



TUGAS AKHIR - EE 184801

**STUDI KOORDINASI PROTEKSI MEMPERTIMBANGKAN
ARC FLASH DENGAN METODE MODIFIKASI DI PT
INDONESIA POWER UJP PLTU BANTEN 1 SURALAYA
UNIT 8**

Muhammad Hanafi Riskiawan
NRP 07111745000030

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.

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



FINAL PROJECT - EE 184801

**PROTECTION COORDINATION STUDY CONSIDERING
ARC FLASH WITH MODIFICATION METHOD AT PT
INDONESIA POWER UJP PLTU BANTEN 1 SURALAYA
UNIT 8**

Muhammad Hanafi Riskiawan
NRP 07111745000030

Advisor
Dr. Ir. Margo Pujiyantara, M.T.
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.

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

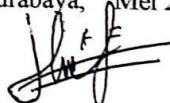
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “Studi Koordinasi Proteksi Mempertimbangkan *Arc Flash* Dengan Metode Modifikasi Pada PT Indonesia Power UJP PLTU Banten 1 Surabaya Unit 8” 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, Mei 2019



Muhammad Hanafi Riskiawan
NRP. 07111745000030

Halaman ini sengaja dikosongkan

mber



STUDI KOORDINASI PROTEKSI MEMPERTIMBANGKAN ARC FLASH DENGAN METODE MODIFIKASI DI PT INDONESIA POWER UJP PLTU BANTEN 1 SURALAYA UNIT 8

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

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



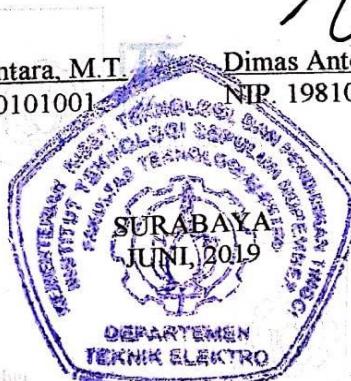
Menyetujui,

Dosen Pembimbing I

Dr. Ir. Margo Pujiyantara, M.T.
NIP. 196603181990101001

Dosen Pembimbing II

Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 198109052005011002



ember



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

Halaman ini sengaja dikosongkan

STUDI KOORDINASI PROTEKSI MEMPERTIMBANGKAN ARC FLASH DENGAN METODE MODIFIKASI DI PT INDONESIA POWER UJP PLTU BANTEN 1 SURALAYA UNIT 8

Nama : Muhammad Hanafi Riskiawan
Pembimbing I : Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.
Pembimbing II : Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRAK

Arc Flash melepaskan energi yang dapat merusak peralatan dan membahayakan pekerja yang berada di lingkungan tersebut, karena dapat mengandung energi dengan radiasi panas mencapai 35.000°F . Oleh karena dampak yang mungkin terjadi maka diperlukan batas aman bagi pekerja berdasarkan energi yang terjadi, analisis *arc flash* dapat menggunakan IEEE 1584-2002 maupun dengan metode modifikasi. Standar IEEE 1584-2002 menghitung insiden energi menggunakan *bolted three-phase fault* terbesar dan *fault clearing time* untuk mengamankan arus gangguan yang terjadi, sedangkan metode modifikasi menghitung berdasarkan mula kontribusi arus hubung singkat hingga waktu mengamankan gangguan (*fault clearing time*). Dari hasil perhitungan untuk analisis *arc flash* pada sistem kelistrikan 6 kV, nilai insiden energi *arc flash* menggunakan metode modifikasi memiliki nilai yang lebih rendah dibanding standar IEEE 1584-2002. Menggunakan standar IEEE 1584-2002 pada bus 10BBA01, 10BBB01, 10BCA01, dan 10BCB01 menghasilkan insiden energi secara berurutan sebesar $46,29 \text{ cal/cm}^2$, $43,65 \text{ cal/cm}^2$, $24,10 \text{ cal/cm}^2$ dan $22,88 \text{ cal/cm}^2$, sedangkan metode modifikasi menghasilkan insiden energi $38,73 \text{ cal/cm}^2$, $36,32 \text{ cal/cm}^2$, $20,54 \text{ cal/cm}^2$, $19,23 \text{ cal/cm}^2$. Selain itu pada rele differensial 87GTU terdapat kesalahan pemilihan *pick up* yang menyababkan rele bekerja saat terjadi gangguan eksternal 2 phase pada bus 10BAA. Hasil analisis didapatkan *setting* rele differensial adalah $I_{set}=1,4\text{I}_e$, $I_{instan}=5,2\text{I}_e$, dan $slope=0,75$.

Kata Kunci: *Arc Flash*, Metode Modifikasi, Standar IEEE 1584-2002, Rele differensial

Halaman ini sengaja dikosongkan

**PROTECTION COORDINATION STUDY
CONSIDERING ARC FLASH WITH MODIFICATION
METHOD AT PT INDONESIA POWER UJP PLTU
BANTEN 1 SURALAYA UNIT 8**

Name : Muhammad Hanafi Riskiawan
1st Advisor : Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.
2nd Advisor : Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRACT

Arc flash release energy can damage equipment and dangerous for the workers who working in the area, because it can contain energy with heat radiation reaching of 35.000⁰F. Because of the impact that might occur, a flash protection boundary is needed for the workers based on the energy that occurs, arc flash analysis can use IEEE 1584-2002 or by modification methods. The IEEE 1584-2002 standard calculates energy incidents using the largest bolted three-phase fault and fault clearing time to secure the occurrence of fault currents, while the modification method calculates based on the contribution of short-circuit currents to fault clearing time. From the results of calculations for arc flash analysis on a 6 kV electrical system, the value of incident arc flash energy using the modified method has a lower value than the IEEE 1584-2002 standard. Using the IEEE 1584-2002 standard on bus 10BBA01, 10BBB01, 10BCA01, and 10BCB01 produce energy incidents in a sequence of 46,29 cal/cm², 43,65 cal/cm², 24,10 cal/cm² dan 22,88 cal/cm², while the modification method produced an energy incident of 38,73 cal/cm², 36,32 cal/cm², 20,54 cal/cm², 19,23 cal/cm². Furthermore, at 87 GTU differential relay, the pick-up is error that will cause relay to work when there is an external 2 phase short circuit on the 10BAA or PLN 500 kV bus. Based on the results of the analysis it is recommended that the differential relay setting would be $I_{set}=1,4 I_e$, $I_{instan}=5,28 I_e$, and slope= 0,75.

Keywords: Arc Flash, Modification Method, IEEE 1584-2002 Standard, Differential Relay.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT karena atas rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul “Studi Koordinasi Proteksi Mempertimbangkan *Arc Flash* Dengan Metode Modifikasi Di PT Indonesia Power UJP PLTU Banten 1 Suralaya Unit 8”.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Papa M. Sahili, Mama Tarinem serta kakak-kakakku Mas Afif, Mas Chadafi, Mbak Nadia, Mbak Ambar, keponakan terunya Nesya dan teman seperjuanganku Dinda Arin yang kesemuanya selalu menjadi *support system*.
2. Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T. dan Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan bimbingan, saran dan *trigger* selama penyusunan tugas akhir ini.
3. Pegawai dan karyawan PT. Indonesia Power UJP PLTU Banten 1 Suralaya Unit 8 yang memberikan izin untuk pengambilan data.
4. Alfian, Iik, Ivan, Firdaus, Rizki, Mas Wahyu, Mas Imron, Mas Habibi, Mas Singgih, Mas Fajar sebagai teman kontarakar yang telah memberikan bantuan dan dukungan selama ini.
5. Teman-teman LJ teknik sistem tenaga, dosen, karyawan, serta seluruh keluarga besar Teknik Elektro ITS yang telah memberikan dukungan dalam pengerjaan tugas akhir ini.
6. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah membantu penulis hingga terselesaiannya tugas akhir ini.

Besar harapan penulis bahwa buku Tugas Akhir ini dapat memberikan informasi dan manfaat bagi pembaca pada umumnya dan mahasiswa Jurusan Teknik Elektro pada khususnya.

Surabaya, Mei 2019

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	Error! Bookmark not defined.
LEMBAR PENGESAHAN	Error! Bookmark not defined.
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan.....	2
1.5 Metodologi.....	2
1.6 Relevansi atau Manfaat.....	3
1.7 Sistematika Penulisan	4
BAB II LANDASAN TEORI	5
2.1 Gangguan Arus Lebih Sistem Tenaga Listrik	5
2.1.1 Gangguan Beban Lebih	5
2.1.2 Gangguan Hubung Singkat	5
2.2 Perhitungan Arus Hubung Singkat	5
2.3 Rele Arus Lebih	6
2.2.1 Rele Arus Lebih <i>Definite</i>	7
2.2.2 Rele Arus Lebih <i>Instantaneous</i>	8
2.2.3 Rele Arus Lebih <i>Invers</i>	8

2.4 Koordinasi Rele Arus Lebih	9
2.5 Rele Gangguan Tanah	10
2.6 Rele Diferensial.....	10
2.6.1 RCSS-985B.....	11
2.7 <i>Arc Flash</i>	13
2.7.1 Perhitungan Insiden Energi <i>Arc Flash</i> Standar IEEE 1584-2002	14
2.7.2 Perhitungan Insiden Energi <i>Arc Flash</i> Metode Modifikasi ..	16
2.8 <i>Flash Protection Boundary</i>	17
2.9 Kategori PPE Dan Alat Pelindung Diri Sesuai Standar NFPA 70E 2015	18
BAB III	23
SISTEM KELISTRIKAN PT INDONESIA POWER.....	23
UJP PLTU BANTEN 1 SURALAYA UNIT 8.....	23
3.1 Sistem Kelistrikan	23
3.2 Data Peralatan.....	23
3.2.1 Data Generator.....	23
3.2.2 Data Transformator.....	23
3.2.3 Data Beban.....	25
BAB IV HASIL DAN SIMULASI.....	28
4.1 Permodelan sistem kelistrikan	29
4.2 Pemilihan Tipikal Koordinasi.....	29
4.3 Data Hubung Singkat	29
4.3.1 Arus Hubung Singkat Minimum.....	30
4.3.2 Arus Hubung Singkat Maksimum	30
4.4 Koordinasi Rele Arus Lebih	30
4.4.1 Tipikal 1A dan 1B	31
4.4.2 Tipikal 2A dan 2B	37

4.4.2 Tipikal 3A dan 3B	42
4.5 Koordinasi Rele Gangguan Phasa Ke Tanah	47
4.6 Perbandingan <i>Setting Rele</i>	52
4.7 Analisis <i>Arc Flash</i>	53
4.7.1 Hasil Simulasi Insiden Energi <i>Arc flash</i> Dan <i>Flash Protection Boundary Exsisting</i>	54
4.8 Perbandingan Nilai Insiden Energi	61
4.8.1 Nilai <i>Exsising</i> Dibanding <i>Resetting</i> Dengan Standar IEEE 1584-2002.	61
4.8.2 Nilai <i>Resetting</i> Dengan Standar IEEE 1584-2002 Dibanding Metode Modifikasi	62
4.9 Perbandingan <i>Flash Protection Boundary</i> dan <i>Personal Protective Equipment</i>	63
4.9.1 Nilai FPB Kondisi <i>Exsisting</i> , <i>Resetting</i> Standar IEEE 1584-2002 Dan <i>Resetting</i> Metode Modifikasi.....	63
4.9.2 PPE <i>Resetting</i> Dengan Standar IEEE 1584-2002 Dengan Metode Modifikasi.	64
4.10 Analisis <i>Setting Rele</i> Differensial	66
BAB V PENUTUP.....	96
5.1 Kesimpulan	97
5.2 Saran	98
DAFTAR PUSTAKA.....	99
BIOGRAFI PENULIS	100

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Kurva Karakteristik Rele Arus Lebih <i>Definite</i>	7
Gambar 2. 2 Kurva Karakteristik Rele Arus Lebih <i>Instantaneous</i>	8
Gambar 2. 3 Kurva Karakteristik Rele Arus Lebih <i>Inverse</i>	8
Gambar 2. 4 Aliran Arus Kondisi Normal Operasi	11
Gambar 2. 5 Karakteristik Operasi Proteksi Differensial Arus	12
Gambar 2. 6 <i>Arching Fault</i> dan <i>Bolted Fault</i>	13
Gambar 2. 7 PPE Berdasarkan Kategori <i>Arc Flash</i>	21
Gambar 4. 1 <i>Single Line Diagram</i> Tipikal 1A dan 1B	31
Gambar 4. 2 Plot TCC Tipikal 1A dan 1B <i>Existing</i>	32
Gambar 4. 3 Plot TCC Tipikal 1A dan 1B <i>Resetting</i>	37
Gambar 4. 4 <i>Single Line Diagram</i> Tipikal 2A dan 2B	38
Gambar 4. 5 Plot TCC Tipikal 2A dan 2B <i>Existing</i>	39
Gambar 4. 6 Plot TCC Tipikal 2A dan 2B <i>Resetting</i>	42
Gambar 4. 7 <i>Single Line Diagram</i> Tipikal 3A dan 3B	43
Gambar 4. 8 Plot TCC Tipikal 3A dan 3B <i>Existing</i>	44
Gambar 4. 9 Plot TCC Tipikal 3A dan 3B <i>Resetting</i>	47
Gambar 4. 10 <i>Single Line Diagram</i> Tipikal <i>Ground Fault</i>	48
Gambar 4. 11 Plot TCC <i>Ground Fault Existing</i>	49
Gambar 4. 12 Plot TCC <i>Ground Fault Resetting</i>	52
Gambar 4. 13 Permodelan Kondisi Normal.....	69
Gambar 4. 14 Kurva Karakteristik Operasi Kondisi Normal	70
Gambar 4. 15 Permodelan Hubung Singkat 3 Phasa di Bus 10BBA0171	
Gambar 4. 16 Kurva Karakteristik Operasi Eksternal 3 Phase 10BBA01	72
Gambar 4. 17 Permodelan Hubung Singkat 3 Phasa di Bus 10BBB01	73
Gambar 4. 18 Kurva Karakteristik Operasi Eksternal 3 Phase 10BBB01	74
Gambar 4. 19 Permodelan Hubung Singkat 3 Phasa di Bus 10BAT..	75
Gambar 4. 20 Kurva Karakteristik Operasi Eksternal 3 Phase 10BAT	76
Gambar 4. 21 Permodelan Hubung Singkat 2 Phasa di Bus 10BBA0177	
Gambar 4. 22 Kurva Karakteristik Operasi Eksternal 2 Phase 10BBA01	79
Gambar 4. 23 Permodelan Hubung Singkat 2 Phasa di Bus 10BBB01	80

