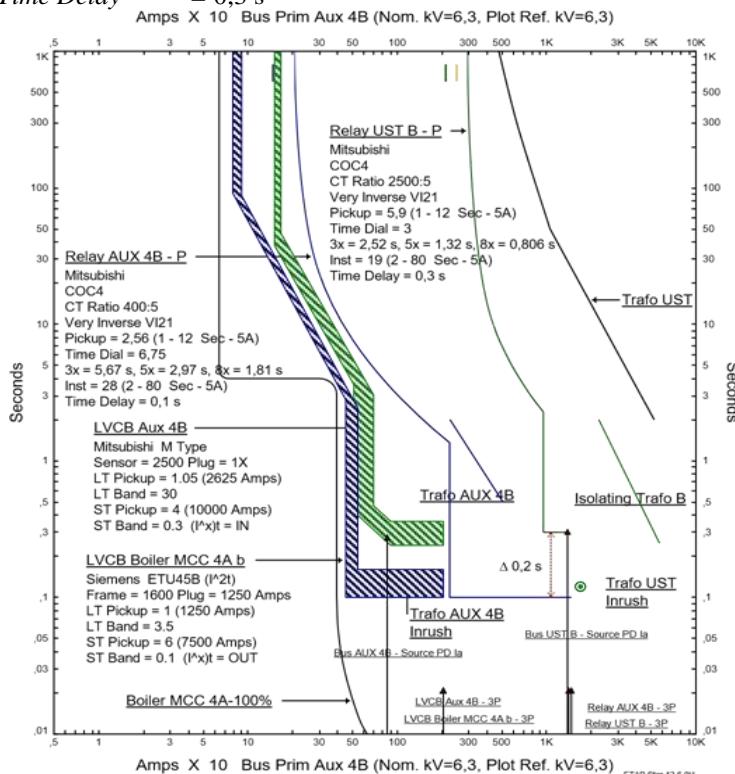
$1,6 \times 2.108 \text{ A}$	$< \text{Iset} <$	$0,8 \times 12.180 \text{ A}$
3.372,8	$< \text{Iset} <$	9.744
3.372,8	$< \text{Tap} <$	9.744
$\frac{n_{CT}}{n_{CT}}$	$< \text{Tap} <$	$\frac{n_{CT}}{n_{CT}}$
3.372,8	$< \text{Tap} <$	9.744
$\frac{2.500/5}{2.500/5}$	$< \text{Tap} <$	$\frac{2.500/5}{2.500/5}$
6,7456	$< \text{Tap} <$	19,488

Tap yang dipilih = 19

Pick up range = 2 – 80 Sec – 5A

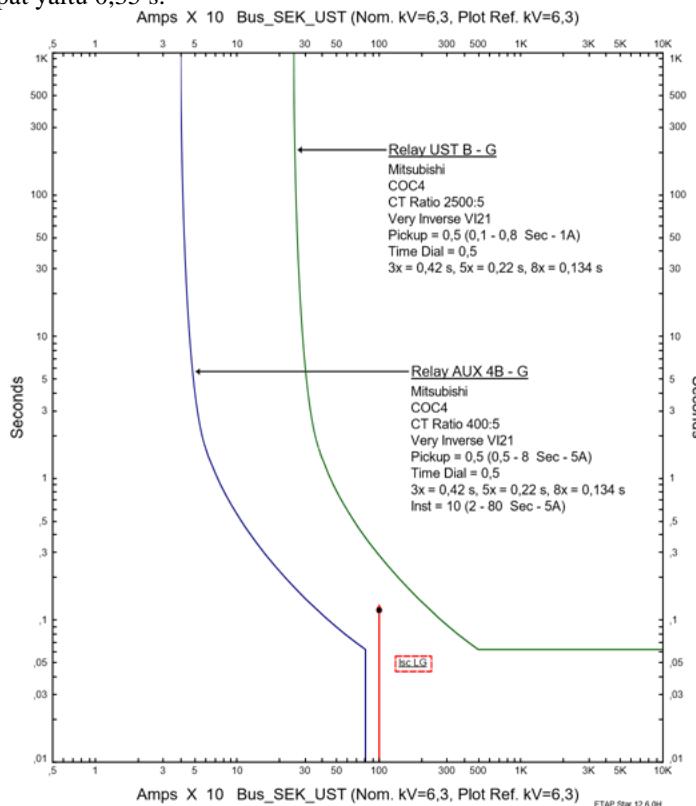
ISET YANG DIPILIH = 9.500 A

Time Delay = 0,3 s



Gambar 4.3 Plot Time Current Curve (TCC) Resetting Case Satu Tipikal Satu

Berdasarkan hasil perhitungan, maka didapatkan plot *Time Current Curve* (TCC) *resetting* pada *case* satu tipikal satu menggunakan simulasi ETAP 12.6.0 yang ditunjukkan pada gambar 4.3. Dari hasil *resetting* terlihat *long time pickup* LVCB Boiler MCC 4A sudah tidak berdekatan, *grading time* antara LVCB Boiler MCC 4A dan LVCB Aux 4B yaitu 0,2 s dan waktu yang diperlukan LVCB Aux 4B dalam melokalisir *arc flash* menjadi lebih cepat yaitu 0,381 s. Dan pada termal trafo Aux 4B telah dilindungi oleh relay Aux 4B, *grading time* dengan relay UST B yaitu 0,2 s setelah dilakukan *resetting* pada *time delay* relay Aux 4B dan waktu yang diperlukan relay UST B dalam melokalisir *arc flash* menjadi lebih cepat yaitu 0,35 s.



Gambar 4.4 Kurva Koordinasi Ground Fault Case Satu Tipikal Satu (*Existing*)

Selanjutnya adalah koordinasi arus lebih *ground fault* pada *case* satu tipikal satu yaitu antara beban Aux 4B dan UST A. Berikut adalah kurva koordinasi arus lebih *ground fault* *case* satu tipikal satu ditunjukkan pada gambar 4.4. Berdasarkan plot *Time Current Curve Ground Fault existing case* satu tipikal satu, dapat disimpulkan bahwa kurva yang digunakan pada relay *ground fault* Aux 4B dan UST B adalah *very inverse*, sedangkan untuk arus hubung singkat *line to ground* nilainya konstan dibatasi oleh arus NGR yang digunakan yaitu 1.000 A, sehingga akan lebih efektif jika digunakan kurva *definite time*. Dan pada relay Aux 4B nilai *time delay* pada kondisi *existing* yaitu 0 s, sehingga ketika ada arus gangguan *line to ground* akan trip seketika, menyebabkan *grading time* dengan relay UST B lebih dari 0,2 s. Maka dari itu perlu dilakukan *resetting* untuk relay Aux 4B dan relay UST B. Berikut perhitungannya :

a. Relay Aux 4B

Manufaktur	Mitsubishi
Model	COC4
Kurva	<i>Definite Time</i>
Rasio CT	400/5
Isc L-G	1.000 A

Ground Fault Overcurrent Pickup

$10\% \times I_{SC L-G}$	$< Iset <$	$50\% \times I_{SC L-G}$
$10\% \times 1.000 \text{ A}$	$< Iset <$	$50\% \times 1.000 \text{ A}$
$\frac{100}{100}$	$< Iset <$	$\frac{500}{500}$
$\frac{100}{n_{CT}}$	$< Tap <$	$\frac{500}{n_{CT}}$
$\frac{100}{400/5}$	$< Tap <$	$\frac{500}{400/5}$
$1,25$	$< Tap <$	$6,25$
Tap dipilih	$= 1,25$	
Pick up range	$= 0,5 - 8 \text{ Sec} - 5\text{A}$	
Iset dipilih	$= 100$	

Time Dial

Pada Aux 4B menggunakan kurva *definite time*, sehingga nilai *time dial* pada *setting* relay UST A dipilih 0,5 karena menghasilkan *tripping time* 0,1 s

Ground Fault Instantaneous Pickup

$10\% x I_{SC L-G}$	$< Iset <$	$50\% x I_{SC L-G}$
$10\% x 1.000 A$	$< Iset <$	$50\% x 1.000 A$
100	$< Iset <$	500
100	$< Tap <$	500
$\frac{n_{CT}}{n_{CT}}$	$< Tap <$	$\frac{n_{CT}}{n_{CT}}$
100	$< Tap <$	500
$\frac{400/5}{400/5}$	$< Tap <$	$\frac{400/5}{400/5}$
1,25	$< Tap <$	6,25

Tap dipilih = 6

Pick up range = 2 – 80 Sec -5A

Iset dipilih = 480

Time Delay = 0,1 s

b. Relay UST B

Manufaktur	Mitsubishi
Model	COC4
Kurva	Definite Time
Rasio CT	2.500/5
Isc L-G	1.000 A

Ground Fault Overcurrent Pickup

$10\% x I_{SC L-G}$	$< Iset <$	$50\% x I_{SC L-G}$
$10\% x 1.000 A$	$< Iset <$	$50\% x 1.000 A$
100	$< Iset <$	500
100	$< Tap <$	500
$\frac{n_{CT}}{n_{CT}}$	$< Tap <$	$\frac{n_{CT}}{n_{CT}}$
100	$< Tap <$	500
$\frac{2.500/5}{2.500/5}$	$< Tap <$	$\frac{2.500/5}{2.500/5}$
0,2	$< Tap <$	1

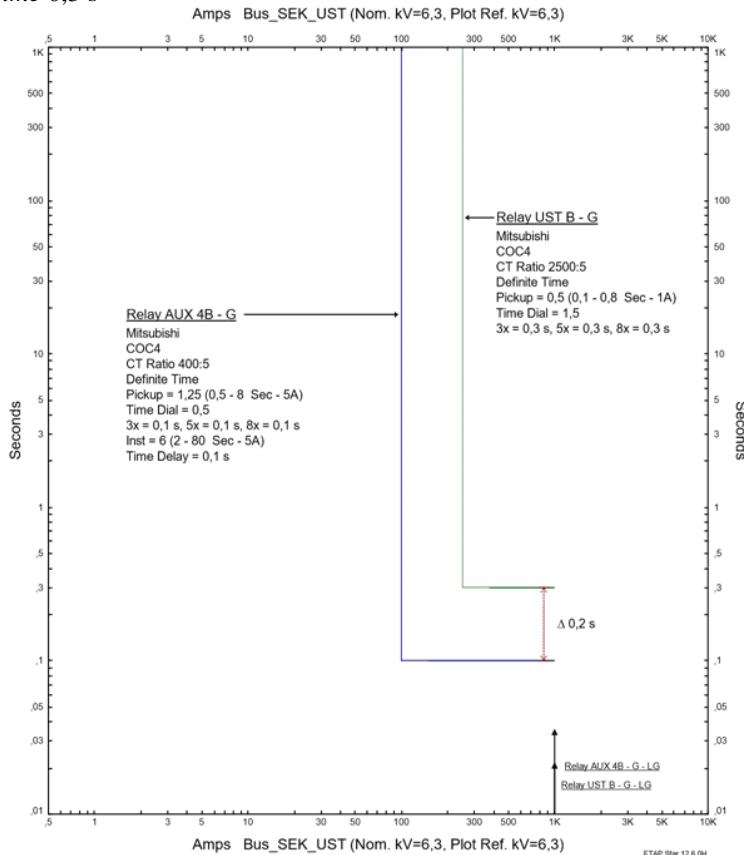
Tap dipilih = 0,5

Pick up range = 0,1 – 0,8 Sec – 5A

Iset dipilih = 250

Time Dial

Pada UST B menggunakan kurva *definite time*, sehingga nilai *time dial* pada *setting* relay UST A dipilih 1,5 karena menghasilkan *tripping time* 0,3 s

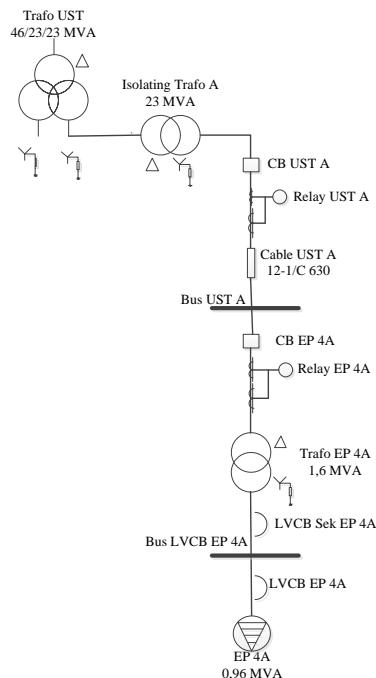


Gambar 4.5 Plot Time Current Curve (TCC) Resetting Ground Fault Case Satu Tipikal Satu

Berdasarkan hasil perhitungan, maka didapatkan plot *Time Current Curve* (TCC) *resetting ground fault* pada *case* satu tipikal satu menggunakan simulasi ETAP 12.6.0 yang ditunjukkan pada gambar 4.5 dibawah. Dari hasil *resetting ground fault case* satu tipikal satu, dapat

disimpulkan bahwa kurva relay Aux 4B dan kurva relay UST B sudah terkoordinasi dengan *grading time* sesuai IEEE 242 yaitu 0,2 s. Ketika ada arus gangguan *line to ground* maka relay yang bekerja terlebih dahulu yaitu relay Aux 4B lalu relay UST B. Dan ketika kurva relay UST B diubah menjadi *definite time*, maka *tripping time* nya menjadi lebih cepat.

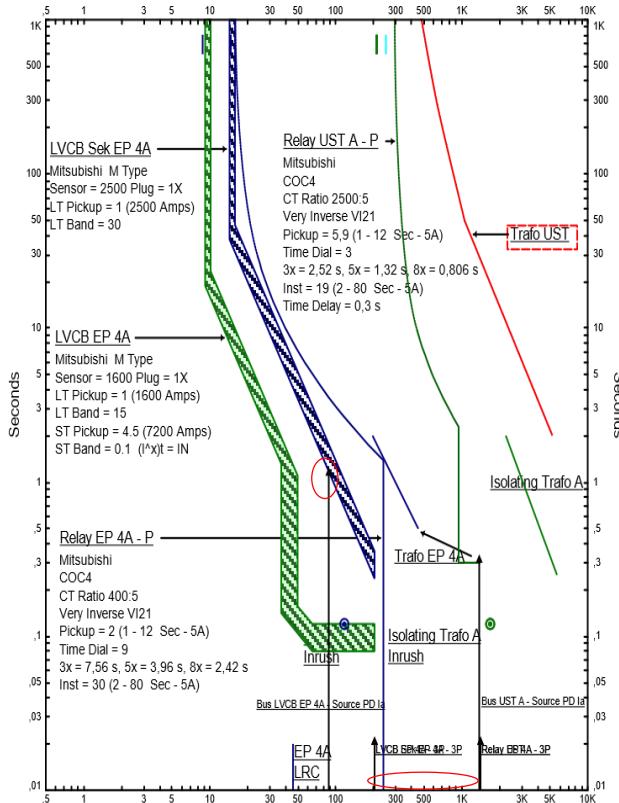
B. Case Satu Tipikal Dua



Gambar 4.6 Single Line Diagram Case Satu Tipikal Dua

Single line diagram case satu tipikal dua ditunjukkan dalam gambar 4.6. *Case* satu tipikal dua merupakan kondisi ketika sistem menggunakan sumber dari trafo UST, sehingga koordinasi sistem pengaman dari sekunder trafo UST dengan kapasitas daya sebesar 23 MVA hingga beban *lumped load* pada tegangan 0,38 kV. Dalam contoh ini diambil beban *lumped load* yang digunakan yaitu electrostatic precipitator 4A yang memiliki kapasitas 0,96 MVA. Rele-rele yang akan di koordinasikan dalam tipikal dua ini yaitu Relay UST A, relay EP 4A, LVCB Sek EP 4A

dan LVCB EP 4A. Akan tetapi untuk relay UST A tidak di lakukan *resetting* dikarenakan telah di lakukan *resetting* pada *case* satu tipikal satu. Pada *case* satu tipikal dua ini dapat diterapkan untuk electrostatic precipitator 4B karena memiliki kapasitas yang sama yaitu 0,96 MVA, juga pada beban *lumped load* Essential Service Board 4 dan UST & CT Power Centre 4.



Gambar 4.7 Kurva Koordinasi Arus Lebih Case Satu Tipikal Dua
(*Existing*)

Kurva koordinasi arus lebih *case* satu tipikal dua ditunjukkan pada gambar 4.7. Pada *case* satu tipikal dua ini ketika terjadi arus hubung singkat hingga nilai maksimum yaitu 33,66 kA pada tegangan 0,38 kV pada beban *lumped load* EP 4A maka relay yang bekerja yaitu LVCB EP

4A dan LVCB Sek Ep 4A. Berdasarkan data *existing* terlihat bahwa antara LVCB EP 4A dan LVCB Sek EP 4A sudah berkoordinasi dengan baik. Namun, nilai *long time pick up* pada LVCB Sek 4A tidak sesuai dengan perhitungan dan hanya menggunakan *setting long time* menyebabkan waktu yang dibutuhkan dalam melokalisir *arc flash* yang terjadi pada bus EP 4A menjadi lebih lama, sehingga perlu dilakukan *resetting* dengan menambahkan *setting short time* pada LVCB Sek EP 4A.

Ketika terjadi arus hubung singkat pada bus UST A 6,3 kV hingga nilai maksimum yaitu 14,16 kA, relay yang bekerja yaitu relay EP 4A dan relay UST A. Namun, karena nilai *time delay* pada relay EP 4A yaitu 0 s, maka ketika terjadi arus hubung singkat relay tersebut akan trip seketika dan menyebabkan *grading time* dengan relay UST A menjadi lebih dari 0,2 s, sehingga perlu dilakukan *resetting* pada *time delay* relay EP 4A. Dan *arc flash* yang terjadi pada bus UST A mengenai *setting instantaneous* relay UST A, sehingga relay UST A membutuhkan waktu 0,35 s untuk melokalisir *arc flash* tersebut.