Gambar 4. 24 Kurva Karakteristik Operasi Eksternal 2 Phase 10BBB01	82
Gambar 4. 25 Permodelan Hubung Singkat 2 Phasa di Bus 10BAT....	83
Gambar 4. 26 Kurva Karakteristik Operasi Eksternal 2 Phase 10BAT85	
Gambar 4. 27 Permodelan Hubung Singkat 3 Phasa di Bus 10BAA ...	86
Gambar 4. 28 Kurva Karakteristik Operasi Internal 3 Phase 10BAA..	87
Gambar 4. 29 Permodelan Hubung Singkat 2 Phasa di Bus 10BAA ...	88
Gambar 4. 30 Kurva Karakteristik Operasi Internal 2 Phase 10BAA..	90
Gambar 4. 31 Kurva Karakteristik Operasi Eksternal 3 Phase 10BBA01 <i>Resetting</i>	91
Gambar 4. 32 Kurva Karakteristik Operasi Eksternal 3 Phase 10BBB01 <i>Resetting</i>	92
Gambar 4. 33 Kurva Karakteristik Operasi Eksternal 3 Phase 10BAT01 <i>Resetting</i>	92
Gambar 4. 34 Kurva Karakteristik Operasi Internal 3 Phase 10BAA <i>Resetting</i>	93
Gambar 4. 35 Kurva Karakteristik Operasi Eksternal 2 Phase 10BBA01 <i>Resetting</i>	93
Gambar 4. 36 Kurva Karakteristik Operasi Eksternal 2 Phase 10BBB01 <i>Resetting</i>	94
Gambar 4. 37 Kurva Karakteristik Operasi Eksternal 2 Phase 10BAT <i>Resetting</i>	94
Gambar 4. 38 Kurva Karakteristik Operasi Internal 2 Phase 10BAA <i>Resetting</i>	95

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Konstanta Rele Arus Lebih <i>Inverse</i>	9
Tabel 2. 2 Parameter <i>Gap Bus</i> dan <i>Working Distance</i>	15
Tabel 2. 3 Parameter Jarak Faktor x	16
Tabel 2. 4 Pengelompokan Domain Waktu	17
Tabel 2. 5 Kategori PPE (<i>Personal Protective Equipment</i>).....	19
Tabel 3. 1 Data Generator	23
Tabel 3. 2 Data Transformator	24
Tabel 4. 1 Data Hubung Singkat Minimum	30
Tabel 4. 2 Data Hubung Singkat Maksimum	30
Tabel 4. 3 Perbandingan <i>Setting</i> Rele Arus Lebih.....	52
Tabel 4. 4 Perbandingan Rele Gangguan Phasa ke Tanah	53
Tabel 4. 5 Simulasi Insiden Energi <i>Arc Flash Existing</i>	54
Tabel 4. 6 Perbandingan Insiden Energi Simulasi <i>Existing</i> Dengan Perhitungan <i>Resetting</i> Menggunakan Standar IEEE 1584- 2002	61
Tabel 4. 7 Perbandingan <i>Resetting</i> Insiden Energi Standar IEEE 1584- 2002 dengan Perhitungan Insiden Energi Metode Modifikasi	62
Tabel 4. 8 Perbandingan FPB <i>Existing</i> , <i>Resetting</i> IEEE 1584-2002 dan <i>Resetting</i> Metode Modifikasi	63
Tabel 4. 9 Jenis PPE Berdasarkan Kategori Energi <i>Arc Flash</i> Kondisi <i>Resetting</i> Berdasarkan Perhitungan Standar IEEE 1584-2002	64
Tabel 4. 10 Jenis PPE Berdasarkan Kategori Energi <i>Arc Flash</i> Kondisi <i>Resetting</i> Berdasarkan Metode Modifikasi	66

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem proteksi yang baik pada sistem kelistrikan sangat dibutuhkan untuk memisahkan bagian gangguan dengan bagian normal, melindungi peralatan dari kerusakan dan kecelaan pekerja, sehingga untuk itu perlu dilakukan koordinasi proteksi. Terjadi bermacam-macam gangguan pada sistem kelistrikan salah satunya hubung singkat yang dapat menyebabkan fenomena *arc flash* atau busur api yang nilai insiden energinya sebanding dengan arus hubung singkat yang terjadi. PT Indonesia Power UJP PLTU Banten 1 Suralaya Unit 8 dengan kapasitas 1×625 , maka arus hubung singkat yang terjadi sangat besar sehingga busur api juga akan besar, oleh karenanya diperlukan sistem proteksi yang memperhatikan *arc flash* dalam penentuan *setting* rele.

Arc flash dapat menyebabkan terbakarnya peralatan dan cedera pada pekerja sehingga perlu dianalisis untuk mengetahui besar nilai insiden energi, dan akan didapatkan *flash protection boundary* yaitu jarak aman dari bahaya *arc flash* dan pengklasifikasian insiden energi ke level energi tertentu. Pengklasifikasian level bahaya *arc flash* berguna untuk pemilihan *protective equipment* yaitu alat pelindung diri yang tepat.

PLTU UJP PLTU Banten 1 Suralaya Unit 8 perlu dilakukan studi koordinasi proteksi karena belum pernah diadakan evaluasi mengenai proteksi yang digunakan serta belum diadakan unjuk kerja dari sistem proteksi tersebut. *Setting* yang digunakan pada rele *overrecurrent* hanya menggunakan karakteristik *definite time* dan *instantaneous* sehingga dengan rele yang tersedia diperlukan *setting* yang tepat untuk mengamankan dari semua kondisi arus gangguan hubung singkat. Selain itu terdapat kesalahan pada pengaman utama bus 10BAA 20 kV berupa rele differensial yang bekerja diluar zona proteksinya, hal ini disebabkan terdapat kekeliruan dalam pemilihan *setting pickup* terlalu rendah yang mana menyebabkan saat terjadi gangguan gangguan hubung singkat eksternal 2 phase pada bus 10BAT 500 kV maka gangguan tersebut terdapat pada zona operasi rele dan rele differensial akan bekerja.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas pada tugas akhir ini adalah:

1. Menentukan *setting* koordinasi proteksi OCR dan GFR pada level tegangan 6 kV.
2. Menentukan rekomendasi *setting* rele differensial 87GTU.
3. Menghitung besar insiden energi *arc flash* pada kondisi *resetting* sesuai standar IEEE 1584-2002 dan metode modifikasi.
4. Menentukan kategori insiden energi, alat pelindung diri dan jarak aman berdasarkan sesuai standar NFPA 70E 2015 pada kondisi *resetting*.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah:

1. *Setting* rele OCR dan GFR hanya dilakukan pada tegangan menengah 6 kV.
2. *Setting* rele differensial hanya 87GTU
3. Penentuan nilai insiden energi *arc flash* hanya pada switchgear tegangan menengah 6 kV.
4. Simulasi hanya dilakukan dengan software ETAP 12.6

1.4 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah:

1. Dapat mengetahui *setting* rele yang tepat agar sistem proteksi terkoordinasi.
2. Dapat mendapatkan *setting* rele differensial 87GTU.
3. Dapat mengetahui perbedaan nilai insiden energi dengan metode perhitungan standar IEEE 1584-2002 dan metode modifikasi
4. Dapat mengetahui kategori insiden energi *arc flash*, alat pelindung diri, dan jarak aman pekerja.

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah:

1. Studi Literatur
Mencari referensi dan mempelajari tentang analisis sistem tenaga, arus hubung singkat, koordinasi proteksi dan *arc flash* dari standar buku, jurnal dan tugas akhir.
2. Pengumpulan Data

Mencari dan mengumpulkan data secara langsung di PT Indonesia Power UJP PLTU Banten 1 Suralaya Unit 8 guna dilakukan analisis.

3. Pemodelan Sistem
Memodelkan data yang diperoleh di PT Indonesia Power UJP PLTU Banten 1 Suralaya Unit 8 menggunakan *software* ETAP 12.6.
4. Simulasi
Data yang sudah dimodelkan kemudian diolah untuk mengetahui aliran daya, arus hubung singkat pada setiap bus, keadaan mula sistem proteksi dengan software ETAP 12.6.
5. Perhitungan *Setting Rele*
Paramater-parameter yang telah diperoleh dari hasil simulasi akan digunakan sebagai komponen untuk melakukan perhitungan nilai *setting* rele arus lebih, gangguan fasa ke tanah, diferensial dan menghitung energi *arc flash* untuk menentukan kategori energi.
6. Analisis Data
Dari hasil perhitungan *setting* rele maka didapatkan *setting* koordinasi proteksi baru, kemudian untuk mengetahui koordinasi yang tepat dilakukan analisis skema dengan berbagai macam lokasi dan letak gangguan untuk memastikan bahwa rele bekerja pada zona proteksinya.
7. Penyusunan Buku Tugas Akhir
Penyusunan buku sebagai kesimpulan akhir dari rangkaian metodologi yang telah dilakukan guna menyajikan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan.

1.6 Relevansi atau Manfaat

Hasil dari tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Digunakan sebagai rekomendasi untuk PT Indonesia Power UJP PLTU Banten 1 Suralaya Unit 8 dalam melakukan evaluasi *setting* rele, penentuan jarak aman pekerja, serta pemilihan alat pelindung diri yang tepat.
2. Digunakan sebagai sumber referensi mengenai koordinasi proteksi mempertimbangkan insiden energi *arc flash* dengan metode modifikasi dan *setting* rele *differensial*.

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika pembahasan dalam Tugas Akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut:

- 1. BAB 1 Pendahuluan**

Bab ini meliputipenjelasan tentang latar belakang, perumusan masalah, tujuan, metodologi, relevansi, sistematika pembahasan.

- 2. BAB 2 Dasar Teori**

Bab ini menjelaskan mengenai teori-teori penunjang yang berkaitan dengan tugas akhir.

- 3. BAB 3 Sistem Kelistrikan PT Indonesia Power UJP PLTU Banten 1 Suralaya Unit 8**

Bab ini membahas tentang konfigurasi kelistrikan eksisting pada PT Indonesia Power UJP PLTU Banten 1 Suralaya Unit 8.

- 4. BAB 4 Simulasi dan Analisis**

Bab ini membahas analisis koordinasi proteksi hasil simulasi serta insiden energi yang dihasilkan sesuai standar IEEE 1984-2002 dan dengan metode modifikasi. Penentuan kategori insiden energi, jarak aman pekerja dan pemilihan alat pelindung diri yang tepat. Serta membahas *setting* rele differensial.

- 5. BAB 5 Penutup**

Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari keseluruhan pembahasan tugas akhir.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Gangguan Arus Lebih Sistem Tenaga Listrik

Gangguan arus lebih yang terjadi pada sistem tenaga listrik pada umumnya disebabkan oleh beban lebih(*overload*) dan gangguan hubung singkat(*short circuit*).

2.1.1 Gangguan Beban Lebih

Beban lebih adalah peristiwa dimana arus yang mengalir melebihi arus nominal peralatan ($I > I_n$) karena terjadi pembebanan yang melebihi kapasitas peralatan, apabila berlangsung secara berlanjut maka dapat merusak peralatan tersebut.

2.1.2 Gangguan Hubung Singkat

Hubung singkat adalah peristiwa terhubungnya antar pengantar yang seharusnya tidak diizinkan terhubung. Arus hubung singkat dapat menyebabkan kerusakan besar pada sistem tenaga, biasanya memiliki besaran berkali-kali lebih besar dari arus beban. Konsekuensi dari semua ini arus magnitudo tinggi dapat menjadi bencana bagi operasi normal sistem tenaga[1].

Terdapat dua jenis gangguan hubung singkat, yaitu hubung singkat simetri dan asimetri. Hubung singkat simetri adalah gangguan yang terjadi pada semua fasanya sehingga arus maupun tegangan setiap fasanya tetap seimbang, meliputi gangguan $3\emptyset$ dan $3\emptyset-G$. Gangguan asimetri adalah gangguan yang mengakibatkan tegangan dan arus yang mengalir pada setiap fasanya menjadi tidak seimbang, meliputi gangguan $2\emptyset$, $2\emptyset - G$, $1\emptyset-G$.

2.2 Perhitungan Arus Hubung Singkat

Rumus menghitung arus hubung singkat dapat dibedakan menurut jenis terjadinya gangguan sebagai berikut[1][2]:

- #### • Hubung Singkat Tiga Fasa

$$I_{sc} 3\emptyset = \frac{V_{LN}}{Z_1} \dots \quad (1)$$

Dimana

V_{LN} = Tegangan saat gangguan

Z_1 = Impedansi urutan positif.

- **Hubung Singkat Antar Fasa**

$$I_{SC} 2\emptyset = \frac{V_{LL}}{z_1 + z_2} \dots \quad (2)$$

V_{LL} = Tegangan saat gangguan

Z_2 = Impedansi urutan negatif.

Jika X_1 sama dengan X_2 maka :

$$I_{SC} 2\phi = \frac{V_{LL}}{2X_1}$$

karena :

$$V_{LL} = \sqrt{3} V_{LN}$$

Sehingga :

$$I_{SC} 2\phi = \frac{\sqrt{3} V_{LN}}{2x_1}$$

apabila mengacu pada persamaan maka :

$$I_{SC}2\emptyset = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{SC}3\emptyset$$

• Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Dengan NGR

Keterangan:

$I_{SC1\theta}$ = arus hubung singkat 1 fasa ke tanah

V_{LI} = tegangan bus saat gangguan

Z_1 = Impedansi urutan positif

Z_2 = Impedansi urutan neg

Z_0 = Impedansi urutan

R_0 = Resistansi NGR

2.3 Rele Arus Lebih

Rele arus lebih akan bekerja ketika arus yang mengalir melebihi batas *setting* rele. Prinsip kerja dari rele arus lebih adalah sebagai berikut:

Jika $If > Ip$ rela bekerja (pertahah *trip*)

Jika $If < Ip$ relé tidak bekerja.

Dimana:

If = arus fault yaitu arus gangguan.

I_p = arus pickup yaitu setting arus pada rele.

Setting untuk batas bawah (low set) pada umumnya, arus pickup menurut British Standard BS 142 adalah :

$$1,05 \text{ FLA} < I_{set} < 1,4 \text{ FLA} \dots \quad (9)$$

Untuk batas atas(*high set*) dipakai arus gangguan yang terkecil yaitu arus gangguan hubung singkat antar fasa[8]. Hal ini bisa dituliskan dalam persamaan berikut.

Keterangan:

I_{PP} =Arus pick up

$I_{SC\min}$ = Arus gangguan hubung singkat minimum antar fasa

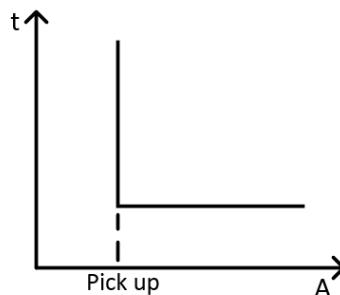
K_s = Faktor sensitivitas(1,3-1,5)

Dipilih menggunakan faktor sensitivitas 1,3 sehingga

Sehingga persamaan untuk setting *low set* dan *high set* adalah sebagai berikut:

2.2.1 Rele Arus Lebih *Definite*

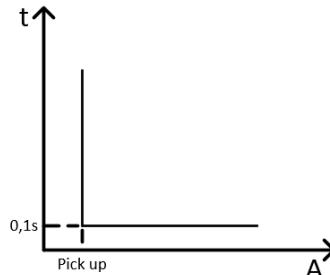
Rele arus lebih definite adalah rele yang bekerja sesuai dengan waktu tunda yang telah ditentukan, sehingga *setting* dapat diubah-ubah atau bervariasi sesuai persamaan 8. Berikut merupakan kurva karakteristik *definite*.



Gambar 2. 1 Kurva Karakteristik Rele Arus Lebih *Definite*

2.2.2 Rele Arus Lebih *Instantaneous*

Prinsip kerja jenis rele ini adalah tanpa penundaan waktu, tetapi masih bekerja dengan waktu cepat sebesar 0,1detik. Berikut merupakan kurva karakteristik instan.



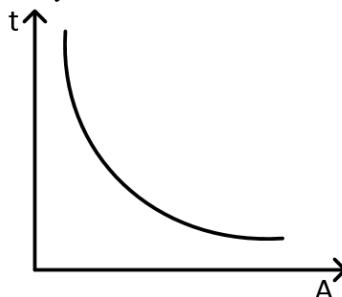
Gambar 2. 2 Kurva Karakteristik Rele Arus Lebih *Instantaneous*

Setting rele arus lebih waktu instan bekerja secara seketika saat $If > Ip$ yaitu $1,6 I_{FL} \leq I_{Set} \leq 0,8 I_{sc \ min}$(9)

Pada trafo syarat setting *pick up* untuk koordinasi harus memenuhi syarat berikut: $1,25 I_{sc \ max \ LV} \leq I_{Set \ HV} \leq 0,8 I_{sc \ min \ HV}$, ketika $I_{sc \ max \ LV} < 0,8 I_{sc \ min \ HV}$, pengaturan time dial pada sisi primer pada kondisi tersebut akan dapat kembali seperti pengaturan rele utama yaitu 0,1s. [8]

2.2.3 Rele Arus Lebih *Invers*

Rele arus lebih *inverse* atau rele arus lebih waktu terbalik adalah arus waktu operasi berbanding terbalik terhadap arus gangguan, sehingga semakin besar arus gangguan maka semakin kecil waktu operasi rele dan sebaliknya.



Gambar 2. 3 Kurva Karakteristik Rele Arus Lebih *Inverse*

Kemudian *setting time dial*, dimana *setting* ini menentukan waktu operasi. Penentuan *time dial* dari masing – masing kurva karakteristik *invers* dapat menggunakan persamaan standar IEC 60255 sebagai berikut:

Keterangan :

td = Waktu operasi (detik)

T = Time multiplying setting (time dial)

I = Arus gangguan (ampere)

I_s = Arus pickup (ampere)

K = Koefisien *invers* 1 (lihat tabel 2.1)

α = Koefisien *invers 2* (lihat tabel 2.1)

β = Koefisien *invers* 3 (lihat tabel 2.1)

Tabel 2. 1 Konstanta Rele Arus Lebih *Inverse*

Tipe Kurva	Koefisien	
	K	A
Standard Inverse	0,14	0,02
Very Invers	13,50	1
Extremely Invers	80	2
Long-time inverse	120	2
Short-time inverse	0,05	0,04

2.4 Koordinasi Rele Arus Lebih

Susunan rele pengaman dalam suatu sistem kelistrikan terdiri dari rele pengaman utama dan rele pengaman cadangan (*back up*). Antara rele pengaman utama dan rele pengaman *back up* harus dikoordinasikan agar rele tidak bekerja secara bersamaan maka diperlukan waktu tunda (*time delay*). Pada IEEE 242-2001 menunjukkan

bahwa waktu kerja minimal antara rele utama dan rele *backup* adalah 0.2 – 0.35 detik.

Waktu buka CB : 0.04 – 0.1s (2-5 cycle)
Overtravel dari rele : 0.1s
 Faktor keamanan : 0.12-0.22s

Untuk rele berbasis *microprosessor* *Overtravel time* dari rele diabaikan. Sehingga total waktu yang diperlukan adalah 0.2-0.4s.

2.5 Rele Gangguan Tanah

Rele gangguan tanah adalah rele untuk mengamankan peralatan dari hubung singkat satu fasa ke tanah. Rele ini digunakan pada sistem yang menggunakan sistem pentahanan untuk membatasi arus gangguan ke tanah.

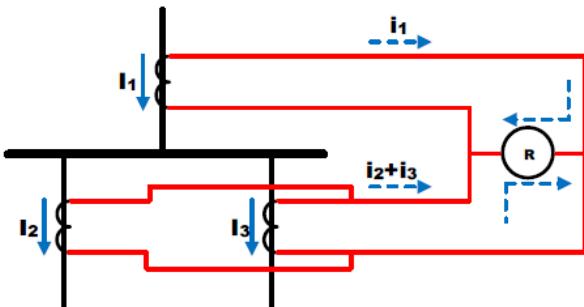
Setting rele gangguan tanah digunakan I_{sc} L-G atau arus *short circuit* satu fasa ke tanah, sebagai batas penentuan arus *setting*-nya. Dengan persamaan sebagai berikut[2]:

Pada sistem dengan menggunakan *Neutral Grounding Resistor* (NGR), nilai arus gangguan satu fasa ke tanah diasumsikan adalah nilai arus maksimum melalui NGR tersebut. Sehingga persamaannya sebagai berikut :

$$5\text{-}10\% \times I_{\text{maks. NGR}} \leq I_{\text{set}} \leq 50\% \times I_{\text{maks. NGR}} \quad \dots \dots \dots \quad (12)$$

2.6 Rele Differensial

Rele differensial mengacu pada hukum kirchoff yaitu keseimbangan antara jumlah arus yang masuk dan jumlah arus keluar pada titik, sehingga rele differensial membandingkan arus yang masuk dengan arus yang keluar pada zonanya. Perlindungan rele differensial ini beroperasi jika terjadi gangguan di dalam zona proteksi dan tidak terpengaruh terhadap gangguan dari luar zona proteksi transformator. Zona proteksi di dalam transformator dibatasi transformator arus *Incoming* dan *Outgoing*. Berikut merupakan aliran arus pada rele differensial saat kondisi normal.



Gambar 2. 4 Aliran Arus Kondisi Normal Operasi

Menurut IEEE Std C.37.234 parameter *setting* kerja rele diferensial dapat dilihat pada persamaan berikut ini :

$$I_{Diff} = \left| I_1 - I_2 \right|$$

$$I_R = f(|I_1| + |I_2| + |I_3| + \dots + |I_n|)$$

$$\text{Slope}(\%) = \frac{I_{Diff}}{I_R}$$

Dan akan berbeda dalam penentuan I_R sesuai standar dari *manufacturer* rele tersebut.

Dimana:

I_{Diff} = Perbedaan arus antara sisi primer dengan sekunder

I_R = Arus penahan

I_1 = Arus pada sisi primer

I_2 = Arus pada sisi sekunder

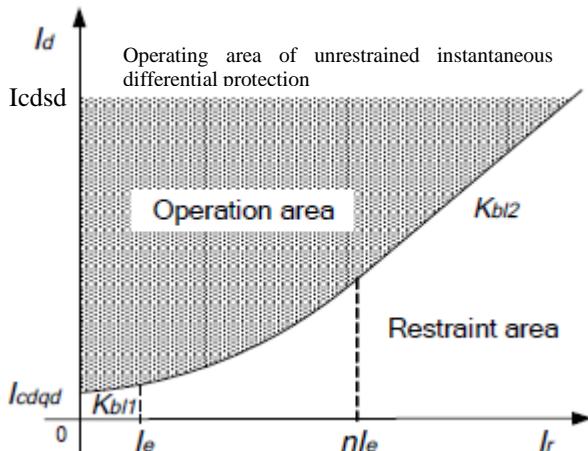
2.6.1 RCSS-985B

Rele RCS-985B merupakan rele yang dipilih karena berbasis microprocessor dan dapat digunakan untuk transformer, generator dan bus. Elemen differensial menggunakan karakteristik dual slope dan dual breakpoint, dimana *breakpoint* merupakan nilai yang sudah ditetapkan yaitu untuk *breakpoint* pertama senilai dengan I_e dan *breakpoint* kedua senilai dengan $4I_e$. Parameter *setting* rele differensial RCS-985B adalah sebagai berikut:

- $I_{Pkp_PcntDiff_GTU} = 0,10-2(I_e)$ step 0,01
- $I_{InstDiff_GTU} = 4.0-14.0(I_e)$ step 0,01
- $\text{Slope1_PcntDiff_GTU} = 0,05-0,80$ step 0,01
- $\text{Slope2_PcntDiff_GTU} = 0,40-0,80$ step 0,01

- $I_R = \frac{|I_1| + |I_2| + |I_3| + |I_n|}{2}$

Karakteristik operasi dari rele differensial RCS-985B ditunjukkan pada gambar 2.5 berikut.



Gambar 2. 5 Karakteristik Operasi Proteksi Differensial Arus

Dimana:

- I_{cdqd} merupakan nilai pickup yang mana akan mendekripsi gangguan
- K_{bl1} merupakan slope untuk arus restrain dari nol hingga breakpoint pertama. Setting ini menentukan sensitivitas rele untuk arus hubungan singkat yang bernilai kecil di daerah internal. Nilai setting low slope yang dipilih harus dapat mengatasi arus diferensial palsu akibat ketidaktelitian operasi CT pada mode linier baik pada kondisi normal[13].
- K_{bl2} merupakan slope untuk arus restrain lebih dari breakpoint pertama dan slope lebih dari K_{bl1} . Setting K_{bl2} berguna agar rele tetap stabil saat terjadi arus hubung singkat yang terjadi didaerah eksternal[13].

Berdasarkan kurva karakteristik operasi *differensial* dapat diketahui bahwa daerah di atas garis slope merupakan daerah kerja rele ketika terjadi gangguan internal sedangkan daerah di bawah garis slope merupakan daerah rele tidak bekerja pada kondisi normal maupun ketika

terjadi gangguan eksternal. Pada karakteristik operasi rele RCS-985B dibagia menjadi tiga daerah kerja, yaitu:

1. *Operation area of steady state*

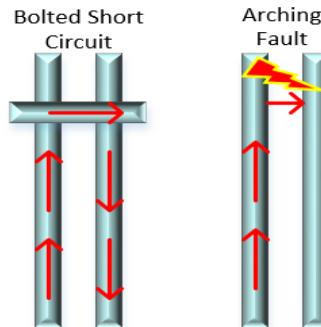
Rele tidak akan mengirim sinyal tripping jika CT saturasi, kegagalan rangkaian CT (opsional), arus inrush dan kondisi overexcitation. Ini dapat memastikan sensitivitas perlindungan dan menghindari operasi yang tidak diinginkan ketika CT jenuh selama kesalahan eksternal. Area operasinya adalah area warna abu-abu[13].

2. *Operation area of unrestrained instantaneous*

Rele akan mengirim sinyal tripping tanpa blocking, jika arus diferensial dari fase apa pun mencapai pengaturannya. area operasi berada di atas *operation area of steady state* [13].

2.7 Arc Flash

Busur Api (*arc flash*) ialah pelepasan energi listrik yang mengalir antar konduktor berbeda potensial melalui konduktor dengan nilai impedansi nol (*bolted short circuit*) atau antar konduktor melalui udara(*arching fault*) [3]. *Arc flash* akan menyebabkan terjadinya energi panas dan ledakan peralatan sehingga sangat berbahaya bagi lingkungan sekitar baik itu pekerja atau peralatan lain.



Gambar 2. 6 Arching Fault dan Bolted Fault

Energi yang dihasilkan *arc flash* linier dengan arus hubung singkat yang terjadi, serta total waktu kerja peralatan pengaman memutus gangguan. Enegi panas yang ditimbulkan oleh *arc flash* dapat mencapai $35.000^{\circ}C$ atau lebih besar 3.5 kali lipat dari energi panas matahari sehingga perlu untuk digunakan alat pelindung diri[5].