Berdasarkan hasil koordinasi relay arus lebih *case* satu tipikal dua seperti ditunjukkan pada gambar 4.7 perlu dilakukan *resetting* koordinasi relay arus lebih agar pemadaman *arc flash* yang terjadi pada bus EP 4A dapat menjadi lebih cepat dan *grading time* antara relay EP 4A dan relay UST A menjadi 0,2 s. Pada LVCB EP 4A tidak dilakukan *resetting* karena sudah dalam kondisi baik. Berikut perhitungan berdasarkan data *existing*

a. LVCB EP 4A

Manufaktur	Mitsubishi
Model	M Type
Sensor	1600
<i>Rating Plug</i>	1600
Isc max kontribusi bus EP 4A	33,66 kA
Isc min kontribusi bus EP 4A	27,74 kA
FLA EP 4A	1.459 A

Long Time Pickup

$$\begin{array}{lll}
 1,05 \times \text{FLA EP 4A} & < \text{Iset} < & 1,4 \times \text{FLA EP 4A} \\
 1,05 \times 1.459 \text{ A} & < \text{Iset} < & 1,4 \times 1.459 \text{ A} \\
 1.531,95 & < \text{Iset} < & 2.042,6 \\
 1.531,95 & < \text{Tap} < & 2.042,6 \\
 \hline
 \text{Rating Plug} & & \text{Rating Plug}
 \end{array}$$

<u>1.531,95</u>	< Tap <	<u>2.042,6</u>
<u>1.600</u>		<u>1600</u>
<u>0,9574</u>	< Tap <	<u>1,2766</u>

Tap yang dipilih = 1 (1.600 A)

LT Band dipilih = 15

Short Time Pick Up

<u>1,6 x FLA EP 4A</u>	< Iset <	<u>0,8 x Isc min kontribusi bus EP 4A</u>
<u>1,6 x 1.459 A</u>	< Iset <	<u>0,8 x 27.740 A</u>
<u>2.334,4</u>	< Iset <	<u>22.192</u>
<u>2.334,4</u>	< Tap <	<u>22.192</u>
<u>Rating Plug</u>		<u>Rating Plug</u>
<u>2.334,4</u>	< Tap <	<u>22.192</u>
<u>1.600</u>	< Tap <	<u>1.600</u>
<u>1.459</u>	< Tap <	<u>13,87</u>

Tap yang dipilih = 4,5 (7.200 A)

ST Band = 0,1 s

b. LVCB Sek EP 4A

Manufaktur	Mitsubishi
Model	M Type
Sensor	2.500 A
<i>Rating Plug</i>	2.500 A
Isc max kontribusi bus EP 4A	33,66 kA
Isc min kontribusi bus EP 4A	27,74 kA
FLA Trafo EP 4A	2.431 A

Long Time Pickup

<u>1,05 x FLA Trafo EP 4A</u>	< Iset <	<u>1,4 x FLA Trafo EP 4A</u>
<u>1,05 x 2.431 A</u>	< Iset <	<u>1,4 x 2.431 A</u>
<u>2.552,55</u>	< Iset <	<u>3.403,4</u>
<u>2.552,55</u>	< Tap <	<u>3.403,4</u>
<u>Rating Plug</u>		<u>Rating Plug</u>
<u>2.552,55</u>	< Tap <	<u>3.403,4</u>
<u>2.500</u>		<u>2.500</u>

1,02 < Tap < 1,36

Tap yang dipilih = 1,05 (2.625 A)
LT Band dipilih = 25

Short Time Pick Up

1,6 x FLA Trafo EP 4A	< Iset <	0,8 x I_{SC} MIN KONTRIBUSI BUS EP 4A
1,6 x 2.431 A	< Iset <	0,8 x 27.740 A
3.889,6	< Iset <	27.740
3.889,6	< Tap <	27.740
Rating Plug		Rating Plug
3.889,6	< Tap <	27.740
2.500	< Tap <	2.500
1.55584	< Tap <	8,976

Tap yang dipilih = 4 (10.000 A)
ST Band = 0,3 s

c. Relay EP 4A

Manufaktur	Mitsubishi
Model	COC4
Kurva	Very Inverse
Rasio CT	400/5
I_{SC} max kontribusi bus UST B	14,16 kA
I_{SC} min kontribusi bus UST B	12,18 kA
FLA Trafo Aux 4A	146,6 A

Time Overcurrent Pickup

1,05 x FLA Aux 4B	< Iset <	1,4 x FLA Aux 4B
1,05 x 146,6 A	< Iset <	1,4 x 146,6 A
153,93	< Iset <	205,24
153,93	< Tap <	205,24
$\frac{n_{CT}}{153,93}$	< Tap <	$\frac{n_{CT}}{205,24}$
$\frac{400/5}{153,93}$	< Tap <	$\frac{400/5}{205,24}$
1,92	< Tap <	2,56

Tap yang dipilih = 2
 Pick up range = 1 -12 Sec – 5A
 I_{SET} YANG DIPILIH = 160

Time Dial

Pada trafo EP 4A menggunakan kurva *very inverse*, sehingga nilai *time dial* pada *setting* relay Aux 4B yaitu

$$T_d = \frac{t \times \left(\left(\frac{I_{SC \text{ kontribusi max}}}{I_{set}} \right)^1 - 1 \right)}{13,5}$$

Ditentukan nilai waktu operasi (t) = 0,1 s

$$T_d = \frac{0,1 \text{ s} \times \left(\left(\frac{14.160}{160} \right)^1 - 1 \right)}{13,5} = 2,59$$

Time dial (Td) berdasarkan perhitungan merupakan nilai Td minimum, sehingga pada relay EP 4A dipilih Td = 9

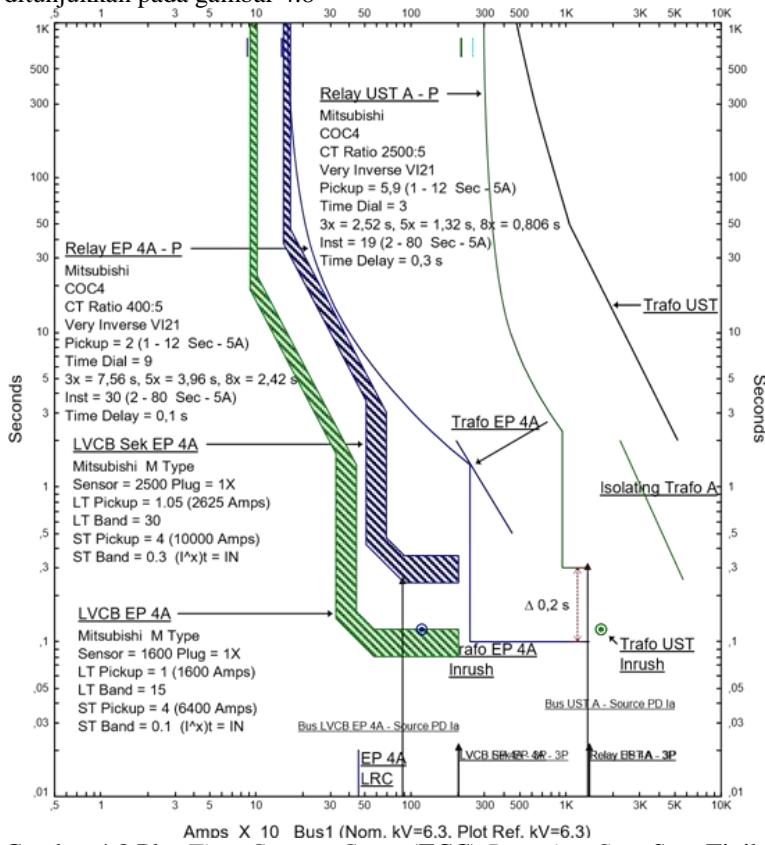
Instantaneous Pick Up

1,6 x FLA Trafo Aux 4B	< Iset <	0,8 x I _{SC MIN KONTRIBUSI BUS UST B}
1,6 x 146,6 A	< Iset <	0,8 x 12.180 A
234,56	< Iset <	9.744
234,56	< Tap <	9.744
<u>$\frac{n_{CT}}{234,56}$</u>	< Tap <	<u>$\frac{n_{CT}}{9.744}$</u>
400/5	< Tap <	400/5
2,932	< Tap <	121,8

Tap yang dipilih = 30
 Pick up range = 2 – 80 Sec – 5A
 I_{SET} YANG DIPILIH = 2.400 A
 Time Delay = 0,1 s

Pada relay UST A tidak dilakukan *resetting* karena telah dilakukan *resetting* pada *case* satu tipikal satu. Setelah dilakukan *resetting* pada *case* satu tipikal dua dapat disimpulkan bahwa koordinasi relay arus lebih pada tipikal dua sudah baik. Hal ini dapat dilihat dari *grading time* antara

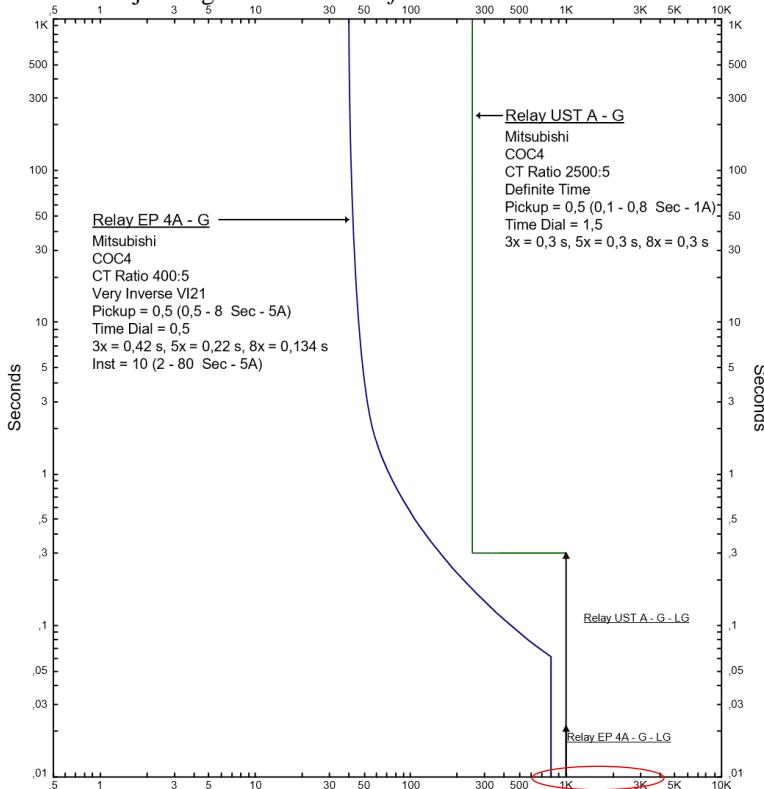
LVCB EP 4A dan LVCB Sek Ep 4A juga relay EP 4A dan relay UST A yaitu 0,2 s. Waktu yang diperlukan untuk melokalisir *arc flash* pada bus EP 4A dan bus UST A yaitu 0,37 s dan 0,35 s. Berdasarkan hasil perhitungan, maka didapatkan plot *Time Current Curve (TCC) resetting* pada *case* satu tipikal dua menggunakan simulasi ETAP 12.6.0 yang ditunjukkan pada gambar 4.8



Gambar 4.8 Plot *Time Current Curve (TCC) Resetting Case Satu Tipikal Dua*

Selanjutnya, dilakukan koordinasi *ground fault* untuk *case* satu tipikal dua. Berdasarkan plot *Time Current Curve Ground Fault existing case* satu tipikal dua pada gambar 4.9, dapat disimpulkan bahwa kurva

yang digunakan pada relay *ground fault* EP 4A adalah *very inverse*, sedangkan untuk arus hubung singkat *line to ground* nilainya konstan dibatasi oleh arus NGR yang digunakan yaitu 1.000 A, sehingga akan lebih efektif jika digunakan kurva *definite time*.



Gambar 4.9 Kurva Koordinasi *Ground Fault Case Satu Tipikal Dua (Existing)*

Dan pada EP 4A nilai *time delay* pada kondisi *existing* yaitu 0 s, sehingga ketika ada arus gangguan *line to ground* akan trip seketika, menyebabkan *grading time* dengan relay UST A lebih dari 0,2 s. Maka dari itu perlu dilakukan *resetting* untuk relay EP 4A. Berikut perhitungannya :

a. Relay EP 4A

Manufaktur	Mitsubishi
Model	COC4
Kurva	<i>Definite Time</i>
Rasio CT	400/5
I _{sc L-G}	1.000 A

Ground Fault Overcurrent Pickup

10% x I _{sc L-G}	< Iset <	50% x I _{sc L-G}
10% x 1.000 A	< Iset <	50% x 1.000 A
100	< Iset <	500
100	< Tap <	500
$\frac{n_{CT}}{100}$	< Tap <	$\frac{n_{CT}}{500}$
400/5	< Tap <	400/5
1,25	< Tap <	6,25

Tap yang dipilih = 1,25

Pick up range = 0,5 – 8 Sec – 5A

I_{SET YANG DIPILIH} = 100

Time Dial

Dikarenakan tipe kurva pada relay EP 4A diubah menjadi *definite time*, maka dipilih dipilih 0,5 karena dihasilkan tripping time 0,1 s

Ground Fault Instantaneous Pick Up

10% x I _{sc L-G}	< Iset <	50% x I _{sc L-G}
10% x 1.000 A	< Iset <	50% x 1.000 A
100	< Iset <	500
100	< Tap <	500
$\frac{n_{CT}}{100}$	< Tap <	$\frac{n_{CT}}{500}$
400/5	< Tap <	400/5
1,25	< Tap <	6,25

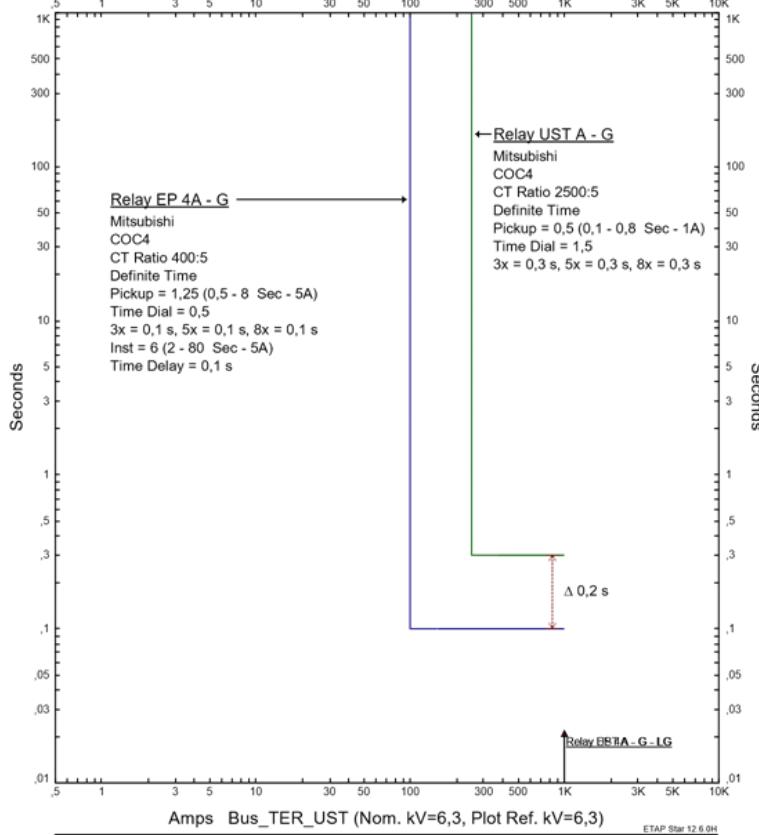
Tap yang dipilih = 6

Pick up range = 2 – 80 Sec – 5A

Iset = 480

Time Delay = 0,1 s

Pada relay trafo A tidak dilakukan *resetting* karena telah dilakukan *resetting* pada case satu tipikal satu. Berdasarkan hasil perhitungan, maka didapatkan plot *Time Current Curve* (TCC) *resetting ground fault* pada case satu tipikal dua menggunakan simulasi ETAP 12.6.0 yang ditunjukkan pada gambar 4.10



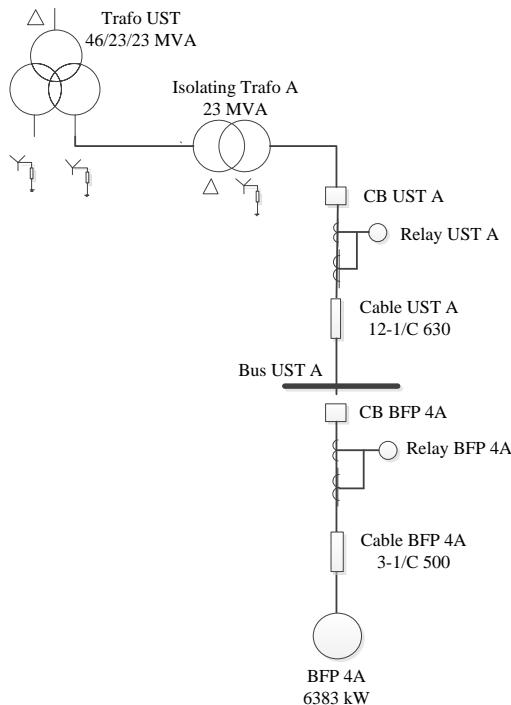
Gambar 4.10 Plot *Time Current Curve* (TCC) *Ground Faut Resetting Case Satu Tipikal Dua*