2.7.1 Perhitungan Insiden Energi Arc Flash Standar IEEE 1584-2002

Perhitungan insiden energi *arc flash* sesuai dengan standar IEEE 1584-2002 didasarkan pada arus hubung singkat yang terjadi pada level tegangan rendah maupun menengah. Perbedaan level tegangan ini mempengaruhi perhitungan menentukan insiden energi *arc flash* [3]. Untuk Pengaplikasian pada sistem dibawah 1000V menggunakan persamaan IEEE 1584-2002 sebagai berikut.

$$l_g I_a = K + 0,662 l_g I_{bf} + 0,0946 V + 0,000526 G + 0,5588 V(l_g I_{bf}) - 0,00304 G(l_g I_{bf}) \quad \dots \quad (13)$$

Untuk pengaplikasian pada sistem diatas 1000V menggunakan persamaan berikut.

- Atau

$$l_g I_a - l_g I_{bf}^{0,0983} = 0,00402$$

$$l_g \left(\frac{I_a}{i_{bf}^{0,0983}} \right) = 0,00402$$

$$\frac{l_a}{l_{0,983}} = 10^{0,00402}$$

$$\frac{l_a}{l_{bf}^{0,983}} = 1,00929$$

Dimana

$$l_a = \log_{10}$$

I_a =Arcing Current (kA)

K = -0,153 untuk konfigurasi terbuka
-0,097 untuk konfigurasi pada batas

I_{bf} = bolted fault current untuk gangguan tiga phasa (Symmetrical RMS)(kA)

V = Tegangan Sistem (kV)

G = Gap antar konduktor (mm)

Untuk mendapatkan nilai dari jarak konduktor (G) dan jarak kerja dari jenis peralatan maka mengacu pada IEEE 1584 – 2002 yang tertera pada tabel

Tabel 2. 2 Parameter *Gap Bus* dan *Working Distance*

Kelas Peralatan	Typical bus gaps (mm)	Typical working distance (mm)
15 kV Switchgear	152	910
5 kV Switchgear	104	910
Low-voltage switchgear	32	610
Low-voltage MCCs dan panel boards	25	455
Cable	13	455
Other	Not required	Ditentukan dilapangan

Setelah *arching current* diperoleh untuk nilai *normally incident energy*. Dengan menggunakan persamaan berdasarkan data normal untuk waktu *arching* selama 0,2 detik dan jarak memungkinkan manusia dengan titik *arching* sebesar 610 mm [3]. Besar *normally incident energy* adalah

kemudian

$$E_n = 10^{\lg E_n} \dots \quad (17)$$

Atau

$$E_n = I_a^{1,081} 10^{(K_1 + K_1 + 0,0011G)} \dots \quad (18)$$

n-a
Dimana-

E_n = Insiden Energi Normalized(J/cm^2)

$K_1 = -0,792$ untuk konfigurasi terbuka(tanpa penutup)

-0,555 untuk konfigurasi didalam box(dengan penutup)

$K_2 = -0$ untuk ungrounded dan tahanan resistansi tinggi

=-0.113 untuk sistem dengan pentahanan

$G =$ Gap antar konduktor(mm)

- Gap antar kohduktori (mm)

Akhirnya, ubah dari normalized untuk menemukan inciden energi dengan persamaan

$$E = C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \dots \quad (19)$$

Dengan subsitusi persamaan (15), (18) ke persamaan (19) maka didapatkan persamaan sebagai berikut:

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

..... (20)

Dimana:

E = Insiden Energi (cal/cm^2)

C_f = Faktor Perhitungan

E_n	1.0 untuk tegangan diatas 1 kV 1.5 untuk tegangan dibawah 1,5 kV
t	=Insiden Energi Normalized
D	=Jarak memungkinkan dari titik arcing ke manusia(mm)
x	=jarak eksponen

Parameter yang digunakan untuk menghitung insiden energi dibedakan berdasarkan level tegangan peralatan dan jenis peralatan. Parameter – parameter untuk menghitung insiden energi tertera pada tabel berikut.

Tabel 2. 3 Parameter Jarak Faktor x

Tegangan Sistem (kV)	Jenis Peralatan	Tipikal Gap Konduktor(mm)	Jarak Eksponen	Tipikal Jarak Kerja(mm)
0,208-1	Open Air	10-40	2,000	-
	Switchgear	32	1,473	610
	MCC dan Panel	25	1,641	455
	Cable	13	2,000	455
>1-5	Open air	102	2,000	-
	Switchgear	13-102	0,973	910
	Cable	13	2,000	455
>5-15	Open air	13-153	2,000	-
	Switchgear	153	0,973	910
	Cable	13	2,000	455

2.7.2 Perhitungan Insiden Energi Arc Flash Metode Modifikasi

Metode modifikasi dapat digunakan untuk menghitung besar insiden energi dari *arc flash* yang mana metode tersebut merupakan pengembangan dari perhitungan standar IEEE 1584-2002 dengan memperhitungkan arus kontribusi saat *subtransient*, *transient*, dan *steady state* yang dari generator sinkron, motor sinkron dan motor induksi[4].

Perhitungan menggunakan pengelompokan domain waktu berdasarkan konstanta waktu tipikal mesin berputar untuk fase peralihan hubung singkat tertentu. Adapun domain waktu berdasarkan *modified medium voltage arc flash incident energy calculation method* tersebut terdapat pada tabel 2.5.

Tabel 2. 4 Pengelompokan Domain Waktu

Domain Waktu	Fase Peralihan	Komponen Menyumbang Arus Hubung Singkat
0-0,035	Subtransient	Utility, Generator, Synchronous Motors & Induction Motor(>1000 HP), Induction Motors(>250HP), Induction Motors(50-200HP), Induction Motors(<50HP)
0,035-0,067	Transient	Utility, Generator, Synchronous Motors & Induction Motor(>1000 HP), Induction Motors(>250HP), Induction Motors(50-200HP)
0,067-0,8	Transient	Utility, Generator, Synchronous Motors & Induction Motor(>1000 HP),
0,80-0,83	Steady State	Utility, Generator.
0,83-t seconds	Steady State	Generator

Sehingga total insiden energi sebagai berikut:

$$E_{total} = E_{0,035sec} + E_{0,067sec} + E_{0,8sec} + E_{0,83sec} + E_{tsec} \dots\dots \quad (21)$$

2.8 Flash Protection Boundary

Flash Protection Boundary merupakan batas jarak terdekat dari bagian aktif yang tidak diinsulasi atau terbuka di mana seseorang

dapat menerima luka bakar tingkat kedua atau batas perlindungan dari arc-flash[3].

Atau

Dimana

D_B = Jarak batas dari titik arcing(mm)

C_f = Faktor Perhitungan

1.0 untuk tegangan diatas 1 kV

1.5 untuk tegangan diatas 1 kV

E_n = Insiden Energi Normalized(J/cm^2)

E = Insiden Energi (cal/cm^2)

t =Arcing time(s)

E_B =Energi kejadian dalam J / cm^2 pada jarak batas saat tanpa perlindungan ($5 J/cm^2$)

x = jarak exponent

2.9 Kategori PPE Dan Alat Pelindung Diri Sesuai Standar NFPA 70E 2015

Perlengkapan keselamatan kerja (*Personal Protective Equipment*, PPE) diklasifikasikan berdasarkan nilai minimum insiden energi. Berdasarkan standar NFPA 70E – 2015 menjelaskan kategori insiden energi serta dampak yang diterima saat terkena busur api dan PPE yang digunakan berdasarkan minimum insiden energi. Pada NFPA 70E 2015 terdapat perubahan dalam menentukan kategori PPE yaitu dengan didasarkan pada minimum insiden energi yang mana pada NFPA 70 E edisi sebelumnya didasarkan pada maksimum insiden energi. Kategori PPE dikelompokkan berdasarkan minimum insiden energi ditunjukkan pada tabel 2.5 berikut.

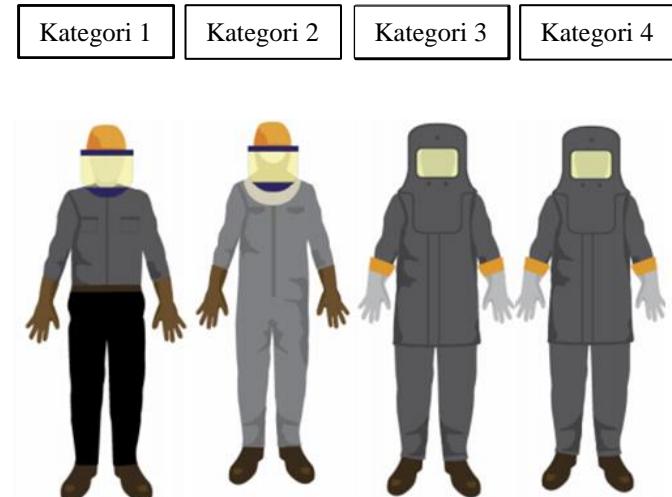
Tabel 2. 5 Kategori PPE (*Personal Protective Equipment*)

Kategori PPE	Minimum Insiden Energi (cal/cm ²)	Alat Pelindung Diri/ PPE	
		Pakaian	Peralatan Pelindung
1	4	Kemeja lengan panjang dan celana dengan arc rating, Hood suit atau pelindung wajah dengan arc rating dan balaclava, Jaket, jaket, jas hujan dengan arc rating	Topi, Kacamata pengaman atau kacamata keselamatan (SR), Pelindung pendengaran (sisipan saluran telinga), Sarung tangan kulit, Alas kaki kulit.
2	8	Kemeja lengan panjang dan celana dengan arc rating Hood suit atau pelindung wajah dengan arc rating dan balaclava, jaket, jas hujan dengan arc rating	Kacamata pengaman atau kacamata keselamatan, Pelindung pendengaran Sisipan saluran telinga), Sarung tangan kulit, Sepatu kulit

Tabel 2. 5 (Lanjutan) Kategori PPE (*Personal Protective Equipment*)

Kategori PPE	Minimum Insiden Energi	Alat Pelindung Diri/ PPE	
		Pakaian	Peralatan Pelindung
3	25	Kemeja lengan panjang dan Celana dengan arc rating Jaket setelan flash arc dengan pengenal busur Celana arc suit flash, Hood suit arc flash dengan nilai arc rating Sarung tangan denga arc raing, Jaket, jaket, jas hujan, atau topi	Topi, Kacamata pengaman atau kacamata keselamatan (SR) Pelindung pendengaran (sisipan saluran telinga) Sepatu kulit
4	40	Kemeja lengan panjang dan Celana dengan arc rating Jaket setelan flash arc dengan pengenal busur Celana arc suit flash, Hood suit arc flash dengan nilai arc rating Sarung tangan denga arc raing, Jaket, jaket, jas hujan, atau topi dengan arc rating	Topi, Kacamata pengaman atau kacamata keselamatan (SR) Pelindung pendengaran (sisipan saluran telinga) Sepatu kulit

Dari tabel diatas, apabila diilustrasikan ke dalam sebuah gambar maka akan seperti gambar 2.5 berikut.



Gambar 2. 7 PPE Berdasarkan Kategori *Arc Flash*

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III

SISTEM KELISTRIKAN PT INDONESIA POWER

UJP PLTU BANTEN 1 SURALAYA UNIT 8

3.1 Sistem Kelistrikan

PT Indonesia Power UJP PLTU Banten 1 Suralaya Unit 8 merupakan pembangkit listrik tenaga uap yang dioperasikan oleh Indonesia Power (IP) sejak awal operasi, yaitu tahun 2011 dengan kapasitas 1x625 MW dan dengan bahan bakar batu bara tipe *low rank coal* dengan nilai kalor sebesar 4.200 Kcal/kg. Energi yang diproduksi akan disalurkan ke saluran transmisi suralaya 500 kV dengan *step up* trafo 20/500kV berkapasitas 730 MVA. Pendistribusian tenaga listrik kebutuhan sendiri untuk pembangkitan menggunakan sistem radial dengan tegangan menengah 6 kV melalui trafo UAT A dan trafo UAT B dengan masing-masing berkapasitas sebesar 34 MVA, untuk tegangan rendah 0,4 kV. Gambar *single line diagram* dari tegangan menengah PT Indonesia Power UJP PLTU Banten 1 Suralaya untuk dilakukan koordinasi dengan mempertimbangkan *arc flash* berada pada lampiran.

3.2 Data Peralatan

Data peralatan mencakup semua data pada level tegangan menengah, meliputi generator, transformator dan beban motor.

3.2.1 Data Generator

Generator yang digunakan untuk pembangkitan pada PT Indonesia Power UJP PLTU Banten 1 Suralaya berkapasitas 1x625MW, untuk kelengkapan data dapat dilihat pada tabel 3.1

Tabel 3. 1 Data Generator

No	ID	Daya (MW)	Tegangan (kV)	FLA (kA)	Cos θ (%)
1	Generator	625	6	21.226	85

3.2.2 Data Transformator

Terdapat 4 buah transformator pada sistem tegangan menengah, antara lain 1 buah trafo step up atau Generator Transformer (GT) untuk mentransformasikan daya ke sistem transmisi 500 kV PLN, 2 buah transformator Unit Auxiliary Transformer (UAT), dan 1 buat Stand By

Transformer (SSAT) sebagai back up. Data Transformator dapat dilihat pada tabel 3.2

Tabel 3. 2 Data Transformator

No	ID	Daya (MV A)	Tegangan Prim/Sek (kV)	FLA Prim/Sek (A)	Z (%)
1	GT	730	20/500	21.651/866	14
2	SSAT	45	150/6	173,2/4.330	17,2
3	UAT A &B	34	20/6	9.815/3.272	10,46
4	UATB	34	20/6	9.815/3.272	10,46
4	Turbine A	1,6	6,3/0,4	146,6/2199,5	8,33
5	Turbine B	1,6	6,3/0,4	146,6/2199,5	8,33
6	Boiler A	1,6	6,3/0,4	146,6/2199,5	8,33
7	Boiler B	1,6	6,3/0,4	146,6/2199,5	8,33
6	Water System A	1,6	6,3/0,4	146,6/2199,5	8,33
7	Water System B	1,6	6,3/0,4	146,6/2199,5	8,33
8	ESP A	2,5	6,3/0,4	229,1/3436,7	10,66
9	ESP B	2,5	6,3/0,4	229,1/3436,7	10,66
10	Station Service A	1,6	6,3/0,4	146,6/2199,5	8,33
11	Station Service B	1,6	6,3/0,4	146,6/2199,5	8,33
12	Ash Handling A	1	6,3/0,4	91,64/1375	5,85
13	Ash Handling B	1	6,3/0,4	91,64/1375	5,85
14	Lighting	0,63	6,3/0,4	57,74/866	4,06
15	Caol Handling	0,63	6,3/0,4	57,74/866	4,11
16	Mainten- nance	0,63	6,3/0,4	57,74/866	4,18
17	Chlorinat- ion A	1,1	6,3/0,4	100,8/1512	6
18	Chlorinat- ion B	1,1	6,3/0,4	100,8/1512	6

3.2.3 Data Beban

Beban pada sistem tegangan menengah merupakan beban motor induksi untuk proses pembangkitan energi listrik, dapat dilihat pada tabel 3.4.

Tabel 3. 3 Data Beban

Switchboard 10BBA01						
No	ID	Daya (kW)	Tegangan (kV)	FLA (A)	Cos θ (%)	RPM
1	Ball Race Mill G	748	6	89,62	77,2	992
2	Ball Race Mill E	748	6	89,62	77,2	992
3	Ball Race Mill B	748	6	89,62	77,2	992
4	Ball Race Mill A	748	6	89,62	77,2	992
5	Boiler Water Pump A	399	6	47,62	88	1450
6	Cooling Water Pump A	632	6	75,79	86	1485
7	Booster Pump of Feedwater A	560	6	66,94	86	1485
8	Forced Draft Fan A	1413	6	169,5	86	993
9	Primary Air Fan A	2743	6	329,2	88	1491
10	Induced Draft Fan A	4240	6	509,7	87	745
11	Condensate Ext Pump A	2162	6	259,4	90	1488
12	Circulating Water Pump A`	2660	6	319,9	83	372
13	Circulating Water Pump C	2660	6	319,9	83	372

Switchboard 10BBB01						
No	ID	Daya (kW)	Tegangan (kV)	FLA (A)	Cos θ (%)	RPM
1	Ball Race Mill C	748	6	89,62	77,2	992
2	Ball Race Mill D	748	6	89,62	77,2	992
3	Ball Race Mill F	748	6	89,62	77,2	992

Tabel 3. 3 (Lanjutan) Data Beban

Switchboard 10BBB01						
No	ID	Daya (kW)	Tegangan (kV)	FLA (A)	Cos θ (%)	RPM
4	Boiler Water Pump B	399	6	47,62	88	1450
5	Boiler Water Pump C	399	6	47,62	88	1450
6	Cooling Water Pump B	632	6	75,79	86	1485
7	Booster Pump of Feed Water B	560	6	66,94	86	1485
8	Forced Draft Fan B	1413	6	169,5	86	993
9	Primary Air Fan B	2743	6	329,2	88	1491
10	Induced Draft Fan B	4240	6	509,7	87	745
11	Condensate Ext Pump B	2162	6	259,4	90	1488
12	Circulating Water Pump B	2660	6	319,9	83	372
13	Motor Driven Feed Pump	6139	6	694,2	91,5	1493
Switchboard 10BCA01						
No	ID	Daya (kW)	Tegangan (kV)	FLA (A)	Cos θ (%)	RPM
1	Belt 43	283	6	33,41	87	1485
2	Belt 41	224	6	26,44	87	1484
3	Belt 45	499	6	59,09	87	1484

Tabel 3. 3 (Lanjutan) Data Beban

Switchboard 10BCA01						
No	ID	Daya (kW)	Tegangan (kV)	FLA (A)	Cos θ (%)	RPM
4	Air Compressor C	249	6	29,53	84	1485
5	Air Compressor A	249	6	29,53	84	1485
6	Crusher C	632	6	75,83	82	743
7	Intake Pump A	283	6	33,65	85	1485
Switchboard 10BCB01						
No	ID	Daya (kW)	Tegangan (kV)	FLA (A)	Cos θ (%)	RPM
1	Crusher C	632	6	75,83	82	743
2	Air Compressor B	249	6	29,53	84	1485
3	Air Compressor D	249	6	29,53	84	1485
4	Belt 46B	249	6	29,53	84	1480
5	Belt 46A	249	6	29,53	84	1480
6	Belt 42	224	6	26,44	87	1484
7	Belt 44	283	6	33,41	87	1485
8	Fire Fighting Pump	349	6	41,32	90	1488

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV

HASIL DAN SIMULASI

4.1 Permodelan sistem kelistrikan

Pemodelan sistem kelistrikan pada PT Indonesia Power UJP PLTU Banten 1 Suralaya dengan menggambar ulang *single line diagram* yang terdapat pada Gambar 3.1 dan memasukkan data-data spesifikasi peralatan yang terdapat pada PT Indonesia Power UJP PLTU Banten 1 Suralaya seperti generator, transformator, kabel, motor, busbar, CB, CT, Rele, dan pentahanan ke dalam *software* ETAP 12.6.

Setelah menggambar *single line diagram* sistem kelistrikan dan memasukkan parameter – parameter yang telah ada, dilakukan *running* simulasi aliran daya untuk mengetahui tegangan, arus nominal peralatan, serta $\cos \phi$ (faktor daya) dari peralatan, short circuit untuk mengetahui besar arus short circuit 1 fasa, 2 fasa, 3 fasa, serta dilakukan simulasi koordinasi proteksi dengan melihat Plot TCC.

4.2 Pemilihan Tipikal Koordinasi

Untuk melakukan *setting* koordinasi rele arus lebih fasa dilakukan dengan memilih beban dengan kapasitas terbesar dari salah satu busbar yang terpanjang dari sumber (generator) disebut dengan pemilihan tipikal. Pada pemilihan tipikal koordinasi *setting* rele pengaman PT Indonesia Power UJP PLTU Banten 1 Suralaya terdiri dari 2 tipikal yaitu :

- 1) Tipikal 1A: Trafo Station A, BCA01, 10BBA01, 10BBU01
- 2) Tipikal 1B: Trafo Station B, BCB01, 10BBB01, 10BBU01
- 3) Tipikal 2A: Primary Air Fan A, 10BBA01
- 4) Tipikal 2B: Primary Air Fan B, 10BBB01

Tipikal A dan B merupakan tipikal yang sama karena memiliki beban yang identik, level tegangan yang sama sehingga dapat dikelompokkan menjadi tipikal yang sama, oleh karena itu dapat dianggap menjadi satu tipikal.

4.3 Data Hubung Singkat

Data hubung singkat yang digunakan menentukan koordinasi proteksi dan menentukan nilai insiden energi menggunakan arus hubung singkat maksimum (hubung singkat 3 fasa, 4 *cycle*) dan arus hubung singkat minimum (hubung singkat antar fasa, 30 *cycle*).

4.3.1 Arus Hubung Singkat Minimum

Arus gangguan hubung singkat minimum adalah arus gangguan hubung singkat 2 fasa pada saat 30 *cycle* atau dalam keadaan *steady state*. Hubung singkat minimum merupakan parameter yang digunakan sebagai batas maksimum *setting pick up* rele arus lebih untuk *high set*. Sehingga saat terjadi hubung singkat minimum, rele arus lebih dapat langsung bekerja secara instan sesuai *time delay* yang ditentukan. Analisis dilakukan pada bus tertentu sesuai tipikal, data hubung singkat minimum dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 4. 1 Data Hubung Singkat Minimum

No	ID Bus	kV	Isc Min 30 Cycle (kA)
1	10BBA01	6	25,05
2	10BCA01	6	24,47
3	10BBB01	6	25,05
4	10BCB01	6	24,54

4.3.2 Arus Hubung Singkat Maksimum

Hubung singkat maksimum adalah hubung singkat 3 fasa pada saat 4 cycle. Hubung singkat maksimum 4 cycle digunakan untuk *setting* rele dengan *setting* kelambatan waktu 0.08-0.5s. Hubung singkat maksimum digunakan sebagai batasan arus hubung singkat terbesar yang mungkin terjadi. Dalam mencari hubung singkat maksimum diambil dari arus kontribusi yang menuju ke bus, data hubung singkat maksimum dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4. 2 Data Hubung Singkat Maksimum

No	ID Bus	kV	Isc Max 4 Cycle (kA)
1	10BBA01	6	38,58
2	10BCA01	6	37,42
3	10BBB01	6	36,68
4	10BCB01	6	35,77

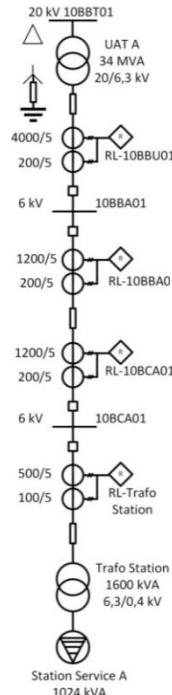
4.4 Koordinasi Rele Arus Lebih

Pada koordinasi rele arus lebih gangguan fasa akan dilakukan penentuan *setting* arus *pickup* serta *time dial*. Penentuan *setting* tersebut dibedakan kedalam 3 tipikal.

Setelah menentukan *setting pick up* dan *time dial* langkah selanjutnya yaitu melakukan plot *Time current curve* pada *software ETAP 12.6.0* untuk mengevaluasi *setting koordinasi* yang dilakukan. Pada

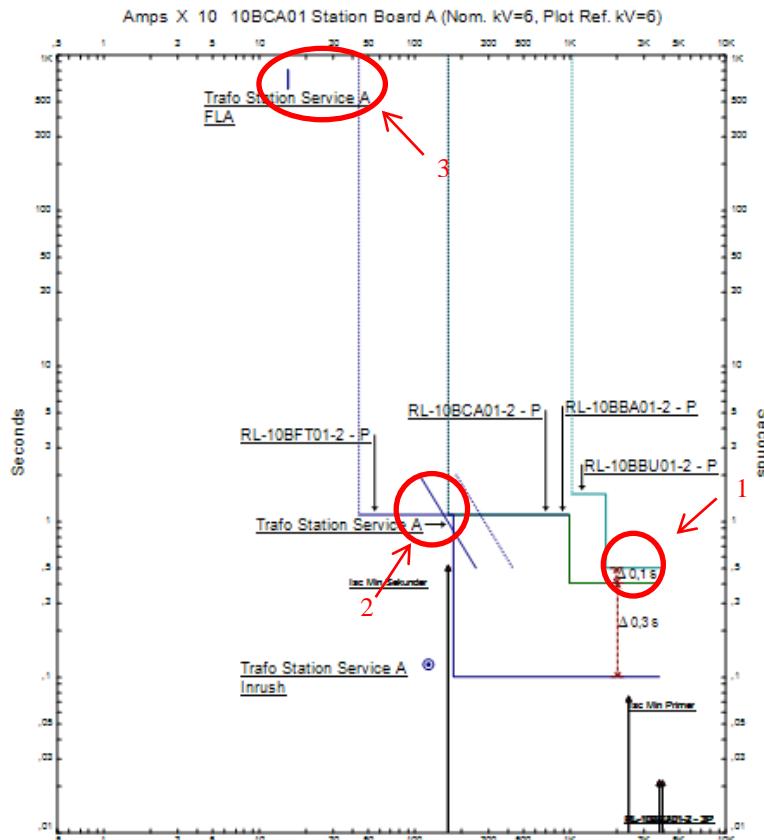
4.4.1 Tipikal 1A dan 1B

Sebelum melakukan *resetting* koordinasi proteksi, maka diperlukan simulasi dari sistem *existing* tipikal 1A dan 1B untuk mengetahui keadaan mula sistem. Pada tipikal 1A dan tipikal 1B memiliki spesifikasi beban, level tegangan yang sama sehingga *setting* koordinasi proteksi identik. Analisis pada tipikal 1A dan 1B dilakukan koordinasi dari trafo station service hingga generator dengan membandingkan hasil *existing* koordinasi proteksi dengan hasil *resetting*. Berikut gambar 4.1 merupakan *single line diagram* dari tipikal 1A dan 1B.



Gambar 4. 1 Single Line Diagram Tipikal 1A dan 1B

Untuk mengetahui koordinasi proteksi tipikal 1A dan 1B dari sistem *existing*, maka diperlukan simulasi dengan memberikan gangguan dan melihat plot TCC saat terjadi gangguan tersebut, berikut merupakan hasil dari plot TCC Tipikal 1A dan 1B saat terjadi gangguan phasa



Gambar 4. 2 Plot TCC Tipikal 1A dan 1B *Existing*

Dari hasil plot kurva koordinasi rele pada tipikal 1A dan 1B *existing* terdapat kesalahan yang akan menyebabkan koordinasi proteksi tidak bekerja dengan baik. Pada lingkaran 1, rele RL-10BBU01 sebagai *backup* dari rele RL-10BBA01 dan RL-10BCA01 memiliki

perbedaan waktu 0,1 s, hal ini kurang tepat karena tidak sesuai standar yang digunakan dan dapat menyebabkan rele bekerja bersamaan. Pada lingkaran 2 terdapat persinggungan antara rele RL-10BFT dengan RL-10BCA01 dan RL-10BBA01 yang mana akan menyebabkan rele bekerja bersamaan pada arus gangguan dengan nilai tertentu, lalu terlihat bahwa RL-10BFT01-2 tidak dapat melindungi trafo dari kondisi *demage* trafo yang mana trafo akan mengalami kerusakan terlebih dahulu dan rele belum bekerja. Sedangkan *setting pick up* untuk melindungi trafo dari beban berlebih terlalu besar sehingga rele tidak dapat bekerja maksimal untuk melindungi trafo saat terjadi beban berlebih hal ini ditunjukkan pada lingkaran 3.