Berdasarkan hasil *resetting ground fault case* satu tipikal dua diketahui bahwa antara relay EP 4A dan relay UST A sudah berkoordinasi dengan baik dengan *grading time* 0,2 s. Dan disimulasikan ketika ada arus hubung singkat *line to ground* ($I_{sc, LG}$) sebesar 1.000 A karena NGR yang

digunakan 1.000 A, maka relay EP 4A bekerja pada 0,1 s dan relay UST A bekerja pada 0,3 s

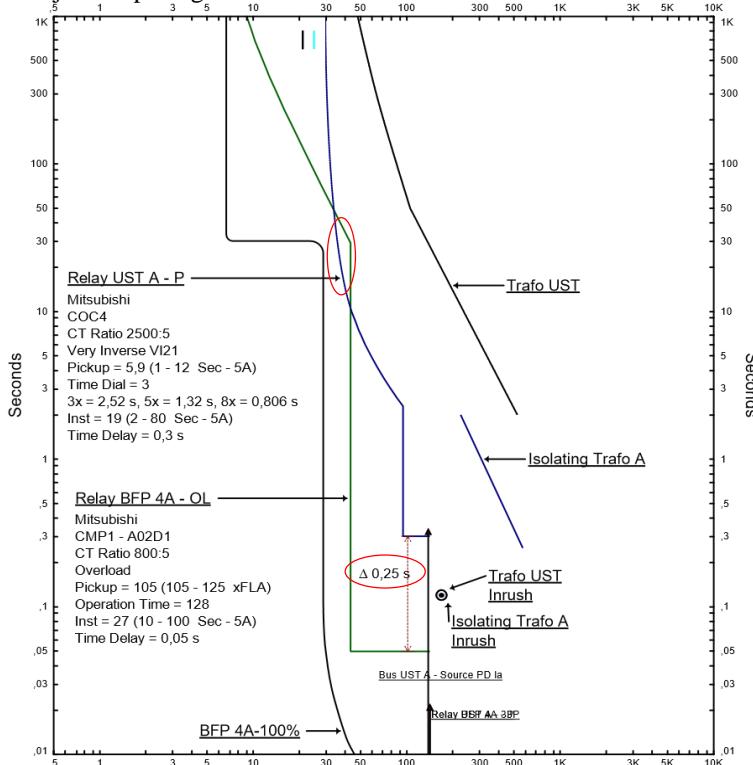
C. Case Satu Tipikal Tiga

Case satu tipikal tiga merupakan kondisi ketika sistem menggunakan sumber dari trafo UST, sehingga koordinasi sistem pengaman pada *case* satu tipikal tiga ini dari sekunder trafo UST A dengan kapasitas daya sebesar 23 MVA hingga beban motor pada tegangan 6,3 kV. Pada contoh ini diambil salah satu motor yaitu Boiler Feed Pump 4A dengan kapasitas 6383 kW. Relay-relay yang akan di koordinasikan dalam *case* satu tipikal tiga ini yaitu relay UST A dan relay BFP 4A. Pada *case* satu tipikal tiga ini dapat diterapkan juga untuk motor Boiler Feed Pump 4B dan Boiler Feed Pump 4C. Adapun *single line diagram case* satu tipikal tiga ditunjukkan dalam gambar 4.11



Gambar 4.11 *Single Line Diagram Case* Satu Tipikal Tiga

Pada *case* satu tipikal tiga, ketika terdapat arus hubung singkat pada motor BFP 4A relay yang akan bekerja yaitu relay BFP 4A dan relay UST A. Namun, berdasarkan data *existing* terlihat bahwa masih terdapat persinggungan antara relay BFP 4A dengan relay UST A dikarenakan *instantaneous pick up* pada relay BFP yang terlalu besar, dan nilai *time delay* yang di set pada kondisi *existing* terlalu cepat yaitu 0,05 s yang mengakibatkan *grading time* dengan relay UST A menjadi 0,25 s. Dan *arc flash* yang terjadi pada bus UST A dapat dilokalisir oleh relay UST A pada 0,35 s. Kurva koordinasi arus lebih *case* satu tipikal tiga akan ditunjukkan pada gambar 4.12.



Gambar 4.12 Kurva Koordinasi Arus Lebih *Case* Satu Tipikal Tiga (*Existing*)

Berdasarkan kurva koordinasi relay arus lebih *case* satu tipikal tiga seperti ditunjukkan pada gambar 4.12 maka perlu dilakukan *resetting* koordinasi relay arus lebih agar kedua relay dapat terkoordinasi dengan baik. Berikut perhitungannya :

a. Relay BFP 4A

Manufaktur	Mitsubishi
Model	CMP1 – A02D1
Tipe	<i>Overload</i>
Rasio CT	800/5
Isc max kontribusi bus UST A	14,16 kA
Isc min kontribusi bus UST A	12,18 kA
FLA BFP 4A	702 A

Thermal/Overload Pickup

$$\begin{aligned} I_{set} &= 1,05 \times \text{FLA} \\ &= 1,05 \times 702 \text{ A} = 737,1 \text{ A} \\ P_{ick up} &= \frac{I_{set}}{n_{CT}} = \frac{737,1 \text{ A}}{800/5} = 4,607 \text{ A} \end{aligned}$$

Operation Time Setting

Pada data *existing* BFP 4A nilai *operation time setting* yang digunakan yaitu 120 s. Namun, dikarenakan pilihan yang ada relay CMP1 – A02D1 adalah 112 s dan 128 s, sehingga dipilih nilai 128 s.

Instantaneous Pick Up

$$\begin{array}{lll} 1,6 \times \text{FLA BFP 4A} & < I_{set} < & 0,8 \times I_{SC \text{ MIN KONTRIBUSI BUS UST A}} \\ 1,6 \times 702 \text{ A} & < I_{set} < & 0,8 \times 12.180 \text{ A} \\ 1.123,2 & < I_{set} < & 9,744 \\ 1.123,2 & < \text{Tap} < & 9,744 \\ \hline \frac{n_{CT}}{1.123,2} & < \text{Tap} < & \frac{n_{CT}}{9,744} \\ \frac{800/5}{800/5} & < \text{Tap} < & \frac{800/5}{800/5} \\ 7,02 & < \text{Tap} < & 60,9 \end{array}$$

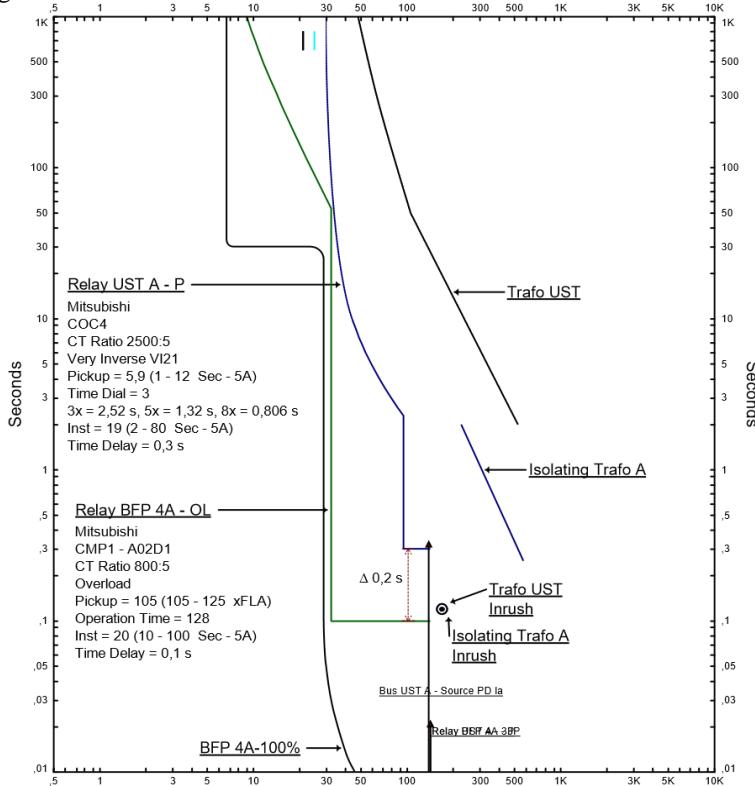
Tap yang dipilih = 20

Pick up range = 10 – 100 Sec – 5A

ISET YANG DIPILIH = 3.200

Time delay = 0,1 s

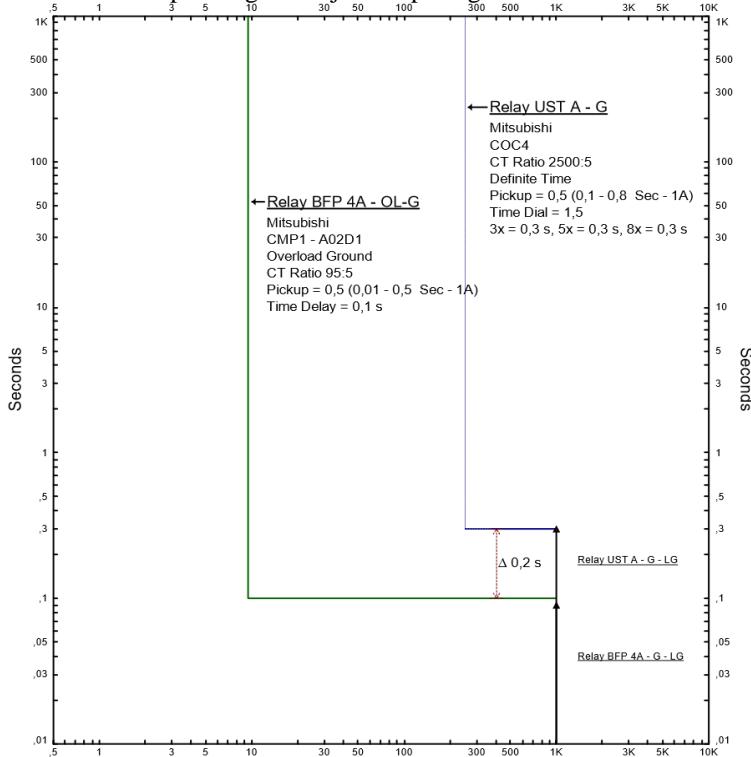
Pada relay UST A tidak dilakukan *resetting* karena telah dilakukan *resetting* pada case satu tipikal satu. Berdasarkan hasil perhitungan, maka didapatkan plot *Time Current Curve* (*TCC*) *resetting* pada case satu tipikal tiga menggunakan simulasi ETAP 12.6.0 yang ditunjukkan pada gambar 4.13



Gambar 4.13 Plot *Time Current Curve* (*TCC*) *Resetting Case Satu Tipikal Tiga*

Berdasarkan hasil *resetting* terlihat bahwa ketika *starting* motor BFP 4A, maka relay BFP 4A tidak bekerja sehingga motor BFP 4A tidak padam. Ketika trafo A dioperasikan pertama kali tidak menyebabkan kurva relay UST A bekerja. Dan antara relay BFP 4A dan relay UST sudah terkoordinasi dengan *grading time* sesuai dengan IEEE 242 yaitu

0,2 s dan tidak ada kurva yang bersinggungan. Waktu yang diperlukan relay UST A dalam menghilangkan arus *arching* yang terjadi pada bus UST A menjadi lebih cepat yaitu 0,35 s. Selanjutnya adalah koordinasi arus lebih *ground fault* pada *case* satu tipikal tiga yaitu antara relay BFP 4A dan relay UST A. Berikut adalah kurva koordinasi arus lebih *ground fault* *case* satu tipikal tiga ditunjukkan pada gambar 4.14



Gambar 4.14 Kurva Koordinasi *Ground Fault Case* Satu Tipikal Tiga (*Existing*)

Berdasarkan plot *Time Current Curve Ground Fault existing case* satu tipikal tiga dapat disimpulkan bahwa antara relay BFP dan relay UST A sudah terkoordinasi dengan baik dengan *grading time* sesuai standar IEEE 242 yaitu 0,2 s. Dan relay yang bekerja ketika ada arus *line to*

ground sebesar 1.000 A yaitu relay BFP 4A lalu relay UST A. Berikut perhitungan sesuai data *existing* relay BFP 4A :

a. Relay BFP 4A

Manufaktur	Mitsubishi
Model	CMP1 – A02D1
Rasio CT	95/5
Isc L-G	1.000 A

Groun Fault Instantaneous Pick Up

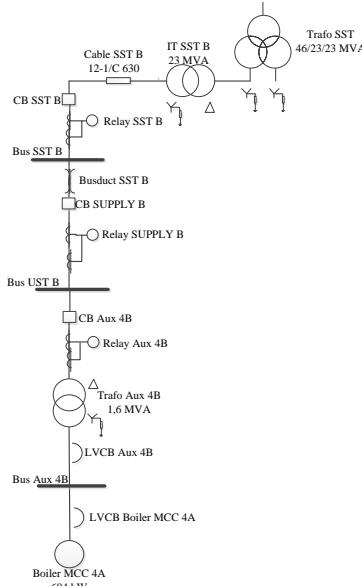
$$\begin{aligned} \text{Tap} &= \text{EF-I} \times 100\% \\ &= 0,5 \times 100\% = 0,5 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\text{Iset} = \text{Tap} \times \frac{\text{CT Primer}}{\text{CT sekunder}} = 0,5 \times \frac{95}{5} = 9,5 \text{ A}$$

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

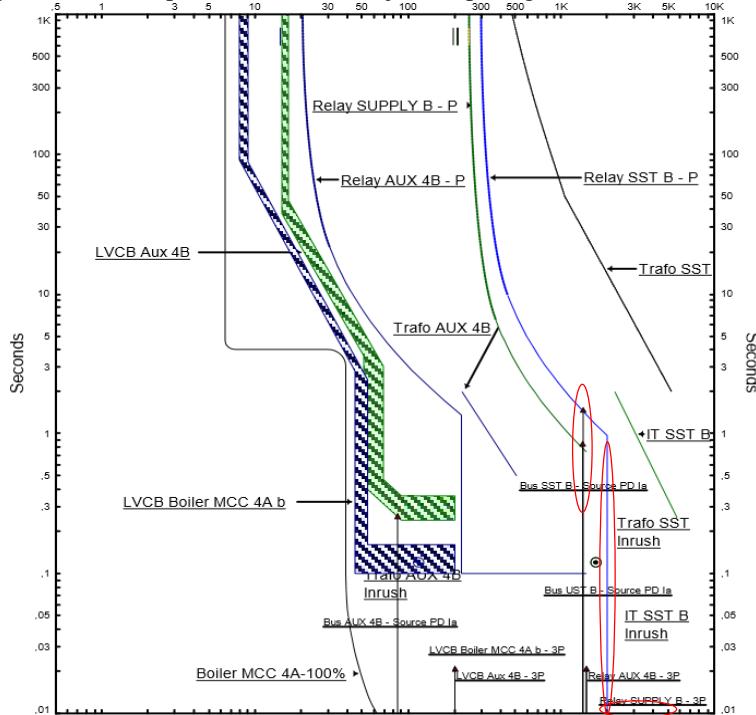
D. Case Dua Tipikal Satu

Single line diagram case dua tipikal satu ditunjukkan dalam gambar 4.15. Case dua tipikal satu merupakan kondisi ketika sistem menggunakan



Gambar 4.15 *Single Line Diagram Case Dua Tipikal Satu*

sumber dari trafo SST, sehingga koordinasi sistem pengaman pada *case* dua tipikal satu ini dari sekunder trafo SST A dengan kapasitas daya sebesar 23 MVA hingga beban motor pada tegangan 0,38 kV. Pada contoh ini diambil salah satu motor yaitu Boiler MCC 4A dengan kapasitas 604 kW. Relay-relay yang akan di koordinasikan dalam *case* dua tipikal satu ini yaitu Relay SST A, relay Supply A, relay Aux 4A, LVCB Aux 4A dan LVCB Boiler MCC 4A. Pada *case* dua tipikal satu ini dapat diterapkan juga untuk motor Boiler MCC 4B. Dan kurva *existing* pada *case* dua tipikal satu akan ditunjukkan pada gambar 4.16



Gambar 4.16 Kurva Koordinasi Arus Lebih *Case* Dua Tipikal Satu (*Existing*)

Pada *case* dua tipikal satu, LVCB Boiler MCC 4A, LVCB Aux 4B, dan relay Aux 4B tidak dilakukan *resetting* karena telah dilakukan *resetting* pada *case* satu tipikal satu. Ketika terjadi arus hubung singkat

hingga nilai maksimal yaitu 33,72 kA pada motor boiler MCC 4A maka relay yang merasakan yaitu LVCB Boiler MCC 4A, LVCB Aux 4B dan relai Aux 4B sebagai *back up* nya. *Arc flash* yang terjadi pada bus Aux 4B dapat dilokalisir oleh LVCB Aux 4B pada 0,34 s. Ketika terjadi arus hubung singkat hingga nilai maksimal yaitu 14,65 kA pada primer trafo AUX 4B maka relay yang bekerja yaitu relay Aux 4B, relay Supply B dan relay SST B. Ketiga relay tersebut yaitu relay Aux 4B, relay Supply B dan relay SST B sebenarnya sudah berkoordinasi, hanya saja *grading time* antara ketiga relay tersebut belum sesuai standar IEEE 242.

Hal ini dikarenakan pada relay Supply B hanya menggunakan *setting inverse* menyebabkan pemadaman *arc flash* yang terjadi pada bus UST B menjadi lebih lama. Nilai *instantaneous pick up* pada relay SST B terlalu besar sehingga ketika terjadi arus hubung singkat maksimum pada bus SST B sebesar 14,65 akan mengenai kurva *inverse* relay SST B sehingga membutuhkan waktu yang lebih lama untuk relay bekerja, juga dalam melokalisir *arc flash* yang terjadi pada bus SST B menjadi lebih lama dan *time delay time delay* pada SST B juga terlalu cepat yaitu 0 s.