Dari hasil analisis terhadap koordinasi sistem *existing* tipikal 1A dan 1B, maka diperlukan *resetting* untuk membuat sistem proteksi bekerja dengan baik. Perhitungan untuk *resetting* sebagai berikut.

RL-BFT

<i>Manufacturer</i>	: Guodian Nanjing Automation
<i>Model</i>	: NEP983
<i>Curve type</i>	: IEC Standar Inverse
<i>FLA</i>	: 146,6 A
<i>Inrush current</i>	: 1174 A
<i>CT ratio</i>	: 500 / 5
Isc min primer trafo station	: 23,91 kA
Isc max primer trafo station	: 37,28 kA
Isc max sek trafo statio	: 1,67 kA

Overcurrent Pickup

$$1,05 \times I_{FL} \leq Iset \leq 1,4 \times I_{FL}$$

$$1,05 \times 146,6 \leq Iset \leq 1,4 \times 146,6$$

$$153,93 \leq Iset \leq 205$$

Dipilih $Iset = 176$

$$\text{Pick up} = \frac{Iset}{nCT} = \frac{176}{100} = 1,76$$

Time dial

dipilih *time delay(t)* = 0,3 detik

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I}{Iset}\right)^{0,02} - 1} \times t_p$$

$$t_p = \frac{\left(\frac{I}{I_{set}}\right)^{0,02} - 1}{0,14} \times t$$

$$t_p = \frac{\left(\frac{37280}{160}\right)^{0,02} - 1}{0,14} \times 0,3$$

$$t_p = 0,246 \text{ dipilih } 0,25$$

Instantaneous

$$1,6 \times I_{FL} \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc \ min}$$

$$1,6 \times 146,6 \leq I_{set} \leq 0,8 \times 24470$$

$$234,56 \leq I_{set} \leq 19576$$

$$\text{Dipilih } I_{set}=1770$$

$$\text{Pick up} = \frac{I_{set}}{nCT} = \frac{1770}{100} = 17,7$$

Time delay

dipilih *time delay* = 0,1 detik

RL-10BCA01

Manufacturer : Guodian Nanjing Automation

Model : NEP981

Curve type : Definite

FLA : 558,5 A

CT ratio : 1200 / 5

Isc min 10BCA01 : 24,47 kA

Isc max 10BCA01 : 37,42 kA

Overcurrent Pickup

$$1,05 \times I_{FL} \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc \ min}$$

$$1,05 \times 558,5 \leq I_{set} \leq 0,8 \times 24470$$

$$586,42 \leq I_{set} \leq 19576$$

$$\text{Dipilih } I_{set}=1162$$

$$\text{Pick up} = \frac{I_{set}}{nCT} = \frac{1162}{240} = 4,84$$

Time delay

dipilih *time delay* = 1,2 detik

Instantaneous

$$1,6 \times I_{FL} \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc \ min}$$

$$1,6 \times 558,5 \leq I_{set} \leq 0,8 \times 24470$$

$$893,6 \leq I_{set} \leq 19576$$

Dipilih $I_{set}=2496$

$$\text{Pick up} = \frac{I_{set}}{nCT} = \frac{2496}{240} = 10,40$$

Time delay

dipilih *time delay* = 0,3 detik

RL-10BBA01

<i>Manufacturer</i>	:	Guodian Nanjing Automation
<i>Model</i>	:	NEP983E
<i>Curve type</i>	:	<i>Definite</i>
<i>FLA</i>	:	558,5 A
<i>CT ratio</i>	:	1200 / 5
<i>Isc min 10BCA01</i>	:	24,47 kA
<i>Isc max 10BBA01</i>	:	38,58 kA

Overcurrent Pickup

$$1,05 \times I_{FL} \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc \ min}$$

$$1,05 \times 558,5 \leq I_{set} \leq 0,8 \times 24470$$

$$586,42 \leq I_{set} \leq 19576$$

Dipilih $I_{set}=1162$

$$\text{Pick up} = \frac{I_{set}}{nCT} = \frac{1162}{240} = 4,84$$

Time delay

dipilih *time delay* = 1,2 detik

Instantaneous

$$1,6 \times I_{FL} \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc \ min}$$

$$1,6 \times 558,5 \leq I_{set} \leq 0,8 \times 24470$$

$$893,6 \leq I_{set} \leq 19576$$

Dipilih $I_{set}=2496$

$$\text{Pick up} = \frac{I_{set}}{nCT} = \frac{2496}{240} = 10,40$$

Time delay

dipilih *time delay* = 0,3 detik

RL-10BBU01

<i>Manufacturer</i>	: Guodian Nanjing Automation
<i>Model</i>	: NEP983E
<i>Curve type</i>	: <i>Definite</i>
<i>FLA</i>	: 3116 A
<i>CT ratio</i>	: 4000 / 5
Isc min 10BBA01	: 25,05 kA
Isc max 10BBA01	: 38,58 kA

Time Over Current Pick Up

$$1,05 \times I_{FL} \leq Iset \leq 0,8 \times I_{sc\ min}$$

$$1,05 \times 3280 \leq Iset \leq 0,8 \times 25050$$

$$3444 \leq Iset \leq 20040$$

Dipilih $Iset = 3936$

$$\text{Pick up} = \frac{Iset}{nCT} = \frac{3936}{800} = 4,92$$

Time delay

dipilih *time delay* = 1,4 detik

Instantaneous

$$1,6 \times I_{FL} \leq Iset \leq 0,8 \times I_{sc\ min}$$

$$1,6 \times 3116 \leq Iset \leq 0,8 \times 25050$$

$$4985,6 \leq Iset \leq 20040$$

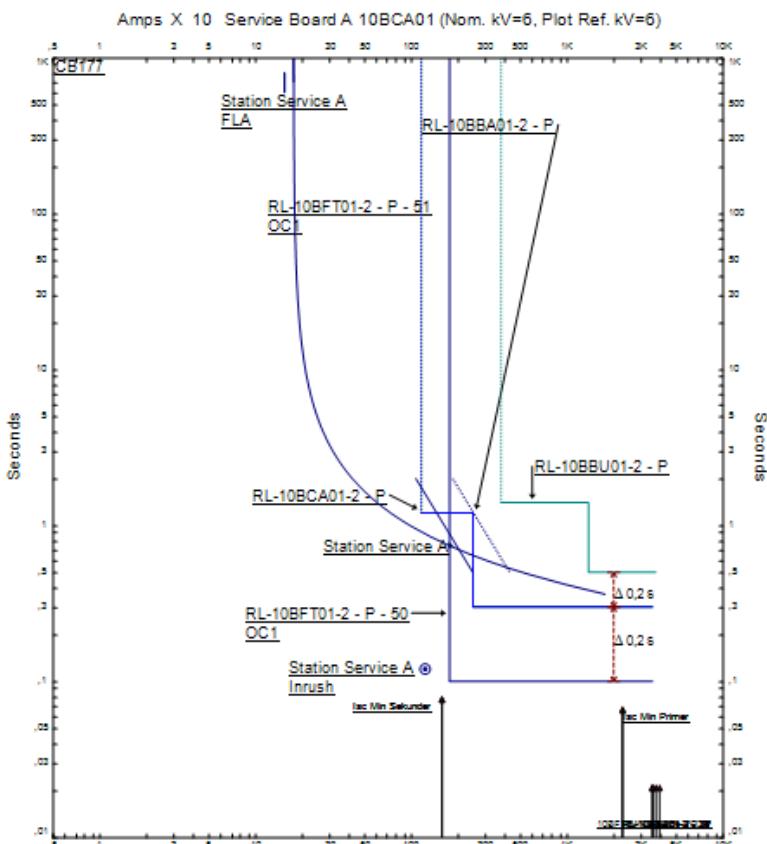
Dipilih $Iset = 13120$

$$\text{Pick up} = \frac{Iset}{nCT} = \frac{13120}{800} = 16,4$$

Time delay

dipilih *time delay* = 0,5 detik

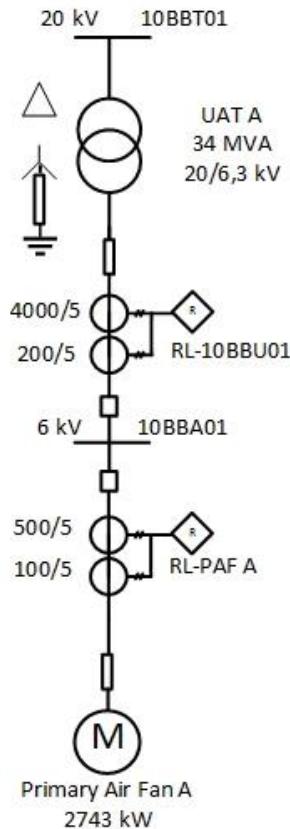
Gambar 4.3 menunjukkan plot *Time Current Curve* hasil perhitungan saat kondisi *resetting* pada tipikal 1.



Gambar 4. 3 Plot TCC Tipikal 1A dan 1B Resetting

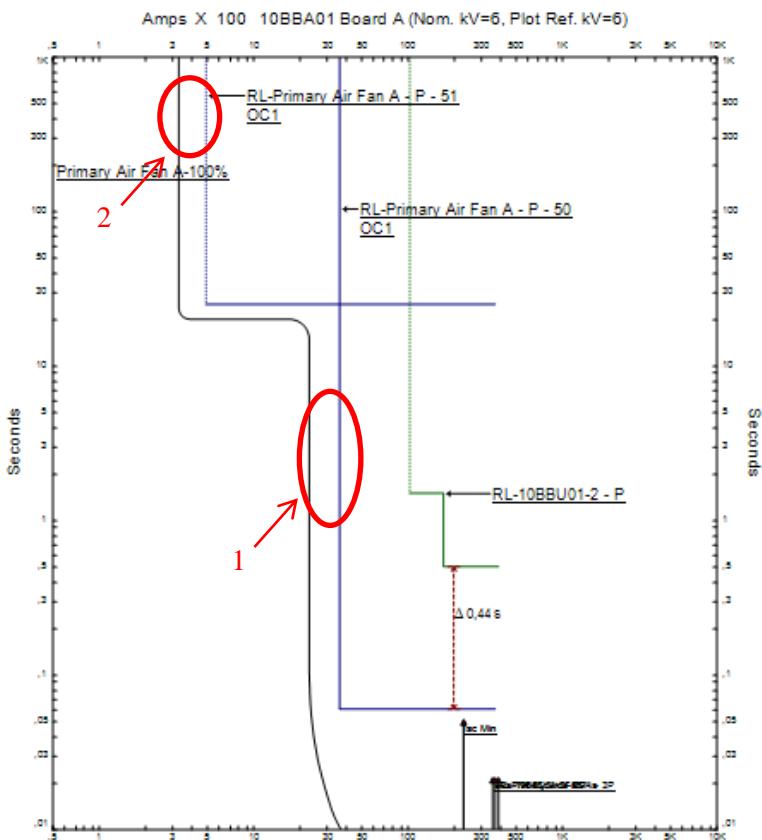
4.4.2 Tipikal 2A dan 2B

Pada tipikal 2A dan tipikal 2B memiliki spesifikasi beban, level tegangan yang sama, sehingga *setting* koordinasi proteksi dapat dijadikan identik. Analisis pada tipikal 2A dan 2B dilakukan koordinasi dari *primary air fan* sampai *incoming unit board* dengan membandingkan hasil *existing* koordinasi proteksi dengan hasil *resetting*. Berikut merupakan *single line diagram* dari tipikal 2A dan 2B



Gambar 4. 4 Single Line Diagram Tipikal 2A dan 2B

Untuk mengetahui koordinasi proteksi tipikal 2A dan 2B dari sistem *existing* maka diperlukan simulasi dengan diberikan gangguan dan melihat plot TCC, gambar 4.5 berikut merupakan hasil dari plot TCC saat terjadi gangguan phasa pada Tipikal 2A dan 2B.



Gambar 4. 5 Plot TCC Tipikal 2A dan 2B Existing

Dari hasil plot kurva koordinasi rele pada tipikal 2A *existing* terdapat kesalahan yang akan menyebabkan koordinasi proteksi tidak bekerja dengan maksimal, yaitu *setting pick up* untuk *overcurrent* pada lingkaran 1 dan *instantaneous* pada lingkaran 2 RL-Primary Air Fan terlalu besar, sehingga dapat diubah dengan *resetting* sebagai berikut.

RL-Primary Air Fan A

<i>Manufacturer</i>	: Guodian Nanjing Automation
<i>Model</i>	: NEP998A
<i>Curve type</i>	: <i>Definite</i>
FLA	: 330 A
LRA	: 2305 A
<i>Starting time</i>	: 20 detik
<i>CT ratio</i>	: 500 / 5
Isc min primary air fan A	: 23,06 kA
Isc max primary air fan A	: 36,97 kA

Overcurrent Pickup

$$1,05 \times I_{FL} \leq Iset \leq 0,8 \times I_{sc\ min}$$

$$1,05 \times 330 \leq Iset \leq 0,8 \times 23060$$

$$346,5 \leq Iset \leq 18448$$

Dipilih $Iset = 396$

$$\text{Pick up} = \frac{Iset}{FLA} = \frac{396}{330} = 1,2$$

Time delay

dipilih *time delay* = 22 detik

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times I_{FL} \leq Iset \leq 0,8 \times I_{sc\ min}$$

$$1,6 \times 330 \leq Iset \leq 0,8 \times 25050$$

$$528 \leq Iset \leq 20040$$

Dipilih $Iset = 2970$

$$\text{Pick up} = \frac{Iset}{FLA} = \frac{2970}{330} = 9$$

Time

dipilih *time delay* = 0,1 detik

RL-10BBU01

<i>Manufacturer</i>	: Guodian Nanjing Automation
<i>Model</i>	: NEP983E
<i>Curve type</i>	: <i>Definite</i>
FLA	: 3116 A
<i>CT ratio</i>	: 4000 / 5
Isc min 10BBA01	: 25,05 kA

Isc max 10BBA01 : 38,58 kA

Time Over Current Pick Up

$$1,05 \times I_{FL} \leq Iset \leq 0,8 \times I_{sc\ min}$$

$$1,05 \times 3280 \leq Iset \leq 0,8 \times 25050$$

$$3444 \leq Iset \leq 20040$$

Dipilih $Iset = 3936$

$$\text{Pick up} = \frac{Iset}{nCT} = \frac{3936}{800} = 4,92$$

Time delay

dipilih $time\ delay = 1,4$ detik

Instantaneous

$$1,6 \times I_{FL} \leq Iset \leq 0,8 \times I_{sc\ min}$$

$$1,6 \times 3116 \leq Iset \leq 0,8 \times 25050$$

$$4985,6 \leq Iset \leq 20040$$

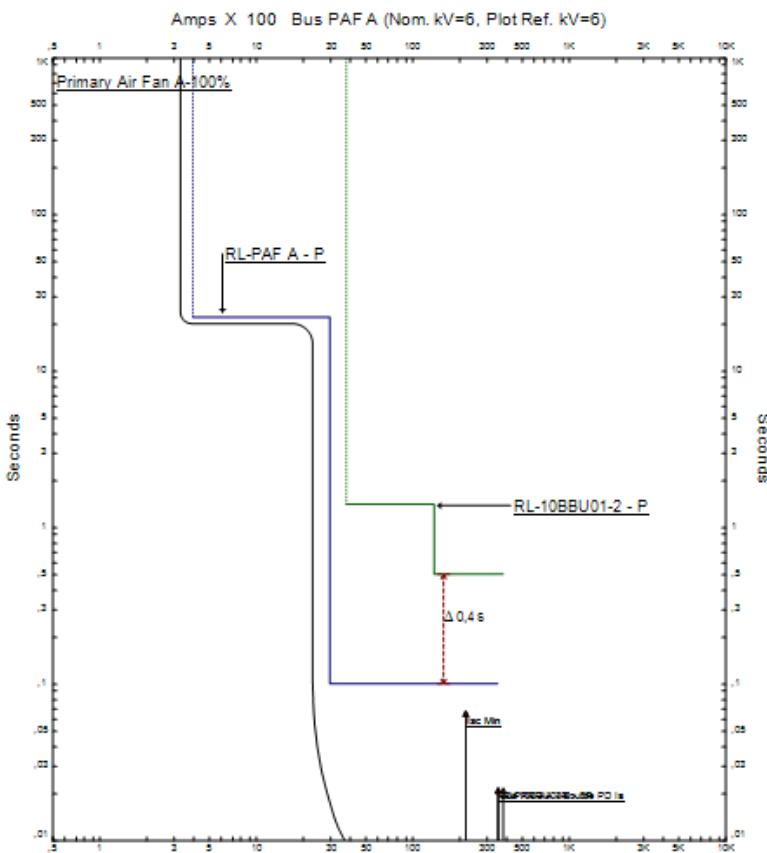
Dipilih $Iset = 13120$

$$\text{Pick up} = \frac{Iset}{nCT} = \frac{13120}{800} = 16,4$$

Time delay

dipilih $time\ delay = 0,5$ detik

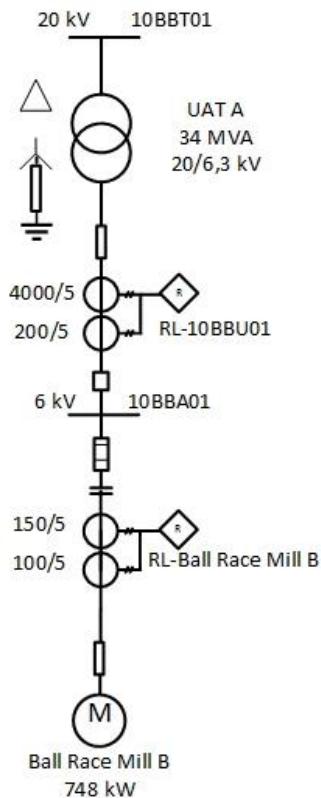
Gambar 4.6 Menunjukkan plot *Time Current Curve* hasil perhitungan *resetting koordinasi proteksi tipikal 2*.



Gambar 4. 6 Plot TCC Tipikal 2A dan 2B Resetting

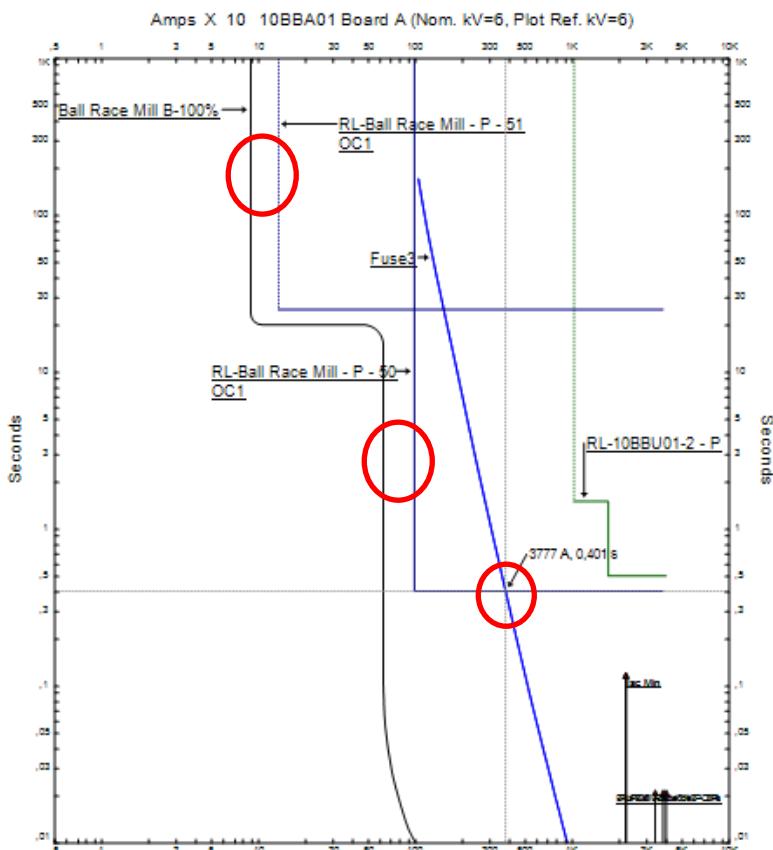
4.4.2 Tipikal 3A dan 3B

Pada tipikal 6A dan tipikal 6B memiliki spesifikasi beban, level tegangan, sehingga setting koordinasi proteksi identik. Analisis pada tipikal 3A dan 3B dilakukan koordinasi dari *ball race mill* sampai *incoming unit board* dengan membandingkan hasil *existing* koordinasi proteksi dengan hasil *resetting*. Berikut merupakan *single line diagram* dari tipikal 3A dan 3B.



Gambar 4. 7 Single Line Diagram Tipikal 3A dan 3B

Untuk mengetahui koordinasi proteksi tipikal 3A dan 3B dari sistem *existing* maka diperlukan simulasi dengan diberikan gangguan phasa dan melihat plot TCC, berikut merupakan hasil dari plot TCC Tipikal 3A dan 3B.



Gambar 4. 8 Plot TCC Tipikal 3A dan 3B *Existing*

Dari hasil plot kurva koordinasi rele pada tipikal 3A dan 3B *existing* terdapat kesalahan yang akan menyebabkan koordinasi proteksi tidak bekerja dengan maksimal, yaitu *setting pick up* untuk *overcurrent* pada lingkaran 1 dan *instantaneous* pada lingkaran 2 RL-Ball Race Mill terlalu besar, selain itu pemilihan rating fuse yang terlalu besar sehingga menyebabkan kontaktor akan bekerja melebihi dari breaking capacity yang dimiliki, sehingga dapat diubah dengan *resetting* sebagai berikut.

RL-Ball Race Mill B

<i>Manufacturer</i>	: Guodian Nanjing Automation
<i>Model</i>	: NEP998A
<i>Curve type</i>	: <i>Definite</i>
<i>FLA</i>	: 90 A
<i>LRA</i>	: 2305 A
<i>Starting time</i>	: 20 detik
<i>CT ratio</i>	: 500 / 5
Isc min ball race mill B	: 22,11 kA
Isc max ball race mill B	: 38,14 kA

Overcurrent Pickup

$$1,05 \times I_{FL} \leq Iset \leq 0,8 \times I_{sc \ min}$$

$$1,05 \times 90 \leq Iset \leq 0,8 \times 22110$$

$$94,5 \leq Iset \leq 17688$$

Dipilih $Iset = 108$

$$\text{Pick up} = \frac{Iset}{FLA} = \frac{108}{90} = 1,2$$

Time delay

dipilih $time \ delay = 22$ detik

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times I_{FL} \leq Iset \leq 0,8 \times I_{sc \ min}$$

$$1,6 \times 90 \leq Iset \leq 0,8 \times 25050$$

$$144 \leq Iset \leq 20040$$

Dipilih $Iset = 810$

$$\text{Pick up} = \frac{Iset}{FLA} = \frac{810}{90} = 9$$

Time

dipilih $time \ delay = 0,2$ detik

RL-10BBU01

<i>Manufacturer</i>	: Guodian Nanjing Automation
<i>Model</i>	: NEP983E
<i>Curve type</i>	: <i>Definite</i>
<i>FLA</i>	: 3116 A
<i>CT ratio</i>	: 4000 / 5
Isc min 10BBA01	: 25,05 kA

$I_{sc \ max}$ 10BBA01 : 38,58 kA

Time Over Current Pick Up

$$1,05 \times I_{FL} \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc \ min}$$

$$1,05 \times 3280 \leq I_{set} \leq 0,8 \times 25050$$

$$3444 \leq I_{set} \leq 20040$$

Dipilih $I_{set}=3936$

$$\text{Pick up} = \frac{I_{set}}{nCT} = \frac{3936}{800} = 4,92$$

Time delay

dipilih *time delay* = 1,4 detik

Instantaneous

$$1,6 \times I_{FL} \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc \ min}$$

$$1,6 \times 3116 \leq I_{set} \leq 0,8 \times 25050$$

$$4985,6 \leq I_{set} \leq 20040$$

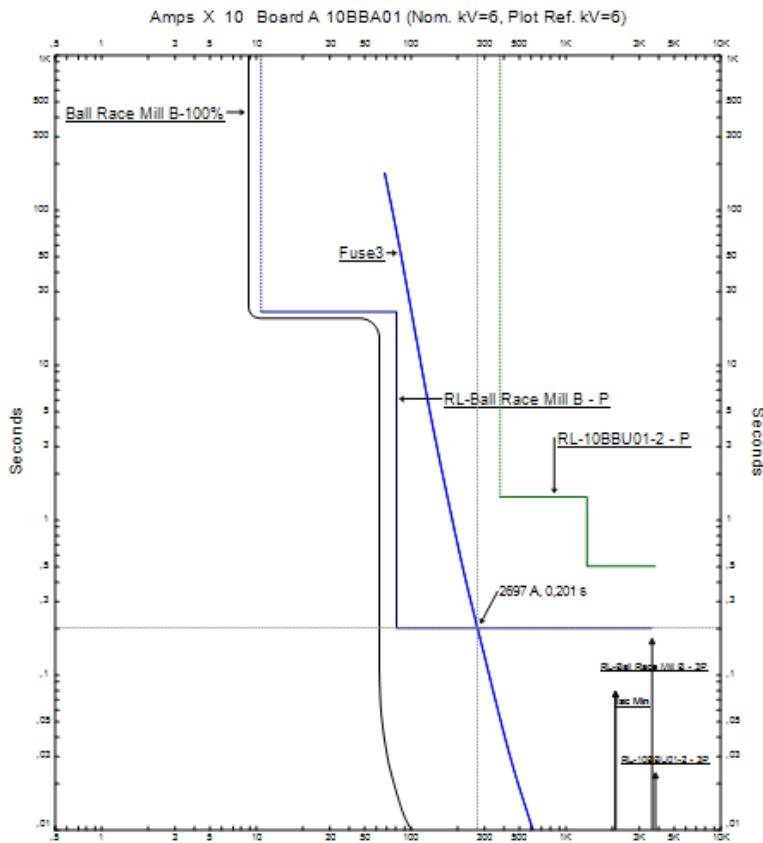
Dipilih $I_{set}=13120$

$$\text{Pick up} = \frac{I_{set}}{nCT} = \frac{13120}{800} = 16,4$$

Time delay

dipilih *time delay* = 0,5 detik

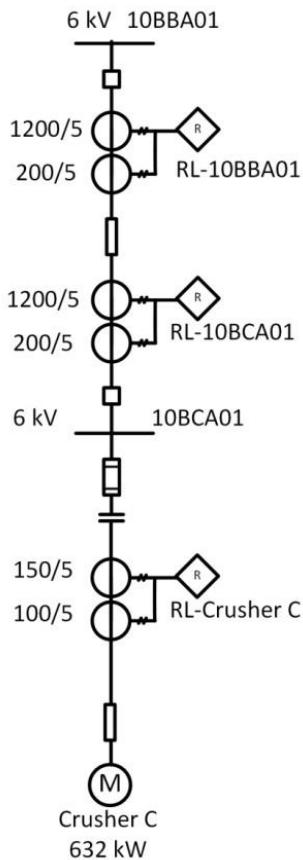
Gambar 4.9 menunjukkan plot *Time Current Curve* hasil perhitungan dan *resetting* koordinasi proteksi tipikal 3A dan 3B.