Berdasarkan hasil koordinasi relay arus lebih *case* dua tipikal satu seperti ditunjukkan pada gambar 4.16 maka perlu dilakukan *resetting* koordinasi relay arus lebih untuk mempercepat waktu dalam melokalisir gangguan agar *garding time* sesuai standar IEEE 242. Berikut perhitungannya :

a. Relay Supply B

Manufaktur	Mitsubishi
Model	COC4
Kurva	<i>Very Inverse</i>
Rasio CT	2.500/5
Isc max kontribusi bus UST B	14,65 kA
Isc min kontribusi bus UST B	12,53 kA
FLA Supply B	2.535,2 A

Time Overcurrent Pickup

$$\begin{array}{lll}
 1,05 \times \text{FLA Supply B} & < \text{Iset} < & 1,4 \times \text{FLA Supply B} \\
 1,05 \times 2.535,2 \text{ A} & < \text{Iset} < & 1,4 \times 2.535,2 \text{ A} \\
 \frac{2.661,96}{n_{CT}} & < \text{Iset} < & \frac{3.549,28}{n_{CT}} \\
 \frac{2.661,96}{n_{CT}} & < \text{Tap} < & \frac{3.549,28}{n_{CT}}
 \end{array}$$

$\frac{2.661,96}{2.500/5}$	$< \text{Tap} <$	$\frac{3.549,28}{2.500/5}$
$5,32$	$< \text{Tap} <$	$7,09$
Tap dipilih	$= 5,9$	
Pick up range	$= 1 - 12 \text{ Sec} - 5\text{A}$	
Iset dipilih	$= 2.950$	

Time Delay

Pada relay Supply B menggunakan kurva *very inverse*, sehingga nilai *time dial* pada *setting* relay Supply B yaitu

$$T_d = \frac{t \times \left(\left(\frac{I_{SC \text{ kontribusi max}}}{I_{set}} \right)^1 - 1 \right)}{13,5}$$

Ditentukan nilai waktu operasi (t) $= 0,3 \text{ s}$

$$T_d = \frac{0,3 \text{ s} \times \left(\left(\frac{14.650}{2.950} \right)^1 - 1 \right)}{13,5} = 0,09$$

Time dial (T_d) berdasarkan perhitungan merupakan nilai T_d minimum, sehingga pada relay Supply B dipilih $T_d = 1,25$

Instantaneous Pick Up

$1,6 \times \text{FLA Supply B}$	$< I_{set} <$	$0,8 \times I_{SC \text{ MIN BUS UST B}}$
$1,6 \times 2.535,2 \text{ A}$	$< I_{set} <$	$0,8 \times 12.530 \text{ A}$
$4.056,32$	$< I_{set} <$	10.024
$4.056,32$	$< \text{Tap} <$	22.192
$\frac{n_{CT}}{4.056,32}$	$< \text{Tap} <$	$\frac{n_{CT}}{22.192}$
$\frac{n_{CT}}{2.500/5}$	$< \text{Tap} <$	$\frac{n_{CT}}{2.500/5}$
$8,11264$	$< \text{Tap} <$	$44,384$

Tap yang dipilih $= 17$

Pick up range $= 2 - 80 \text{ Sec} - 5\text{A}$

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

b. Relay SST B

Manufaktur	Mitsubishi
Model	COC4
Kurva	<i>Very Inverse</i>
Rasio CT	2.500/5
Isc max bus SST B	14,65 kA
Isc min bus SST B	12,53 kA
FLA Trafo SST B	2.108 A

Time Overcurrent Pickup

1,05 x FLA SST B	< Iset <	1,4 x FLA SST B
1,05 x 2.108A	< Iset <	1,4 x 2.108 A
2.213,4	< Iset <	2.951,2
2.213,4	< Tap <	2.951,2
$\frac{n_{CT}}{2.213,4}$	< Tap <	$\frac{n_{CT}}{2.951,2}$
2.500/5	< Tap <	$\frac{2.500}{5}$
4,4268	< Tap <	5,9024

Tap dipilih = 5,9

Pick up range = 1 – 12 Sec - 5A

Iset dipilih = 2.950

Time Delay

Pada relay SST B menggunakan kurva *very inverse*, sehingga nilai *time dial* pada *setting* relay SST B yaitu

$$T_d = \frac{t \times \left(\left(\frac{I_{SC \text{ kontribusi max}}}{I_{set}} \right)^1 - 1 \right)}{13,5}$$

Ditentukan nilai waktu operasi (t) = 0,5 s

$$T_d = \frac{0,5 \text{ s} \times \left(\left(\frac{14,650}{2,950} \right)^1 - 1 \right)}{13,5} = 0,15$$

Time dial (Td) berdasarkan perhitungan merupakan nilai Td minimum, sehingga pada relay Supply B dipilih Td = 1,5

Instantaneous Pick Up

1,6 x FLA SST B	< Iset <	0,8 x Isc MIN BUS SST B
1,6 x 2.108 A	< Iset <	0,8 x 12.530 A
3.372,8	< Iset <	10.024

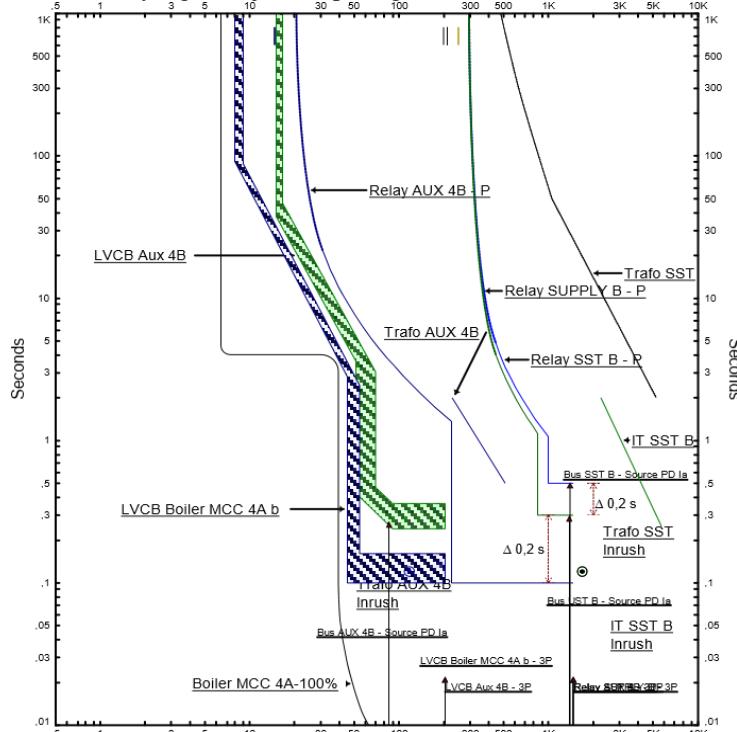
$\frac{3.372,8}{n_{CT}}$	$< \text{Tap} <$	$\frac{10.024}{n_{CT}}$
$\frac{3.372,8}{n_{CT}}$	$< \text{Tap} <$	$\frac{10.024}{n_{CT}}$
$\frac{2.500/5}{2.500/5}$	$< \text{Tap} <$	$\frac{2.500/5}{2.500/5}$
6.7456	$< \text{Tap} <$	20.048

Tap yang dipilih = 20

Pick up range = 2 – 80 Sec – 5A

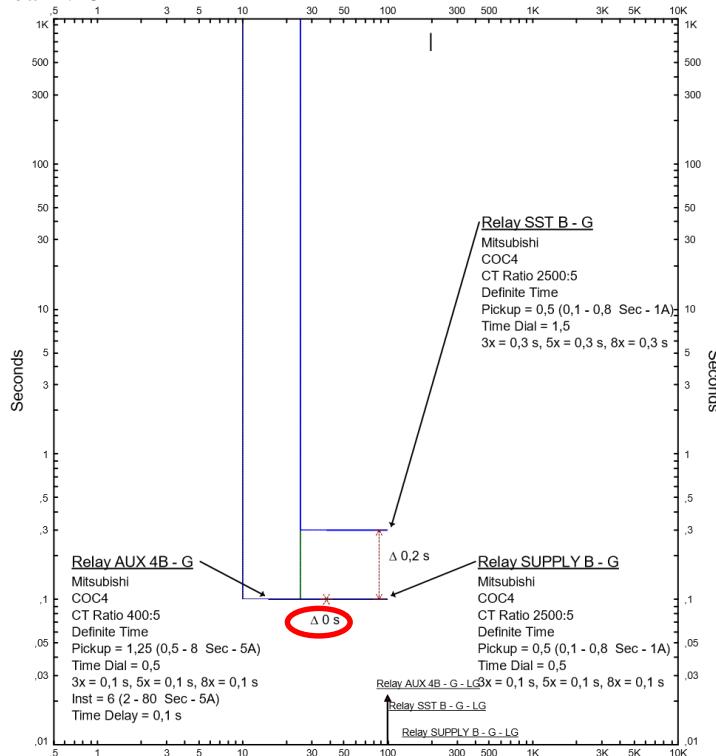
Time Delay = 0,5 s

Berdasarkan hasil perhitungan, maka didapatkan plot *Time Current Curve* (TCC) *resetting* pada *case* dua tipikal satu menggunakan simulasi ETAP 12.6.0 yang ditunjukkan pada gambar 4.17



Gambar 4.17 Plot Time Current Curve (TCC) Resetting Case Dua Tipikal Satu

Berdasarkan hasil *resetting* terlihat bahwa antara kedua LVCB dan ketiga relay sudah terkoordinasi dengan baik dengan *grading time* 0,2 s dan waktu yang diperlukan untuk melokalisir *arc flash* pada bus UST B dan bus SST B menjadi lebih cepat sehingga dapat memperkecil nilai insiden energi yang terjadi yaitu 0,35 s dan 0,55 s. Selanjutnya adalah koordinasi arus lebih *ground fault* pada *case* dua tipikal satu yaitu antara relay Aux 4B, relay Supply B, dan relay SST B. Berikut adalah kurva koordinasi arus lebih *ground fault* *case* dua tipikal satu ditunjukkan pada gambar 4.18



Gambar 4.18 Kurva Koordinasi *Ground Fault Case Dua Tipikal Satu (Existing)*

Berdasarkan plot *Time Current Curve Ground Fault existing case* dua tipikal satu, dapat disimpulkan bahwa antara relay Aux 4B dan relay

Supply B memiliki nilai *time delay* yang sama yaitu 0,1 s, sehingga ketika ada arus hubung singkat *line to ground* maka kedua relay tersebut akan trip bersamaan. Maka dari itu perlu dilakukan *resetting* untuk relay Supply B dan relay SST B. Berikut perhitungannya :

a. Relay Supply B

Manufaktur	Mitsubishi
Model	COC4
Kurva	<i>Definite Time</i>
Rasio CT	2.500/5
Isc L-G	1.000 A

Ground Fault Overcurrent Pickup

$$\begin{array}{lll}
 10\% \times I_{SC L-G} & < Iset < & 50\% \times I_{SC L-G} \\
 10\% \times 1.000 A & < Iset < & 50\% \times 1.000 A \\
 100 & < Iset < & 500 \\
 \frac{100}{n_{CT}} & < Tap < & \frac{500}{n_{CT}} \\
 \frac{100}{100} & < Tap < & \frac{500}{500} \\
 \frac{2.500/5}{2.500/5} & < Tap < & \frac{2.500/5}{2.500/5} \\
 0,2 & < Tap < & 1
 \end{array}$$

$$\text{Tap dipilih} = 0,5$$

$$\text{Pick up range} = 0,1 - 0,8 \text{ Sec} - 1A$$

$$Iset \text{ dipilih} = 250$$

Time Dial

Pada relay Supply 4B menggunakan kurva *definite time*, sehingga nilai *time dial* pada *setting* relay Supply dipilih 1,5 karena menghasilkan *tripping time* 0,3 s

b. Relay SST B

Manufaktur	Mitsubishi
Model	COC4
Kurva	<i>Definite Time</i>
Rasio CT	2.500/5
Isc L-G	1.000 A

Ground Fault Overcurrent Pickup

$10\% \times I_{SC L-G}$	$< Iset <$	$50\% \times I_{SC L-G}$
$10\% \times 1.000 A$	$< Iset <$	$50\% \times 1.000 A$
100	$< Iset <$	500
100	$< Tap <$	500
$\frac{n_{CT}}{n_{CT}}$	$< Tap <$	$\frac{n_{CT}}{n_{CT}}$
100	$< Tap <$	500
$\frac{2.500/5}{2.500/5}$	$< Tap <$	$\frac{2.500/5}{2.500/5}$
0,2	$< Tap <$	1

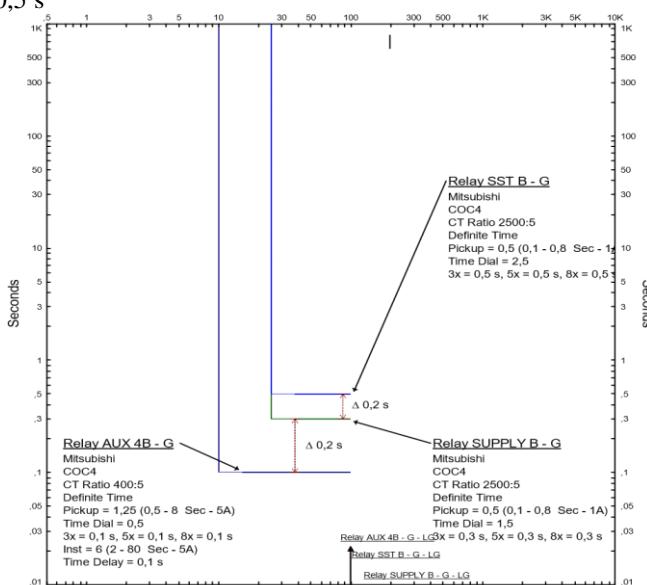
$$\text{Tap dipilih} = 0,5$$

$$\text{Pick up range} = 0,1 - 0,8 \text{ Sec} - 5A$$

$$Iset dipilih = 250$$

Time Dial

Pada SST B menggunakan kurva *definite time*, sehingga nilai *time dial* pada *setting* relay UST A dipilih 2,5 karena menghasilkan *tripping time* 0,5 s

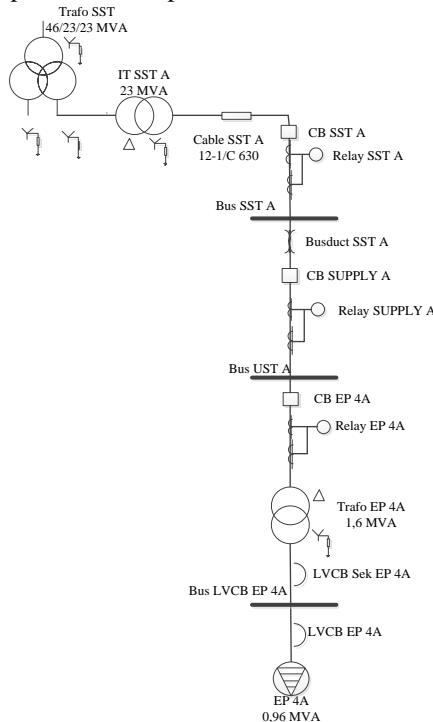


Gambar 4.19 Plot Time Current Curve (TCC) Resetting Ground Fault Case Dua Tipikal Satu

Berdasarkan hasil perhitungan, maka didapatkan plot *Time Current Curve* (TCC) *resetting ground fault* pada *case* dua tipikal satu menggunakan simulasi ETAP 12.6.0 yang ditunjukkan pada gambar 4.19 Dari hasil *resetting ground fault case* dua tipikal satu, dapat disimpulkan bahwa antara relay Aux 4B, relay Supply B dan relay SST B sudah terkoordinasi dengan *grading time* sesuai IEEE 242 yaitu 0,2 s. Ketika ada arus gangguan *line to ground* maka relay yang bekerja terlebih dahulu yaitu relay Aux 4B lalu relay Supplu B lalu relay SST B. Dan ketika kurva relay UST B diubah menjadi *definite time*, maka *tripping time* nya menjadi lebih cepat.

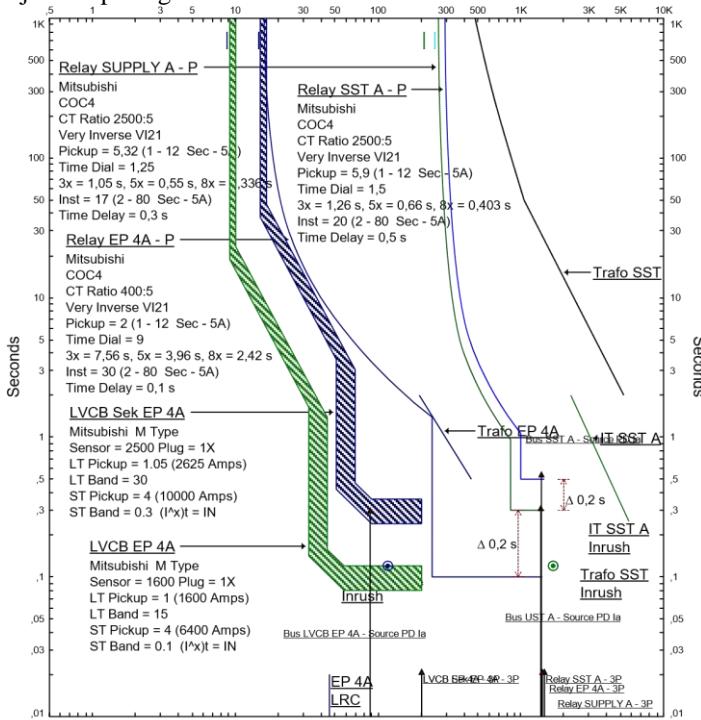
E. Case Dua Tipikal Dua

Single line diagram case dua tipikal dua ditunjukkan dalam gambar 4.20. *Case* dua tipikal dua merupakan kondisi ketika sistem menggunakan



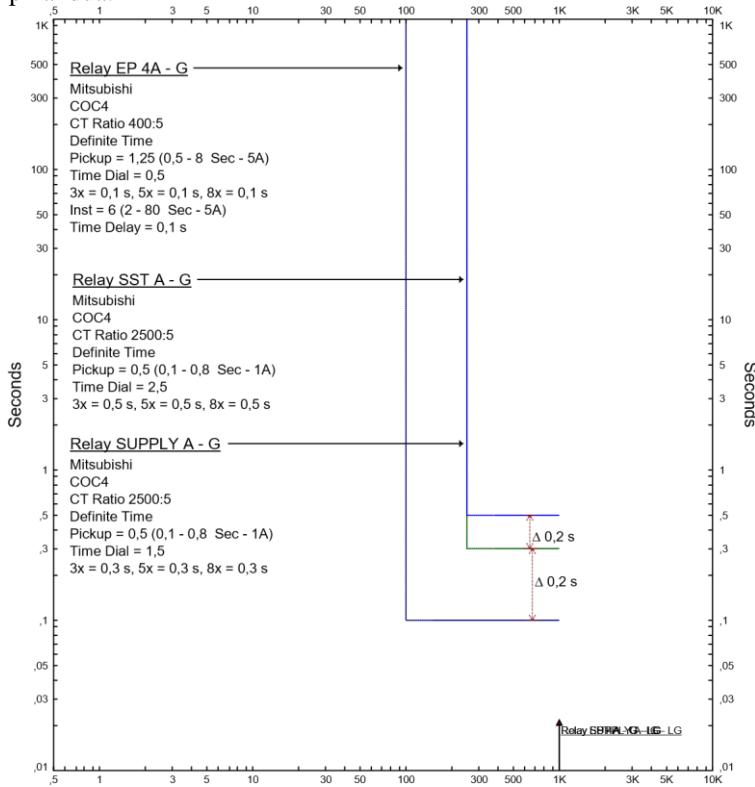
Gambar 4.20 *Single Line Diagram Case* Dua Tipikal Dua

sumber dari trafo SST, sehingga koordinasi sistem pengaman dari sekunder trafo UST dengan kapasitas daya sebesar 23 MVA hingga beban *lumped load* pada tegangan 0,38kV. Dalam contoh ini diambil beban *lumped load* yang digunakan yaitu electrostatic precipitator 4A yang memiliki kapasitas 0,96 MVA. Rele-rele yang akan di koordinasikan dalam *case* dua tipikal dua ini yaitu relay SST A, relay Supply B, relay EP 4A, LVCB Sek EP 4A dan LVCB EP 4A. Pada *case* ini hanya ditampilkan kurva TCC dan tidak dilakukan *resetting* pada semua relay dikarenakan telah dilakukan *resetting* pada *case* sebelumnya. Pada *case* dua tipikal dua ini dapat diterapkan untuk electrostatic precipitator 4B karena memiliki kapasitas yang sama yaitu 0,96 MVA juga beban *lumped load* lainnya. Kurva koordinasi arus lebih *case* dua tipikal dua akan ditunjukkan pada gambar 4.21



Gambar 4.21 Kurva Koordinasi Arus Lebih Case Dua Tipikal Dua
(*Existing*)

Pada *case* dua tipikal dua ini semua relay telah terkoordinasi dengan baik dengan *grading time* 0,2 s karena telah dilakukan *resetting* pada *case* sebelumnya. Ketika terjadi arus hubung singkat hingga nilai maksimum yaitu 33,74 kA pada tegangan 0,38 kV pada beban *lumped load* EP 4A maka relay yang bekerja yaitu LVCB EP 4A dan LVCB Sek Ep 4A. Dan waktu yang diperlukan untuk melokalisir *arc flash* pada bus LVCB EP 4A yaitu 0,34 s. Ketika terjadi arus hubung singkat pada primer trafo EP 4A hingga nilai maksimum yaitu 14,65 kA, relay yang bekerja yaitu relay EP 4A, relay Supply A dan relay SST A. Dan waktu yang diperlukan dalam melokalisir *arc flash* pada bus UST A dan bus SST A yaitu 0,35 s dan 0,55 s. Selanjutnya, dilakukan koordinasi *ground fault* untuk *case* dua tipikal dua.

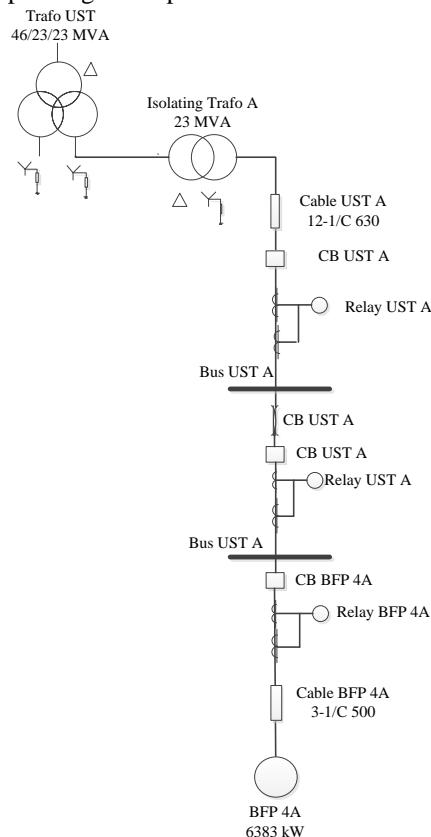


Gambar 4.22 Kurva Koordinasi *Ground Fault Case Dua Tipikal Dua (Existing)*

Berdasarkan plot *Time Current Curve Ground Fault existing case* dua tipikal dua, dapat disimpulkan bahwa antara relay EP 4A, relay Supply A dan relay SST A telah terkoordinasi dengan baik dengan *grading time* 0,2 s. Dan disimulasikan ketika ada arus hubung singkat *line to ground* ($I_{sc, LG}$) sebesar 1.000 A karena NGR yang digunakan 1.000 A, maka relay EP 4A bekerja pada 0,1 s, relay Supply A bekerja pada 0,3 s dan relay SST A bekerja pada 0,5 s.

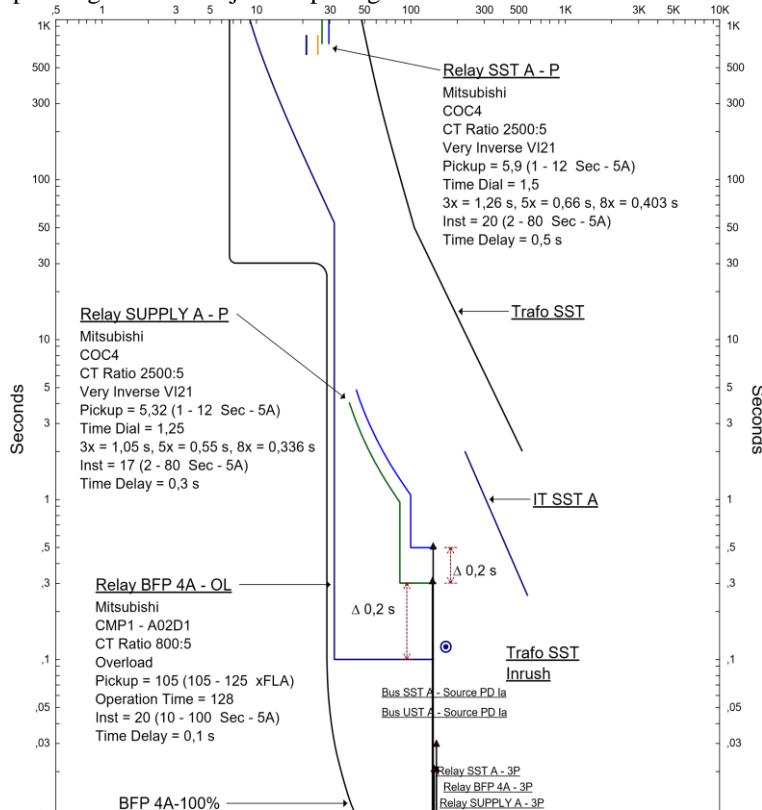
C. Case Dua Tipikal Tiga

Single line diagram case dua tipikal tiga ditunjukkan dalam gambar 4.23. Case dua tipikal tiga merupakan kondisi ketika sistem menggunakan



Gambar 4.23 *Single Line Diagram Case* Dua Tipikal Tiga

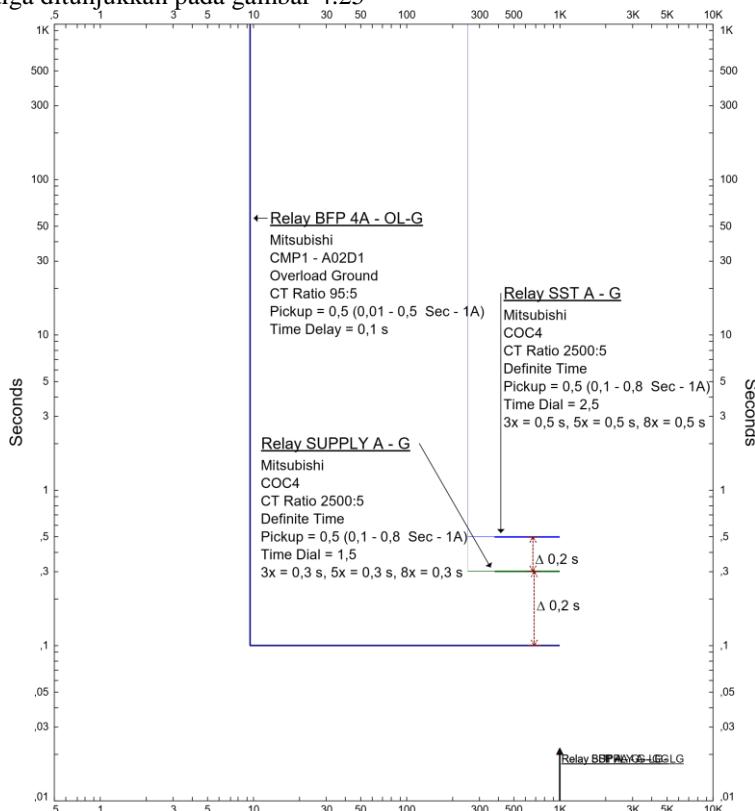
sumber dari trafo SST, sehingga koordinasi sistem pengaman pada *case* dua tipikal tiga ini dari sekunder trafo SST A dengan kapasitas daya sebesar 23 MVA hingga beban motor pada tegangan 6,3 kV. Pada contoh ini diambil salah satu motor yaitu Boiler Feed Pump 4A dengan kapasitas 6383 kW. Relay-relay yang akan di koordinasikan dalam *case* dua tipikal tiga ini yaitu relay SST A, relay Supply A dan relay BFP 4A. Pada *case* dua tipikal tiga ini dapat diterapkan juga untuk motor Boiler Feed Pump 4B dan Boiler Feed Pump 4C. Kurva koordinasi arus lebih *case* dua tipikal tiga akan ditunjukkan pada gambar 4.24



Gambar 4.24 Kurva Koordinasi Arus Lebih Case Dua Tipikal Tiga
(*Existing*)

Pada case dua tipikal tiga ini semua relay telah terkoordinasi dengan baik dengan *grading time* 0,2 s karena telah dilakukan *resetting* pada case sebelumnya. Ketika terjadi arus hubung singkat pada motor BFP 4A hingga nilai maksimum yaitu 14,65 kA, relay yang bekerja yaitu relay BFP 4A, relay Supply A dan relay SST A. Dan waktu yang diperlukan dalam melokalisir *arc flash* pada bus UST A dan bus SST A yaitu 0,35 s dan 0,55 s.

Selanjutnya adalah koordinasi arus lebih *ground fault* pada case dua tipikal tiga yaitu antara relay BFP 4A, relay Supply dan relay SST A. Berikut adalah kurva koordinasi arus lebih *ground fault* case dua tipikal tiga ditunjukkan pada gambar 4.25



Gambar 4.25 Kurva Koordinasi *Ground Fault Case Dua Tipikal Tiga (Existing)*

Berdasarkan plot *Time Current Curve Ground Fault existing case* dua tipikal tiga dapat disimpulkan bahwa antara relay BFP, relay Supply A dan relay SST A sudah terkoordinasi dengan baik dengan *grading time* sesuai standar IEEE 242 yaitu 0,2 s. Dan relay yang bekerja ketika ada arus *line to ground* sebesar 1.000 A yaitu relay BFP 4A lalu relay Supply A lalu relay SST A.

Dengan menggunakan cara yang sama, dapat ditentukan nilai *setting* untuk peralatan yang lain. Berikut akan ditampilkan nilai *resetting* arus lebih dan *ground fault* pada tabel 4.9 hingga tabel 4.12

Tabel 4.9 *Resetting Arus Lebih* pada Peralatan di PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4

Nama Relay	Inverse / Thermal		Instantaneous	
	Tap	Time Dial / Operation Time/LT	Tap	Time Delay
Aux 4A	2,56	11	20	0,1
Aux 4B	2,56	11	20	0,1
LVCB Aux 4A	2.625	30	11.250	0,3
LVCB Aux 4B	2.625	30	11.250	0,3
LVCB Turbin MCC 4A	800	8	6.400	0,1
LVCB Turbin MCC 4B	800	5,5	6.400	0,1
LVCB Boiler MCC 4A	1.250	3,5	7.500	0,1
LVCB Boiler MCC 4B	1.250	3,5	7.500	0,1
LVCB Power Centre 4	400	2	4.000	0,1
LVCB ESB 4	10.000	2	6.000	0,1
BFP 4A	4,607	128	21	0,1
BFP 4B	4,607	128	21	0,1
BFP 4C	4,607	128	21	0,1
CEP 4A	3,675	16	30	0,1
CEP 4B	3,675	16	30	0,1
CWP H	4,368	16	34	0,1

Tabel 4.10 *Resetting* Arus Lebih pada Peralatan di PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 (Lanjutan)

Nama Relay	Inverse / Thermal		Instantaneous	
	Tap	Time Dial / Operation Time/LT	Tap	Time Delay
CWP J	4,368	16	34	0,1
EP 4A	2	9	30	0,1
EP 4B	2	9	30	0,1
LVCB Sek EP 4A	2.625	30	10.000	0,3
LVCB Sek EP 4B	2.625	30	10.000	0,3
LVCB EP 4A	1.600	15	7.200	0,1
LVCB EP 4B	1.600	15	7.200	0,1
FDF 4A	3,78	64	30	0,1
FDF 4B	3,78	64	30	0,1
GRF 4A	2,45	16	20	0,1
GRF 4B	2,45	16	20	0,1
IDF 4A	4,69	240	36	0,1
IDF 4B	4,69	240	36	0,1
MILL 4A	4,76	16	38	0,1
MILL 4B	4,76	16	38	0,1
MILL 4C	4,76	16	38	0,1
MILL 4D	4,76	16	38	0,1
MILL 4E	4,76	16	38	0,1
PAF 4A	3,675	128	28	0,1
PAF	3,675	128	28	0,1
SST A	5,9	1,5	20	0,5
SST B	5,9	1,5	20	0,5
Supply A	5,32	1,25	17	0,3
Supply B	5,32	1,25	17	0,3
UST A	5,9	3	19	0,3
UST B	5,9	3	19	0,3

Tabel 4.11 *Resetting Ground Fault* pada Peralatan di PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4

Nama Peralatan	<i>Ground Fault Overcurrent</i>		<i>Instantaneous</i>	
	Tap	Time Dial / Operation Time	Tap	Time Delay
Aux 4A	1,25	0,5	6	0,1
Aux 4B	1,25	0,5	6	0,1
LVCB Aux 4A	-	-	-	-
LVCB Aux 4B	-	-	-	-
LVCB Turbin MCC 4A	-	-	-	-
LVCB Turbin MCC 4B	-	-	-	-
LVCB Boiler MCC 4A	-	-	-	-
LVCB Boiler MCC 4B	-	-	-	-
LVCB Power Centre 4	-	-	-	-
LVCB Aux 4B	-	-	-	-
LVCB Turbin MCC 4A	-	-	-	-
LVCB Turbin MCC 4B	-	-	-	-
LVCB Boiler MCC 4A	-	-	-	-
LVCB Boiler MCC 4B	-	-	-	-
LVCB Power Centre 4	-	-	-	-
LVCB ESB 4	-	-	-	-
BFP 4A	-	-	0,5	0,1
BFP 4B	-	-	0,5	0,1
BFP 4C	-	-	0,5	0,1
CEP 4A	-	-	0,5	0,1
CEP 4B	-	-	0,5	0,1

Tabel 4.12 *Resetting Ground Fault* pada Peralatan di PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 (Lanjutan)

Nama Peralatan	<i>Ground Fault Overcurrent</i>		<i>Instantaneous</i>	
	Tap	Time Dial / Operation Time	Tap	Time Delay
CWP H	-	-	0,5	0,1
CWP J	-	-	0,5	0,1
EP 4A	1,25	0,5	6	0,1
EP 4B	1,25	0,5	6	0,1
LVCB Sek EP 4A	-	-	-	-
LVCB Sek EP 4B	-	-	-	-
LVCB EP 4A	-	-	-	-
LVCB EP 4B	-	-	-	-
FDF 4A	-	-	0,5	0,1
FDF 4B	-	-	0,5	0,1
GRF 4A	-	-	0,5	0,1
GRF 4B	-	-	0,5	0,1
IDF 4A	-	-	0,5	0,1
IDF 4B	-	-	0,5	0,1
MILL 4A	-	-	0,5	0,1
MILL 4B	-	-	0,5	0,1
MILL 4C	-	-	0,5	0,1
MILL 4D	-	-	0,5	0,1
MILL 4E	-	-	0,5	0,1
PAF 4A	-	-	0,5	0,1
PAF	-	-	0,5	0,1
SST A	0,5	2,5	-	-
SST B	0,5	2,5	-	-
Supply A	0,5	1,5	-	-
Supply B	0,5	1,5	-	-
UST A	0,5	1,5	-	-
UST B	0,5	1,5	-	-

4.3 Hasil Simulasi Insiden Energi *Arc Flash* Setelah Dilakukan *Resetting*

Setelah dilakukan *resetting* koordinasi relay arus lebih dan relay gangguan tanah terhadap *case* satu dan *case* dua menggunakan simulasi

ETAP 12.6.0, maka besar insiden energi *arc flash* berdasarkan simulasi akan ditunjukkan pada tabel 4.13 hingga tabel 4.15

Tabel 4.13 Nilai Insiden Energi *Case* Satu Setelah dilakukan *Resetting* Berdasarkan Simulasi ETAP 12.6.0

Bus ID	Arus <i>arching</i> (kA)	Arus <i>bolted</i> (kA)	AFB	Insiden Energi (cal/cm ²)	FCT (s)	Kategori
Bus UST A	24,74	25,91	12,72	15,55	0,35	Level 2
Bus UST B	24,77	25,94	12,74	15,57	0,35	Level 2
Bus EP 4A	17,03	39,93	2,68	21,83	0,37	Level 2
Bus EP 4B	17,03	39,93	2,68	21,83	0,37	Level 2
Bus Aux 4A	18,71	44,93	2,89	24,77	0,379	Level 2
Bus Aux 4B	19,095	46,08	2,94	25,44	0,381	Level 3

Tabel 4.14 Nilai Insiden Energi *Case* Dua Setelah dilakukan *Resetting* Berdasarkan Simulasi ETAP 12.6.0

Bus ID	Arus <i>arching</i> (kA)	Arus <i>bolted</i> (kA)	AFB	Insiden Energi (cal/cm ²)	FCT (s)	Kategori
Bus UST A	25,2	26,4	12,98	15,86	0,35	Level 2
Bus UST B	25,24	26,43	13	15,88	0,35	Level 2

Tabel 4.15 Nilai Insiden Energi *Case* Dua Setelah dilakukan *Resetting* Berdasarkan Simulasi ETAP 12.6.0 (Lanjutan)

Bus ID	Arus <i>arching</i> (kA)	Arus <i>bolted</i> (kA)	AFB	Insiden Energi (cal/cm ²)	FCT (s)	Kategori
Bus SST A	25,2	26,4	20,65	24,92	0,55	Level 2
Bus SST B	25,24	26,43	20,69	24,96	0,55	Level 2
Bus EP 4A	17,05	39,98	2,68	21,82	0,369	Level 2
Bus EP 4B	17,05	39,99	2,68	21,82	0,369	Level 2
Bus Aux 4A	18,73	44,98	2,89	24,76	0,378	Level 2
Bus Aux 4B	19,11	46,13	2,94	25,43	0,38	Level 3

Berdasarkan hasil simulasi *arc flash* terlihat bahwa setelah dilakukan *resetting* nilai insiden energi *arc flash* mengalami penurunan ke level dua dan level tiga, baik pada *case* satu maupun pada *case* dua. Hal ini dikarenakan pada saat *resetting tripping time* dibuat lebih cepat dan pada relay UST A, relay UST B, relay supply A, relay supply B, relay SST A, dan relay SST B, LVCB Sek EP 4A, LVCB Sek EP 4B, LVCB Aux 4A, LVCB Aux 4B ditambahkan *instantaneous*. Sehingga waktu kerja relay dalam melokalisir gangguan menjadi lebih cepat dan nilai insiden energy *arc flash* menjadi lebih kecil.

4.3.1 Perhitungan Insiden Energi *Arc Flash* Setelah Dilakukan *Resetting* Berdasarkan Standar IEEE 1584-2002

Setelah didapatkan nilai insiden energi *arc flash* dengan simulasi menggunakan ETAP 12.6.0, nilai insiden energi *arc flash* juga dapat dilakukan perhitungan berdasarkan standar IEEE 1584-2002 sesuai

persamaan (2.22) untuk tegangan 6,3 kV yang telah dibahas pada bab sebelumnya yaitu

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

Pada pemakaian sendiri PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 bekerja pada tegangan sistem 6,3 kV untuk *switchgear ungrounded system*, sehingga diketahui nilai C_f yaitu 1 karena sistem bekerja pada tegangan diatas 1 kV, D yaitu 910 mm, X yaitu 0,973 karena *switchgear* pada 6,3 kV, K_1 yaitu -0,555, K_2 yaitu 0 dan G yaitu 153 mm. Berdasarkan data yang telah dimiliki, maka dapat dilakukan perhitungan sesuai persamaan (2.22)

$$\begin{aligned} E &= 1x(1,00929 I_{bf}^{0,983})^{1,081} 10^{(-0,555+0+(0,0011 \times 153))} \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610}{910}\right)^{0,973} \\ E &= 1x(1,00929 I_{bf}^{0,983})^{1,081} 10^{(-0,555+0+(0,0011 \times 153))} \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610}{910}\right)^{0,973} \\ E &= 1,40472 \times I_{bf}^{1,062623} \times t \end{aligned} \quad (4.1)$$

Dan nilai insiden energi *arc flash* untuk tegangan dibawah 1 kV juga dapat dilakukan perhitungan berdasarkan standar IEEE 1584-2002 sesuai persamaan (2.23)

$$E = C_f (10^{(K+0,0966 V+0,000526G)} \times I_{bf}^{(0,662+0,5588V-0,00304G)})^{1,081} \times 10^{(K_1+K_2+0,0011G)} \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610}{D}\right)^x$$

Pada pemakaian sendiri PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 dengan tegangan sistem 0,38 kV untuk *MCC grounded system*, sehingga diketahui nilai C_f yaitu 1,5 karena sistem bekerja pada tegangan dibawah 1 kV, D yaitu 455 mm, X yaitu 1,641 karena *MCC and panel*, K_1 yaitu -0,555, K_2 yaitu -0,113, G yaitu 25 mm, K yaitu -0,097 dan V yaitu 0,38. Berdasarkan data yang telah dimiliki, maka dapat dilakukan perhitungan sesuai persamaan (2.22)

$$\begin{aligned} E &= 1,5 \times (10^{(-0,097+(0,0966 \times 0,38)+(0,000526 \times 25))})^{1,081} \times \\ (I_{bf}^{(0,662+(0,5588 \times 0,38)-(0,00304 \times 25))})^{1,081} &\times 10^{(-0,555-0,113+(0,0011 \times 25))} \\ &\times \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610}{455}\right)^{1,641} \\ E &= 1,5 \times (10^{-0,047142})^{1,081} \times (I_{bf}^{0,798344})^{1,081} \times 10^{-0,6405} \times 8,0891 \times t \\ E &= 1,5 \times 10^{-0,051} \times I_{bf}^{0,863} \times 10^{-0,6405} \times 8,0891 \times t \\ E &= 2,469 \times I_{bf}^{0,863} \times t \end{aligned} \quad (4.2)$$

Dengan menggunakan persamaan (4.1) dan (4.2), maka nilai insiden energi untuk masing-masing bus pada *case* satu dan *case* dua yaitu

a. *Case* Satu

Bus UST A

$$I_{bf} = 25,91 \text{ kA} ; t = 0,35$$

$$\begin{aligned} E &= 1,40472 \times 25,91^{1,062623} \times 0,35 \\ E &= 15,618 \text{ cal/cm}^2 \end{aligned}$$

Bus UST B

$$I_{bf} = 25,94 \text{ kA} ; t = 0,35$$

$$\begin{aligned} E &= 1,40472 \times 25,94^{1,062623} \times 0,3 \\ E &= 15,638 \text{ cal/cm}^2 \end{aligned}$$

Bus EP 4A

$$I_{bf} = 39,93 \text{ kA} ; t = 0,37$$

$$\begin{aligned} E &= 2,469 \times 39,93^{0,863} \times 0,37 \\ E &= 22,011 \text{ cal/cm}^2 \end{aligned}$$

Bus EP 4B

$$I_{bf} = 39,93 \text{ kA} ; t = 0,37$$

$$\begin{aligned} E &= 2,469 \times 39,93^{0,863} \times 0,37 \\ E &= 22,011 \text{ cal/cm}^2 \end{aligned}$$

Bus Aux 4A

$$I_{bf} = 44,93 \text{ kA} ; t = 0,379$$

$$\begin{aligned} E &= 2,469 \times 44,93^{0,863} \times 0,379 \\ E &= 24,963 \text{ cal/cm}^2 \end{aligned}$$

Bus Aux 4B

$$I_{bf} = 46,08 \text{ kA} ; t = 0,381$$

$$\begin{aligned} E &= 2,469 \times 46,08^{0,863} \times 0,381 \\ E &= 25,648 \text{ cal/cm}^2 \end{aligned}$$

b. *Case* Dua

Bus UST A

$$I_{bf} = 26,4 \text{ kA} ; t = 0,35$$

$$\begin{aligned} E &= 1,40472 \times 26,4^{1,062623} \times 0,35 \\ E &= 15,933 \text{ cal/cm}^2 \end{aligned}$$

Bus UST B

$I_{bf} = 26,43 \text{ kA}$; $t = 0,35$

$$E = 1,40472 \times 26,43^{1,062623} \times 0,35$$

$$E = 15,952 \text{ cal/cm}^2$$

Bus SST A

$I_{bf} = 26,4 \text{ kA}$; $t = 0,55$

$$E = 1,40472 \times 26,4^{1,062623} \times 0,55$$

$$E = 25,037 \text{ cal/cm}^2$$

Bus SST B

$I_{bf} = 26,43 \text{ kA}$; $t = 0,55$

$$E = 1,40472 \times 26,43^{1,062623} \times 0,55$$

$$E = 25,067 \text{ cal/cm}^2$$

Bus EP 4A

$I_{bf} = 39,98 \text{ kA}$; $t = 0,369$

$$E = 2,469 \times 39,98^{0,863} \times 0,369$$

$$E = 21,975 \text{ cal/cm}^2$$

Bus EP 4B

$I_{bf} = 39,99 \text{ kA}$; $t = 0,369$

$$E = 2,469 \times 39,99^{0,863} \times 0,369$$

$$E = 21,98 \text{ cal/cm}^2$$

Bus Aux 4A

$I_{bf} = 44,98 \text{ kA}$; $t = 0,378$

$$E = 2,469 \times 44,98^{0,863} \times 0,378$$

$$E = 24,921 \text{ cal/cm}^2$$

Bus Aux 4B

$I_{bf} = 46,13 \text{ kA}$; $t = 0,38$

$$E = 2,469 \times 46,13^{0,863} \times 0,38$$

$$E = 25,604 \text{ cal/cm}^2$$

4.3.2 Perhitungan Insiden Energi *Arc Flash* Setelah Dilakukan Resetting Menggunakan Metode Modifikasi

Besarnya nilai insiden energi *arc flash* menggunakan metode modifikasi bergantung pada besarnya kontribusi arus hubung singkat dari masing-masing peralatan seperti motor induksi berdasarkan kapasitasnya selama periode terjadinya hubung singkat tersebut, dan waktu yang dibutuhkan *circuit breaker* dalam melokalisir gangguan. Dalam perhitungan nilai insiden energi *arc flash* menggunakan metode modifikasi ini dikelompokkan ke dalam beberapa domain waktu seperti yang ditunjukkan pada tabel 5. Berikut perhitungan nilai insiden energi *arc flash* pada masing-masing bus dalam *case satu* dan *case dua* :

a. *Case Satu*

Bus UST A (FCT = 0,35 s)

Domain waktu 0-0,035 detik

$$E_{0,035} = 1,40472 \times (0,528 + 0,262 + 0,262 + 3,15 + 3,15 + 0,371 + 0,371 + 0,944 + 0,944 + 0,35 + 1,05 + 0,321 + 14,22)^{1,062623} \times 0,035$$

$$E_{0,035} = 1,5627 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$E_{0,045} = 1,40472 \times (0,244 + 0,105 + 0,105 + 2,1 + 2,1 + 0,149 + 0,149 + 0,63 + 0,63 + 0,14 + 0,7 + 0,139 + 14,16)^{1,062623} \times 0,045$$

$$E_{0,045} = 1,6348 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,35 detik

$$E_{0,22} = 1,40472 \times (0,528 + 0,262 + 0,262 + 3,15 + 3,15 + 0,371 + 0,371 + 0,944 + 0,944 + 0,35 + 1,05 + 0,321 + 14,22)^{1,062623} \times 0,27$$

$$E_{0,22} = 12,055 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi Bus UST A

$$E_{\text{total}} = E_{0,035} + E_{0,045} + E_{0,22}$$

$$E_{\text{total}} = 1,5627 + 1,6348 + 12,055$$

$$E_{\text{total}} = 15,2525 \text{ cal/cm}^2$$

Bus UST B (FCT = 0,35 s)

Domain waktu 0-0,035 detik

$$E_{0,035} = 1,40472 \times (0,321 + 1,05 + 0,35 + 0,944 + 0,944 + 1,81 + 1,81 + 3,15 + 0,262 + 0,262 + 0,262 + 0,572 + 14,22)^{1,062623} \times 0,035$$

$$E_{0,035} = 1,5649 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$E_{0,045} = 1,40472 \times (0,139 + 0,7 + 0,14 + 0,63 + 0,63 + 1,21 + 1,21 + 2,1 + 0,105 + 0,105 + 0,105 + 0,268 + 14,15)^{1,062623} \times 0,045$$

$$E_{0,045} = 1,5739 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,35 detik

$$E_{0,22} = 1,40472 \times (0,321 + 1,05 + 0,35 + 0,944 + 0,944 + 1,81 + 1,81 + 3,15 + 0,262 + 0,262 + 0,262 + 0,572 + 14,22)^{1,062623} \times 0,27$$

$$E_{0,22} = 12,0718 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi Bus UST B

$$E_{\text{total}} = E_{0,035} + E_{0,045} + E_{0,27}$$

$$E_{\text{total}} = 1,5649 + 1,5739 + 12,0718$$

$$E_{\text{total}} = 15,2106 \text{ cal/cm}^2$$

Bus EP 4A (FCT = 0,37 s)

Domain waktu 0-0,035 detik

$$E_{0,035} = 2,469 \times (5,83 + 34,25)^{0,863} \times 0,035$$

$$E_{0,035} = 2,0889 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$E_{0,045} = 2,469 \times (2,33 + 33,66)^{0,863} \times 0,045$$

$$E_{0,045} = 2,4475 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,37 detik

$$E_{0,29} = 2,469 \times (5,83 + 34,25)^{0,863} \times 0,29$$

$$E_{0,29} = 17,308 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi Bus EP 4A

$$E_{\text{total}} = E_{0,035} + E_{0,045} + E_{0,29}$$

$$E_{\text{total}} = 2,0889 + 2,4475 + 17,308$$

$$E_{\text{total}} = 21,8444 \text{ cal/cm}^2$$

Bus EP 4B (FCT = 0,37 s)

Domain waktu 0-0,035 detik

$$E_{0,035} = 2,469 \times (5,83 + 34,25)^{0,863} \times 0,035$$

$$E_{0,035} = 2,0889 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$E_{0,045} = 2,469 \times (2,33 + 33,68)^{0,863} \times 0,045$$

$$E_{0,045} = 2,4487 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,37 detik

$$E_{0,29} = 2,469 \times (5,83 + 34,25)^{0,863} \times 0,29$$

$$E_{0,29} = 17,308 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi Bus EP 4B

$$E_{\text{total}} = E_{0,035} + E_{0,045} + E_{0,26}$$

$$E_{\text{total}} = 2,0889 + 2,4487 + 17,308$$

$$E_{\text{total}} = 21,8456 \text{ cal/cm}^2$$

Bus Aux 4A (FCT = 0,379 s)

Domain waktu 0-0,035 detik

$$E_{0,035} = 2,469 \times (4,99 + 3,03 + 2,8 + 34,22)^{0,863} \times 0,035$$

$$E_{0,035} = 2,3102 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$E_{0,045} = 2,469 \times (2 + 1,21 + 1,12 + 33,64)^{0,863} \times 0,045$$

$$E_{0,045} = 2,5632 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,379 detik

$$E_{0,299} = 2,469 \times (4,99 + 3,03 + 2,8 + 34,22)^{0,863} \times 0,299$$

$$E_{0,299} = 19,7355 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi Bus Aux 4A

$$E_{\text{total}} = E_{0,035} + E_{0,045} + E_{0,26}$$

$$E_{\text{total}} = 2,3102 + 2,5632 + 19,7355$$

$$E_{\text{total}} = 24,6089 \text{ cal/cm}^2$$

Bus Aux 4B (FCT = 0,381 s)

Domain waktu 0-0,035 detik

$$E_{0,035} = 2,469 \times (1,12 + 5,41 + 5,41 + 34,22)^{0,863} \times 0,035$$

$$E_{0,035} = 2,3597 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$E_{0,045} = 2,469 \times (0,448 + 2,16 + 2,16 + 33,66)^{0,863} \times 0,045$$

$$E_{0,045} = 2,5899 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,34 detik

$$E_{0,301} = 2,469 \times (1,12 + 5,41 + 5,41 + 34,22)^{0,863} \times 0,301$$

$$E_{0,301} = 20,2931 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi Bus Aux 4B

$$E_{\text{total}} = E_{0,035} + E_{0,045} + E_{0,301}$$

$$E_{\text{total}} = 2,3597 + 2,5899 + 20,2931$$

$$E_{\text{total}} = 25,2427 \text{ cal/cm}^2$$

b. *Case Dua*

Bus UST A

Domain waktu 0-0,035 detik

$$E_{0,035} = 1,40472 \times (0,528 + 0,262 + 0,262 + 3,15 + 3,15 + 0,371 + 0,371 + 0,944 + 0,944 + 0,35 + 1,05 + 0,321 + 14,72)^{1,062623} \times 0,035$$

$$E_{0,035} = 1,5947 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$E_{0,045} = 1,40472 \times (0,244 + 0,105 + 0,105 + 2,1 + 2,1 + 0,149 + 0,149 + 0,63 + 0,63 + 0,14 + 0,7 + 0,139 + 14,65)^{1,062623} \times 0,045$$

$$E_{0,045} = 1,6747 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,35 detik

$$E_{0,22} = 1,40472 \times (0,528 + 0,262 + 0,262 + 3,15 + 3,15 + 0,371 + 0,371 + 0,944 + 0,944 + 0,35 + 1,05 + 0,321 + 14,72)^{1,062623} \times 0,27$$

$$E_{0,22} = 12,3022 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi Bus UST A

$$E_{\text{total}} = E_{0,035} + E_{0,045} + E_{0,27}$$

$$E_{\text{total}} = 1,5947 + 1,6747 + 12,3022$$

$$E_{\text{total}} = 15,5716 \text{ cal/cm}^2$$

Bus UST B (FCT = 0,35 s)

Domain waktu 0-0,035 detik

$$E_{0,035} = 1,40472 \times (0,321 + 1,05 + 0,35 + 0,944 + 0,944 + 1,81 + 1,81 + 3,15 + 0,262 + 0,262 + 0,262 + 0,572 + 14,72)^{1,062623} \times 0,035$$

$$E_{0,035} = 1,5969 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$E_{0,045} = 1,40472 \times (0,139 + 0,7 + 0,14 + 0,63 + 0,63 + 1,21 + 1,21 + 2,1 + 0,105 + 0,105 + 0,105 + 0,268 + 14,65)^{1,062623} \times 0,045$$

$$E_{0,045} = 1,687 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,35 detik

$$E_{0,22} = 1,40472 \times (0,321 + 1,05 + 0,35 + 0,944 + 0,944 + 1,81 + 1,81 + 3,15 + 0,262 + 0,262 + 0,262 + 0,572 + 14,72)^{1,062623} \times 0,27$$

$$E_{0,22} = 12,3191 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi Bus UST B

$$E_{\text{total}} = E_{0,035} + E_{0,045} + E_{0,22}$$

$$E_{\text{total}} = 1,5969 + 1,687 + 12,3191$$

$$E_{\text{total}} = 15,603 \text{ cal/cm}^2$$

Bus SST A (FCT = 0,55 s)

Domain waktu 0-0,035 detik

$$E_{0,035} = 1,40472 \times (11,68 + 14,72)^{1,062623} \times 0,035$$

$$E_{0,035} = 1,5933 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$E_{0,045} = 1,40472 \times (7,18 + 14,65)^{1,062623} \times 0,045$$

$$E_{0,045} = 1,6738 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,55 detik

$$E_{0,42} = 1,40472 \times (11,68 + 14,72)^{1,062623} \times 0,47$$

$$E_{0,42} = 21,3952 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi Bus SST A

$$E_{\text{total}} = E_{0,035} + E_{0,045} + E_{0,22}$$

$$E_{\text{total}} = 1,5933 + 1,6738 + 21,3952$$

$$E_{\text{total}} = 24,6623 \text{ cal/cm}^2$$

Bus SST B (FCT = 0,55 s)

Domain waktu 0-0,035 detik

$$E_{0,035} = 1,40472 \times (11,72 + 14,72)^{1,062623} \times 0,035$$

$$E_{0,035} = 1,5958 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$E_{0,045} = 1,40472 \times (7,32 + 14,65)^{1,062623} \times 0,045$$

$$E_{0,045} = 1,6852 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,55 detik

$$E_{0,42} = 1,40472 \times (11,72 + 14,72)^{1,062623} \times 0,47$$

$$E_{0,42} = 21,4297 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi Bus SST B

$$E_{\text{total}} = E_{0,035} + E_{0,045} + E_{0,22}$$

$$E_{\text{total}} = 1,5958 + 1,6852 + 21,4297$$

$$E_{\text{total}} = 24,7107 \text{ cal/cm}^2$$

Bus EP 4A (FCT = 0,369 s)

Domain waktu 0-0,035 detik

$$E_{0,035} = 2,469 \times (5,83 + 34,3)^{0,863} \times 0,035$$

$$E_{0,035} = 2,0911 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$E_{0,045} = 2,469 \times (2,33 + 33,74)^{0,863} \times 0,045$$

$$E_{0,045} = 2,4522 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,369 detik

$$E_{0,289} = 2,469 \times (5,83 + 34,3)^{0,863} \times 0,289$$

$$E_{0,289} = 17,2668 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi Bus EP 4A

$$E_{\text{total}} = E_{0,035} + E_{0,045} + E_{0,289}$$

$$E_{\text{total}} = 2,0911 + 2,4522 + 17,2668$$

$$E_{\text{total}} = 21,8101 \text{ cal/cm}^2$$

Bus EP 4B (FCT = 0,369 s)

Domain waktu 0-0,035 detik

$$E_{0,035} = 2,469 \times (5,83 + 34,31)^{0,863} \times 0,035$$

$$E_{0,035} = 2,0916 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$E_{0,045} = 2,469 \times (2,33 + 33,76)^{0,863} \times 0,045$$

$$E_{0,045} = 2,4533 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,369 detik

$$E_{0,289} = 2,469 \times (5,83 + 34,31)^{0,863} \times 0,289$$

$$E_{0,289} = 17,2705 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi Bus EP 4B

$$E_{\text{total}} = E_{0,035} + E_{0,045} + E_{0,289}$$

$$E_{\text{total}} = 2,0916 + 2,4533 + 17,2705$$

$$E_{\text{total}} = 21,8154 \text{ cal/cm}^2$$

Bus Aux 4A (FCT = 0,378 s)

Domain waktu 0-0,035 detik

$$E_{0,035} = 2,469 \times (4,99 + 3,03 + 2,8 + 34,28)^{0,863} \times 0,035$$

$$E_{0,035} = 2,3128 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$E_{0,045} = 2,469 \times (2 + 1,21 + 1,12 + 33,72)^{0,863} \times 0,045$$

$$E_{0,045} = 2,5679 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,378 detik

$$E_{0,298} = 2,469 \times (4,99 + 3,03 + 2,8 + 34,28)^{0,863} \times 0,298$$

$$E_{0,298} = 19,6921 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi Bus Aux 4A

$$E_{\text{total}} = E_{0,035} + E_{0,045} + E_{0,298}$$

$$E_{\text{total}} = 2,3128 + 2,5679 + 19,6921$$

$$E_{\text{total}} = 24,5728 \text{ cal/cm}^2$$

Bus Aux 4B (FCT = 0,38 s)

Domain waktu 0-0,035 detik

$$E_{0,035} = 2,469 \times (1,12 + 5,41 + 5,41 + 34,28)^{0,863} \times 0,035$$

$$E_{0,035} = 2,3623 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$E_{0,045} = 2,469 \times (0,448 + 2,16 + 2,16 + 33,74)^{0,863} \times 0,045$$

$$E_{0,045} = 2,5946 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,38 detik

$$E_{0,3} = 2,469 \times (1,12 + 5,41 + 5,41 + 34,28)^{0,863} \times 0,3$$

$$E_{0,3} = 20,2484 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi Bus Aux 4B

$$E_{\text{total}} = E_{0,035} + E_{0,045} + E_{0,26}$$

$$E_{\text{total}} = 2,3623 + 2,5946 + 20,2484$$

$$E_{\text{total}} = 25,2053 \text{ cal/cm}^2$$

Setelah dilakukan perhitungan nilai insiden energi *arc flash* dengan metode modifikasi, maka dapat dibandingkan dengan nilai insiden energi *arc flash* berdasarkan standar IEEE 1584-2002 yang akan ditunjukkan pada tabel 4.16 hingga tabel 4.18

Tabel 4.16 Perbandingan Perhitungan Nilai Insiden Energi *Arc Flash* sesuai Standar IEEE 1584-2002 dengan Metode Modifikasi pada Case Satu

Bus ID	Insiden Energi (cal/cm ²) IEEE 1584-2002	Kategori	Insiden Energi (cal/cm ²) Modifikasi	Kategori
Bus UST A	15,618	Level 2	15,2525	Level 2
Bus UST B	15,638	Level 2	15,2106	Level 2
Bus EP 4A	22,011	Level 2	21,8444	Level 2
Bus EP 4B	22,011	Level 2	21,8456	Level 2
Bus Aux 4A	24,963	Level 2	24,6089	Level 2
Bus Aux 4B	25,648	Level 3	25,2427	Level 3

Tabel 4.17 Perbandingan Perhitungan Nilai Insiden Energi *Arc Flash* sesuai Standar IEEE 1584-2002 dengan Metode Modifikasi pada Case Dua

Bus ID	Insiden Energi (cal/cm ²) IEEE 1584-2002	Kategori	Insiden Energi (cal/cm ²) Modifikasi	Kategori
Bus UST A	15,933	Level 2	15,5716	Level 2
Bus UST B	15,952	Level 2	15,603	Level 2
Bus SST A	25,037	Level 3	24,6623	Level 3
Bus SST B	25,067	Level 3	24,7107	Level 3
Bus EP 4A	21,975	Level 2	21,8101	Level 2

Tabel 4.18 Perbandingan Perhitungan Nilai Insiden Energi *Arc Flash* sesuai Standar IEEE 1584-2002 dengan Metode Modifikasi pada Case Dua (Lanjutan)

Bus ID	Insiden Energi (cal/cm ²)	Kategori	Insiden Energi (cal/cm ²)	Kategori
	IEEE 1584- 2002		Modifikasi	
Bus EP 4B	21,98	Level 2	21,8154	Level 2
Bus Aux 4A	24,921	Level 2	24,5728	Level 2
Bus Aux 4B	25,604	Level 3	25,2053	Level 3

Berdasarkan tabel 4.16 hingga tabel 4.18 dapat disimpulkan bahwa nilai insiden energi dengan perhitungan modifikasi lebih kecil dibandingkan dengan standar IEEE 1584-2002. Hal ini karena dengan metode modifikasi dipertimbangkan berkurangnya arus kontribusi dari setiap beban terhadap periode waktu hubung singkat dan juga waktu pemutusan *circuit breaker* dalam melokalisir gangguan.

4.4 Perhitungan FPB Berdasarkan Hasil Perhitungan Insiden Energi *Arc Flash*

Setelah didapatkan nilai insiden energi *arc flash* sesuai standar IEEE 1584-2002 dan dengan metode modifikasi, selanjutnya dapat dihitung jarak aman bagi pekerja terhadap peralatan bertegangan. Nilai jarak aman atau *Flash Protection Boundary* (FPB) dapat dihitung sesuai persamaan (2.25) yaitu

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

dimana nilai insiden energi sesuai persamaan (2.20) yaitu

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

sehingga, persamaan (2.20) dapat disubstitusikan ke dalam persamaan (2.25) menjadi

$$D_B = \left[4,184 \left(\frac{E}{E_B} \right) D^x \right]^{\frac{1}{x}} \quad (4.2)$$

Nilai E_B diatur 5 J/cm^2 , nilai D untuk tegangan $6,3 \text{ kV}$ yaitu 910 mm , dan untuk tegangan $0,38 \text{ kV}$ yaitu 455 mm , dan nilai x untuk tegangan $6,3 \text{ kV}$ yaitu $0,973$ dan untuk tegangan $0,38 \text{ kV}$ yaitu $1,641$ sehingga dapat

disubstitusikan ke dalam persamaan (4.2) menjadi persamaan (4.3) untuk tegangan 6,3 kV dan persamaan (4.4) untuk tegangan 0,38 kV

$$D_B = \left[4,184 \left(\frac{E}{5} \right) 910^{0,973} \right]^{\frac{1}{0,973}} \quad (4.3)$$

$$D_B = \left[4,184 \left(\frac{E}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}} \quad (4.4)$$

4.4.1 Perhitungan FPB Berdasarkan Hasil Perhitungan Insiden Energi Arc Flash Sesuai Standar IEEE 1584-2002

Dalam sub-bab ini akan dibahas mengenai perhitungan jarak aman atau *Flash Protection Boundary* berdasarkan nilai insiden energi *arc flash* sesuai standar IEEE 1584-2002 dengan menggunakan persamaan (4.3) dan (4.4) pada *case* satu dan *case* dua.

a. *Case* Satu

Bus UST A

$$E = 15,618 \text{ cal/cm}^2$$

$$D_B = \left[4,184 \left(\frac{15,618}{5} \right) 910^{0,973} \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 12.772,13 \text{ mm} = 12,772 \text{ m}$$

Bus UST B

$$E = 15,638 \text{ cal/cm}^2$$

$$D_B = \left[4,184 \left(\frac{15,638}{5} \right) 910^{0,973} \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 12.788,94 \text{ mm} = 12,789 \text{ m}$$

Bus EP 4A

$$E = 22,011 \text{ cal/cm}^2$$

$$D_B = \left[4,184 \left(\frac{22,011}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

$$D_B = 2.685,61 \text{ mm} = 2,686 \text{ m}$$

Bus EP 4B

$$E = 22,011 \text{ cal/cm}^2$$

$$D_B = \left[4,184 \left(\frac{22,011}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

$$D_B = 2,685,61 \text{ mm} = 2,686 \text{ m}$$

Bus Aux 4A

E = 24,963 cal/cm²

$$D_B = \left[4,184 \left(\frac{24,963}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

$$D_B = 2,899,67 \text{ mm} = 2,9 \text{ m}$$

Bus Aux 4B

E = 25,648 cal/cm²

$$D_B = \left[4,184 \left(\frac{25,648}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

$$D_B = 2,947,91 \text{ mm} = 2,948 \text{ m}$$

b. Case Dua

Bus UST A

E = 15,933 cal/cm²

$$D_B = \left[4,184 \left(\frac{15,933}{5} \right) 910^{0,973} \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 13,036,96 \text{ mm} = 13,034 \text{ m}$$

Bus UST B

E = 15,952 cal/cm²

$$D_B = \left[4,184 \left(\frac{15,952}{5} \right) 910^{0,973} \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 13,052,94 \text{ mm} = 13,053 \text{ m}$$

Bus SST A

E = 25,037 cal/cm²

$$D_B = \left[4,184 \left(\frac{25,037}{5} \right) 910^{0,973} \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 20,744,73 \text{ mm} = 20,745 \text{ m}$$

Bus SST B

E = 25,067 cal/cm²

$$D_B = \left[4,184 \left(\frac{25,067}{5} \right) 910^{0,973} \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 20.770,28 \text{ mm} = 20,77 \text{ m}$$

Bus EP 4A

E = 21,975 cal/cm²

$$D_B = \left[4,184 \left(\frac{21,975}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

$$D_B = 2.682,93 \text{ mm} = 2,683 \text{ m}$$

Bus EP 4B

E = 21,98 cal/cm²

$$D_B = \left[4,184 \left(\frac{21,98}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

$$D_B = 2.683,3 \text{ mm} = 2,683 \text{ m}$$

Bus Aux 4A

E = 24,921 cal/cm²

$$D_B = \left[4,184 \left(\frac{24,921}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

$$D_B = 2.896,7 \text{ mm} = 2,897 \text{ m}$$

Bus Aux 4B

E = 25,604 cal/cm²

$$D_B = \left[4,184 \left(\frac{25,604}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

$$D_B = 2.944,82 \text{ mm} = 2,945 \text{ m}$$

4.4.2 Perhitungan FPB Berdasarkan Hasil Perhitungan Insiden Energi Arc Flash Menggunakan Metode Modifikasi

Dalam sub-bab ini akan dibahas mengenai perhitungan jarak aman atau *Flash Protection Boundary* berdasarkan nilai insiden energi *arc flash* metode modifikasi dengan menggunakan persamaan (4.3) dan (4.4) pada *case* satu dan *case* dua.

a. Case Satu

Bus UST A

E = 15,2525 cal/cm²

$$D_B = \left[4,184 \left(\frac{15,2525}{5} \right) 910^{0,973} \right]^{\frac{1}{0,973}}$$
$$D_B = 12,465,04 \text{ mm} = 12,465 \text{ m}$$

Bus UST B

E = 15,2106 cal/cm²

$$D_B = \left[4,184 \left(\frac{15,2106}{5} \right) 910^{0,973} \right]^{\frac{1}{0,973}}$$
$$D_B = 12,429,85 \text{ mm} = 12,43 \text{ m}$$

Bus EP 4A

E = 21,8444 cal/cm²

$$D_B = \left[4,184 \left(\frac{21,8444}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}}$$
$$D_B = 2,673,2 \text{ mm} = 2,673 \text{ m}$$

Bus EP 4B

E = 21,8456 cal/cm²

$$D_B = \left[4,184 \left(\frac{21,8456}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}}$$
$$D_B = 2,673,29 \text{ mm} = 2,673 \text{ m}$$

Bus Aux 4A

E = 24,6089 cal/cm²

$$D_B = \left[4,184 \left(\frac{24,6089}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}}$$
$$D_B = 2,874,54 \text{ mm} = 2,875 \text{ m}$$

Bus Aux 4B

E = 25,2427 cal/cm²

$$D_B = \left[4,184 \left(\frac{25,2427}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}}$$
$$D_B = 2,919,43 \text{ mm} = 2,919 \text{ m}$$

b. Case Dua

Bus UST A

$$E = 15,5716 \text{ cal/cm}^2$$

$$D_B = \left[4,184 \left(\frac{15,5716}{5} \right) 910^{0,973} \right]^{\frac{1}{0,973}}$$
$$D_B = 12.733,14 \text{ mm} = 12,733 \text{ m}$$

Bus UST B

$$E = 15,603 \text{ cal/cm}^2$$

$$D_B = \left[4,184 \left(\frac{15,603}{5} \right) 910^{0,973} \right]^{\frac{1}{0,973}}$$
$$D_B = 12.759,53 \text{ mm} = 12,76 \text{ m}$$

Bus SST A

$$E = 24,6623 \text{ cal/cm}^2$$

$$D_B = \left[4,184 \left(\frac{24,6623}{5} \right) 910^{0,973} \right]^{\frac{1}{0,973}}$$
$$D_B = 20.425,72 \text{ mm} = 20,426 \text{ m}$$

Bus SST B

$$E = 24,7107 \text{ cal/cm}^2$$

$$D_B = \left[4,184 \left(\frac{24,7107}{5} \right) 910^{0,973} \right]^{\frac{1}{0,973}}$$
$$D_B = 20.466,92 \text{ mm} = 20,467 \text{ m}$$

Bus EP 4A

$$E = 21,8101 \text{ cal/cm}^2$$

$$D_B = \left[4,184 \left(\frac{21,8101}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}}$$
$$D_B = 2.670,64 \text{ mm} = 2,671 \text{ m}$$

Bus EP 4B

$$E = 21,8154 \text{ cal/cm}^2$$

$$D_B = \left[4,184 \left(\frac{21,8154}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

$$D_B = 2,671,04 \text{ mm} = 2,671 \text{ m}$$

Bus Aux 4A

E = 24,5728 cal/cm²

$$D_B = \left[4,184 \left(\frac{24,5728}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

$$D_B = 2,871,97 \text{ mm} = 2,872 \text{ m}$$

Bus Aux 4B

E = 25,2053 cal/cm²

$$D_B = \left[4,184 \left(\frac{25,2053}{5} \right) 455^{1,641} \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

$$D_B = 2,916,79 \text{ mm} = 2,917 \text{ m}$$

Perbandingan hasil perhitungan jarak aman atau *Flash Protection Boundary* (FPB) berdasarkan standar IEEE 1584-2002 dan metode modifikasi akan ditampilkan pada tabel 4.19 dan tabel 4.20

Tabel 4.19 Perbandingan Nilai FPB Berdasarkan Standar IEEE 1584-2002 dan Metode Modifikasi pada Case Satu

Bus ID	Insiden Energi (cal/cm ²)	FPB (m)	Insiden Energi (cal/cm ²)	FPB (m)
	IEEE 1584-2002	Modifikasi	Modifikasi	Modifikasi
Bus UST A	15,618	12,772	15,2525	12,465
Bus UST B	15,638	12,789	15,2106	12,43
Bus EP 4A	22,011	2,686	21,8444	2,673
Bus EP 4B	22,011	2,686	21,8456	2,673
Bus Aux 4A	24,963	2,9	24,6089	2,875
Bus Aux 4B	25,648	2,948	25,2427	2,919

Tabel 4.20 Perbandingan Nilai FPB Berdasarkan Standar IEEE 1584-2002 dan Metode Modifikasi pada Case Dua

Bus ID	Insiden Energi IEEE 1584-2002	FPB (m)	Insiden Energi (cal/cm ²) Modifikasi	FPB (m)
Bus UST A	15,933	13,034	15,5716	12,733
Bus UST B	15,952	13,053	15,603	12,76
Bus SST A	25,037	20,745	24,6623	20,426
Bus SST B	25,067	20,77	24,7107	20,467
Bus EP 4A	21,975	2,683	21,8101	2,671
Bus EP 4B	21,98	2,683	21,8154	2,671
Bus Aux 4A	24,921	2,897	24,5728	2,872
Bus Aux 4B	25,604	2,945	25,2053	2,917

Setelah didapatkan nilai insiden energi dan kategori, jarak aman atau *Flash Protection Boundary* berdasarkan standar IEEE 1584-2002 dan metode modifikasi, selanjutnya ditentukan juga *Personal Protective Equipment* (PPE) yang harus di gunakan. Berdasarkan perhitungan insiden energy *arc flash* sesuai standar IEEE 1584-2002 dan metode modifikasi semua bus pada PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 mengalami penurunan nilai insiden energi menjadi level dua, kecuali pada bus Aux 4B yang mengalami penurunan nilai insiden energi hingga pada level tiga. Pengelompokan kategori ini mempengaruhi PPE yang akan digunakan. Berikut akan ditampilkan PPE yang akan digunakan berdasarkan kategori nilai insiden energi sesuai standar IEEE 1584-2002 dan metode modifikasi pada tabel 4.21 hingga 4.25

Tabel 4.21 Jenis PPE yang harus digunakan berdasarkan nilai insiden energi sesuai perhitungan standar IEEE 1584-2002

Bus ID	Insiden Energi Case Satu (cal/cm ²)	Insiden Energi Case Dua (cal/cm ²)	Kategori	Jenis PPE
Bus UST A	15,618	15,933		1. Kemeja lengan panjang dan celana tahan api 2. <i>Flash suit hood</i> atau pelindung wajah, dahi, telinga, leher dan <i>baclava</i> tahan api 3. Jaket tahan api 4. Helm <i>safety</i> 5. Kacamata <i>safety</i> 6. Pelindung pendengaran (sisipan saluran telinga) 7. Sarung tangan kulit. Jika sarung tangan isolasi karet dengan pelindung kulit digunakan, tidak perlu tambahan sarung tangan kulit atau sarung tangan tahan api 8. Sepatu Kulit
Bus UST B	15,638	15,952		
Bus EP 4A	22,011	21,975		
Bus EP 4B	22,011	21,98		
Bus Aux 4A	24,963	24,921	Level 2	
Bus Aux 4B	25,648	25,604		1. Kemeja lengan panjang dan celana tahan api 2. Pelindung wajah
Bus SST A	-	25,037		

Tabel 4.22 Jenis PPE yang harus digunakan berdasarkan nilai insiden energi sesuai perhitungan standar IEEE 1584-2002 (Lanjutan)

Bus ID	Insiden Energi Case Satu (cal/cm ²)	Insiden Energi Case Dua (cal/cm ²)	Kategori	Jenis PPE
Bus SST B	-	25,067	Level 3	<p>dan tubuh yang membungkus wajah, dahi, telinga, leher atau <i>arc flash suit hood</i> harus dikenakan</p> <ul style="list-style-type: none"> 3. Jaket tahan busur api 4. Sarung tangan tahan api 5. Helm <i>safety</i> 6. Kacamata <i>safety</i> 7. Pelindung pendengaran (sisipan saluran telinga) 8. Sepatu kulit

Tabel 4.23 Jenis PPE yang harus digunakan berdasarkan nilai insiden energi sesuai perhitungan modifikasi

Bus ID	Insiden Energi Case Satu (cal/cm ²)	Insiden Energi Case Dua (cal/cm ²)	Kategori	Jenis PPE
Bus UST A	15,2525	15,5716	Level 2	<ul style="list-style-type: none"> 1. Kemeja lengan panjang dan celana tahan api
Bus UST B	15,2106	15,603		<ul style="list-style-type: none"> 2. <i>Flash suit hood</i> atau pelindung wajah, dahi,
Bus SST A	-	24,6623		

Tabel 4.24 Jenis PPE yang harus digunakan berdasarkan nilai insiden energi sesuai perhitungan modifikasi (Lanjutan)

Bus ID	Insiden Energi Case Satu (cal/cm ²)	Insiden Energi Case Dua (cal/cm ²)	Kategori	Jenis PPE
Bus SST B	-	24,7107		telinga, leher dan <i>balacalava</i> tahan api 3. Jaket tahan api 4. Helm <i>safety</i> 5. Kacamata <i>safety</i> 6. Pelindung pendengaran (sisipan saluran telinga) 7. Sarung tangan kulit. Jika sarung tangan isolasi karet dengan pelindung kulit digunakan, tidak perlu tambahan sarung tangan kulit atau sarung tangan tahan api 8. Sepatu Kulit
Bus EP 4A	21,8444	21,8101		
Bus EP 4B	21,8456	21,8154		
Bus Aux 4A	24,6089	24,5728		
Bus Aux 4B	25,2427	25,2053	Level 3	1. Kemeja lengan panjang dan celana tahan api 2. Pelindung wajah dan tubuh yang membungkus wajah, dahi, telinga, leher atau <i>arc flash suit hood</i> harus dikenakan 3. Jaket tahan busur api

Tabel 4.25 Jenis PPE yang harus digunakan berdasarkan nilai insiden energi sesuai perhitungan modifikasi (Lanjutan)

Bus ID	Insiden Energi Case Satu (cal/cm ²)	Insiden Energi Case Dua (cal/cm ²)	Kategori	Jenis PPE
				4. Sarung tangan tahan api 5. Helm <i>safety</i> 6. Kacamata <i>safety</i> 7. Pelindung pendengaran (sisipan saluran telinga) 8. Sepatu kulit

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan perhitungan nilai insiden energi *arc flash* dan koordinasi relay arus lebih pada PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 dapat disimpulkan bahwa :

- a. Besar insiden *arc flash* pada kondisi *existing case* satu dan dua berada pada level 4 dikarenakan *setting existing* yang belum tepat sehingga perlu dilakukan *resetting*
- b. Koordinasi relay arus lebih pada sistem kelistrikan PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4 masih terdapat nilai *setting* yang kurang tepat, terlihat dari beberapa kurva relay motor yang masih bersinggungan dengan kurva arus *starting* yang menyebabkan motor trip setiap kali *starting*, *grading time* yang melebihi 0,2 s dikarenakan terdapat beberapa relay yang memiliki nilai *time delay* 0 s atau hanya menggunakan *setting inverse* saja.atau nilai *instantaneous pick up* yang besar sehingga ketika *arc flash* terjadi mengenai *setting inverse* yang menyebabkan waktu dalam melokalisir gangguan menjadi lebih lama sehingga perlu dilakukan *resetting*.
- c. Besar insiden energi *arc flash* setelah dilakukan *resetting* sesuai standar IEEE 1584-2002 dan metode modifikasi berdasarkan simulasi dan perhitungan menjadi level 2 dan level 3.
- d. Perhitungan nilai insiden energi *arc flash* dengan metode modifikasi menghasilkan nilai insiden energi yang lebih kecil dibandingkan dengan standar IEEE 1584-2002. Hal ini dikarenakan pada metode modifikasi dipertimbangkan berkurangnya arus kontribusi berdasarkan domain waktu arus hubung singkat dan waktu dalam melokalisir gangguan. Sebagai contoh pada *case* satu bus UST A nilai insiden energi sesuai standar IEEE 1584-2002 yaitu 15,933 cal/cm², sedangkan dengan menggunakan metode modifikasi nilai insiden energinya menjadi 15,5716 cal/cm².
- e. Nilai *Flash Protection Boundary* (FPB) sesuai standar IEEE 1584-2002 dan metode modifikasi tidak jauh berbeda, namun FPB pada metode modifikasi lebih kecil dibandingkan dengan IEEE 1584-2002. Hal ini dikarenakan nilai insiden energi pada modifikasi lebih kecil dibandingkan dengan IEEE 1584-2002. Sebagai contoh pada bus EP

4A nilai FPB sesuai standar IEEE 1584-2002 yaitu 2,686 m sedangkan dengan metode modifikasi menjadi 2,673 m.

- f. PPE yang harus digunakan yaitu PPE pada level 2 dan level 3 sesuai dengan kategori nilai insiden energi *arc flash*.

5.2 Saran

Berdasarkan pembahasan tugas akhir yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat menjadi masukan yaitu :

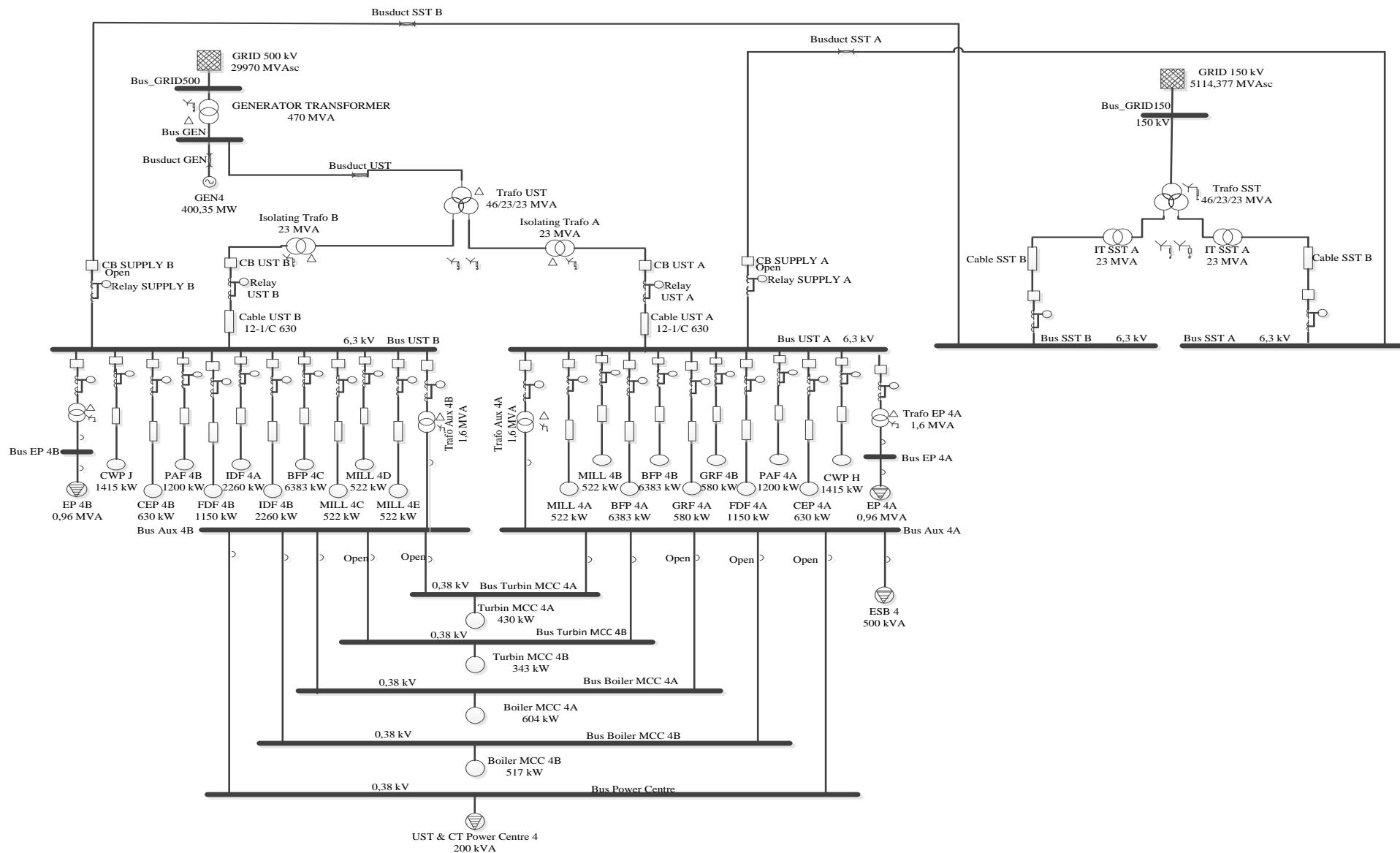
- a. Untuk menghindari arus hubung singkat yang besarnya melebihi *breaking capacity* dari *circuit breaker* yang digunakan, maka diperlukan penambahan sebuah *isolating transformer*.
- b. Untuk mempercepat waktu pemadaman *arc flash*, maka diperlukan penambahan *setting instantaneous* pada relay UST A, relau UST B, LVCB Sek EP 4A, LVCB Sek EP 4B, LVCB Aux 4A dan LVCB Aux 4B.
- c. Untuk menurunkan nilai insiden *arc flash* menjadi level 1 atau level 2 dapat digunakan relay diferensial yang dipasang pada bus atau transformator karena memiliki waktu kerja yang lebih cepat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Marsudi, Djiteng. 2006. *Operasi Sistem Tenaga Listrik*. Yogyakarta : Graha Ilmu
- [2] Sarimun, Wahyudi. 2016. *Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik*. Edisi Kedua. Depok : Garamond
- [3] Anderson, P.M. 1998. *Power System Protection*. Canada : IEEE Press Power Engineering Series
- [4] Suralaya Steam Power Plant Units 3 & 4 Maintenance Manual Volume EM 21 B. PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4
- [5] Wiley, John. 2010. *Handbook of International Electrical Safety Practices*. Hoboken, New Jersey : Scrivener Publishing LLC
- [6] IEEE Std. 1584-2002. 2002. *IEEE Guide for Performing Arc Flash Hazard Calculation*. Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc.
- [7] Wu, Alex Y.2010. *Modified Medium-Voltage Arc Flash Incident Energy Calculation Method*. IEEE Transactions on Industry Applications.46.1866-1872
- [8] NFPA 70E 2015 Edition. 2015. *Standard for Electrical Safety in The Workplace*. Correlating Committee on National Electrical Code

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

LAMPIRAN



Sistem Kelistrikan PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit 4

BIOGRAFI



Penulis bernama lengkap Eka Maudyna Isdyanti dilahirkan pada tanggal 10 Agustus 1996 di Purwokerto. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Menengah Atas di SMAN 2 KS Cilegon tahun 2014. Penulis melanjutkan dan menyelesaikan pendidikan diploma (D3) pada program studi Teknik Elektro konsentrasi Teknik Listrik Sekolah Vokasi Universitas Gadjah Mada tahun 2017. Tahun 2017, penulis melanjutkan pendidikan sarjana (S1) dengan program Lintas Jalur pada bidang Teknik Sistem Tenaga Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). Penulis dapat dihubungi melalui email ekamaudina@gmail.com atau nomor telepon 087772975488

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----