Gambar 4. 9 Plot TCC Tipikal 3A dan 3B Resetting

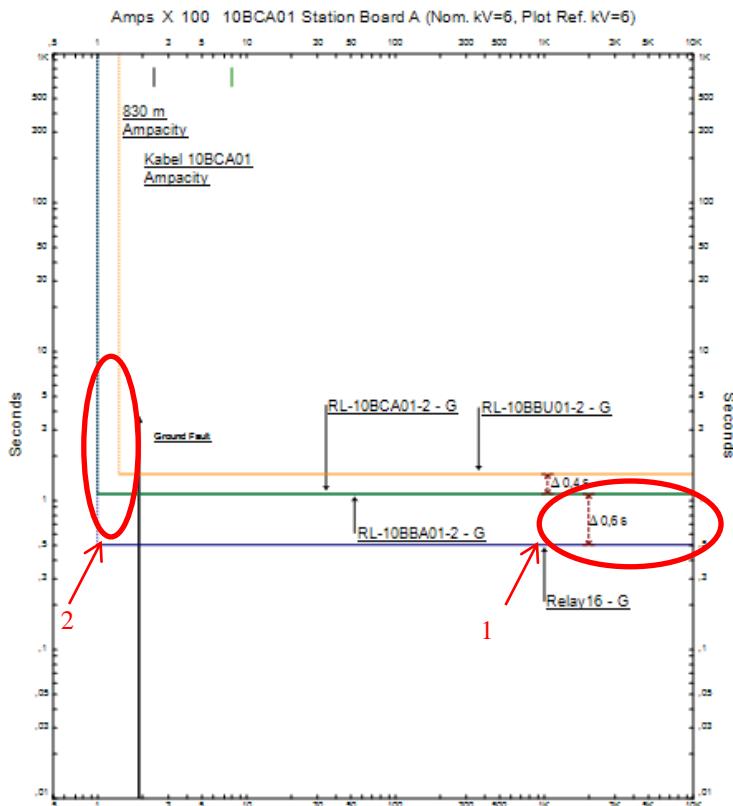
4.5 Koordinasi Rele Gangguan Phasa Ke Tanah

Sistem Kelistrikan eksisting Pembangkit Listrik Tenaga Uap PLTU Banten 1 Suralaya unit 8 terdapat rele arus gangguan ke tanah yang harus dikoordinasikan untuk mengatasi arus hubung singkat satu fasa ke tanah. Terdapat *neutral grounding resistor* (NGR) di UAT. Nilai arus gangguan maksimal disemua bus sama dengan nilai arus NGR. Berikut merupakan tipikal dari rele *crusher* ke UAT.



Gambar 4. 10 Single Line Diagram Tipikal Ground Fault

Untuk mengetahui koordinasi proteksi gangguan tanah dari sistem *existing* maka diperlukan simulasi dengan diberikan gangguan dan melihat plot TCC, berikut merupakan hasil dari plot TCC.



Gambar 4. 11 Plot TCC Ground Fault Existing

Dari hasil plot kurva koordinasi rele *existing* terdapat kesalahan yang akan menyebabkan koordinasi proteksi tidak bekerja dengan baik. Pada gambar 1 Rele RL-Crusher C memiliki *time delay* yang terlalu lama yaitu 0,5s dan perbedaan waktu(Δt) dengan rele backup sebesar 0,6 s, yang mana *setting* tersebut terlalu besar, selain itu pada lingkaran 2 *setting pick up* >50% I_{sc} LG dan *setting pickup* yang tidak seragam.

Berikut merupakan perhitungan parameter *resetting* dari masing-masing rele.

Rele RL-Crusher C

<i>Manufacturer</i>	: Guodian Nanjing Automation
<i>Model</i>	: NEP 998A
<i>Curve type</i>	: <i>Definite Time</i>
<i>CT ratio</i>	: 100/5
Isc LG	: 181 A

Instantaneous Pickup

5-10% x Isc LG < Iset < 50% x Isc LG

5%-10% x 181 A < Iset < 50% x 181 A

9,05A-18,1 A < Iset < 90,5A

Dipilih Iset = 20 A

$$\text{Maka pickup} = \frac{\text{Iset Primer}}{\text{Rasio CT}} = \frac{20}{20} = 1$$

Time delay

dipilih time delay = 0,1 detik

Rele RL-10BCA01

<i>Manufacturer</i>	: Guodian Nanjing Automation
<i>Model</i>	: NEP 981
<i>CT ratio</i>	: 200/5
Isc LG	: 190 A

Instantaneous Pickup

5-10% x Isc LG < Iset < 50% x Isc LG

5%-10% x 181 A < Iset < 50% x 181 A

9,05A-18,1 A < Iset < 90,5A

Dipilih Iset = 20 A

$$\text{Maka pickup} = \frac{\text{Iset Primer}}{\text{Rasio CT}} = \frac{20}{40} = 0,5$$

Time delay

dipilih time delay = 0,4 detik

Rele RL-10BBA01

<i>Manufacturer</i>	: Guodian Nanjing Automation
<i>Model</i>	: NEP 983E
<i>CT ratio</i>	: 200/5
Isc LG	: 190 A

Instantaneous Pickup

5-10% x Isc LG < Iset < 50% x Isc LG

5%-10% x 181 A < Iset < 50% x 181 A

9,05A-18,1 A < Iset < 90,5A

Dipilih Iset = 20 A

$$\text{Maka pickup} = \frac{\text{Iset Primer}}{\text{Rasio CT}} = \frac{20}{40} = 0,5$$

Time delay

dipilih *time delay* = 0,4 detik

Rele RL-10BBU01

Manufacturer : Guodian Nanjing Automation

Model : NEP 981

CT ratio : 200/5

Isc LG : 190 A

Instantaneous Pickup

5-10% x Isc LG < Iset < 50% x Isc LG

5%-10% x 181 A < Iset < 50% x 181 A

9,05A-18,1 A < Iset < 90,5A

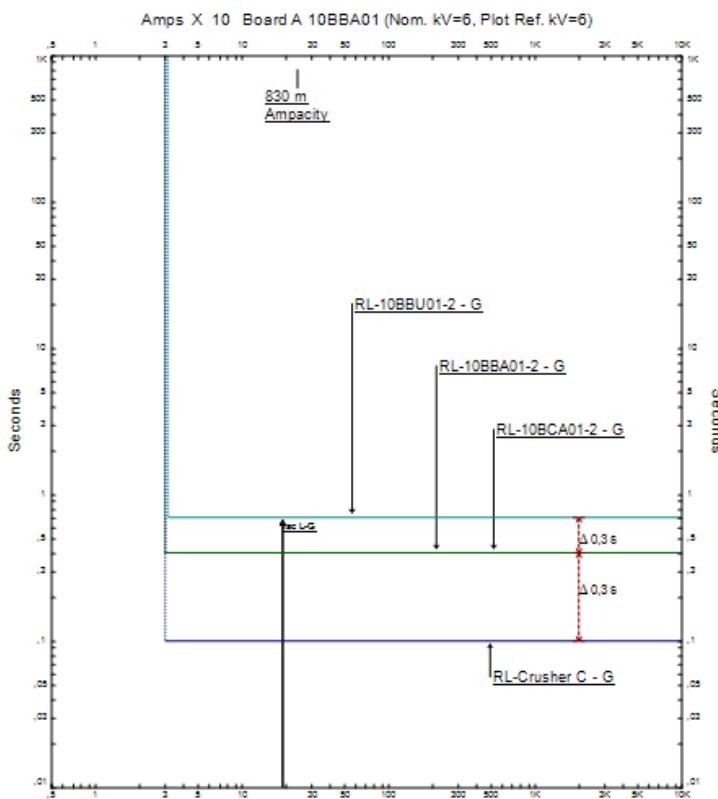
Dipilih Iset = 20 A

$$\text{Maka pickup} = \frac{\text{Iset Primer}}{\text{Rasio CT}} = \frac{20}{40} = 0,5$$

Time delay

dipilih *time delay* = 0,7 detik

Hasil *resetting* rele arus lebih gangguan ke tanah dapat dilihat pada gambar 4.21.



Gambar 4. 12 Plot TCC Ground Fault Resetting

4.6 Perbandingan *Setting* Rele

Perbandingan *setting* untuk mengetahui perubahan dari *setting* rele kondisi *existing* dengan *setting* rele kondisi *resetting*.

Tabel 4. 3 Perbandingan *Setting* Rele Arus Lebih

ID Bus	Low Set					
	Existing			Resetting		
	Tipe Kurva	Pick up	TD	Tipe Kurva	Pick up	TD
RL-Trafo Station	Definite	4,4	1,1	Standar Inverse	1,76	0,25
RL-10BCA01	Definite	6,88	1,1	Definite	3,72	0,3

Tabel 4. 3 (lanjutan) Perbandingan *Setting* Rele Arus Lebih

ID Bus	Low Set					
	Exsisting			Resetting		
Tipe Kurva	Pick up	TD	Tipe Kurva	Pick up	TD	
RL-10BBA01	Definite	6,88	1,1	Definite	3,72	0,3
RL-PAF A	Definite	1,5	25	Definite	1,2	22
RL-10BBU01	Definite	12,3	1,5	Definite	4,92	1,4
High Set						
ID Bus	Exsisting			Resetting		
	Tipe Kurva	Pick up	TD	Tipe Kurva	Pick up	TD
RL-Trafo Station	Definite	17,88	0,1	Definite	17,7	0,1
RL-10BCA01	Definite	41,4	0,4	Definite	10,4	0,3
RL-10BBA01	Definite	41,4	0,4	Definite	10,4	0,3
RL-PAF A	Definite	11	0,06	Definite	9	0,1
RL-10BBU01	Definite	20,31	0,5	Definite	16,4	0,5

Tabel 4. 4 Perbandingan Rele Gangguan Phasa ke Tanah

ID Bus	Exsisting			Resetting		
	Tipe Kurva	Pick up	TD	Tipe Kurva	Pick up	TD
RL-CRUSHERC	Definite	5	0,5	Definite	1,5	0,7
RL-10BCA01	Definite	2,5	1,1	Definite	0,75	0,4
RL-10BBA01	Definite	2,5	1,1	Definite	0,75	0,4
RL-10BBU01	Definite	3,33	1,5	Definite	0,75	0,1

4.7 Analisis Arc Flash

Analisis *arc flash* berguna untuk mengetahui nilai insiden energi dari masing-masing metode yaitu dengan metode modifikasi dan menggunakan standar IEEE 1584-2002 pada kondisi sistem *existing* dan *resetting*.

4.7.1 Hasil Simulasi Insiden Energi Arc flash Dan Flash Protection Boundary Existing

Simulasi insiden energi *arc flash* dilakukan dengan software ETAP 12.6.0 menggunakan standar IEEE 1584-2002. Simulasi dilakukan pada PT Indonesia Power UJP PLTU Banten 1 Suralaya Unit 8 dengan level tegangan 6 kV. Pada sub bab ini, akan ditampilkan data hasil simulasi besarnya insiden energi *arc flash* pada bus-bus sistem serta besarnya arus *bolted fault*, arus *arching*, FCT (*Fault Clearing Time*), dan kategori bahaya. Dan untuk *working distance* atau jarak titik *arc flash* terhadap pekerja berdasarkan level tegangan 6 kV, tipikalnya menurut standar IEEE 1584-2002, yaitu sebesar 91 cm. Hasil simulasi insiden energi *arc flash* pada masing-masing bus dapatdilihat pada tabel 4.5 berikut.

Tabel 4. 5 Simulasi Insiden Energi Arc Flash Existing

ID Bus	Bolted Fault Current (kA)	Arching Fault (kA)	Insiden Energi (cal/cm ²)	Fault Clearing Time (s)	Energ y Level	FPB (ft)
10BBA01	45	42,572	46,126	0,550	4	127,577
10BBB01	42,58	40,321	43,495	0,550	4	120,103
10BCA01	43,5	41,177	30,878	0,450	3	84,458
10BCB01	41,42	39,241	29,321	0,450	3	80,058

Dari hasil simulasi insiden energi *arc flash* pada sistem *existing*, semua bus masih terdapat pada level energy yang dapat definisikan dan direpresentasikan alat pelindung dirinya berdasarkan standar NFPA 70E 2015. Sehingga dalam kasus ini, *resetting* pada sistem koordinasi proteksi diperlukan untuk mendapatkan nilai insiden energi *arc flash* yang lebih rendah. Nilai insiden energi *Arc flash* Dan *Flash Protection Boundary Resetting* saat *resetting* dilakukan dengan 2(dua) metode perhitungan yaitu dengan metode perhitungan standar IEEE 1584-2022 dan metode modifikasi.

4.7.1.1 Hasil Perhitungan Insiden Energi Arc Flash Dan Flash Protection Boundary Resetting Dengan Standar IEEE 1584-2002

Untuk membandingkan besarnya insiden energi *arc flash* hasil

simulasi program ETAP 12.6.0 terhadap perhitungan, maka dilakukan perhitungan menggunakan metode yang sama yaitu standar IEEE 1584-2002. Pada kelistrikan PT Indonesia Power UJP PLTU Banten 1 Suralaya Unit 8 mempunyai spesifikasi tegangan 6 kV, $C_f=1$, $K_1 = -0,555$, $K_2 = -0,113$, G=275 mm untuk VEP 4000A' G=210 mm untuk VEP 1250A, D=910.

$$E = C_f (1,009291 I_{bf}^{0,983})^{1,081} 10^{(K_1+K_2+0,0011G)} \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610}{D}\right)^x$$

Untuk VEP 4000A

Sedangkan VEP 1250A

Dengan Menggunakan persamaan (23) dan (24) maka dapat dihitung insiden energi pada masing-masing bus.

Bus 10BBA01

Perhitungan Arcing Current

$$\lg I_q = 0,00402 + 0,983 \lg I_{bf}$$

$$\lg I_d = 0,00402 + 0,983 \lg(45))$$

$\lg I_a = 1,629$

$$I_a = 10^{\lg I_a}$$

$$I_a = 10^{1,629}$$

$$I_a = 42,572 \text{ kA}$$

Perhitungan Insiden Energi

$$E = 1,473,888 \times I_{hf}^{1,062,623} \times t$$

$$E = 1,473888 \times 45^{1,062623} \times 0,55$$

$$E=46.29 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan *Flash Protection Boundary*

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{E_p} \right) \right]^{\frac{1}{X}}$$

$$D_B = \left[4,184 \times 1 \times 24,864 \quad \left(\frac{0.55}{0.2} \right) \left(\frac{610^{0.973}}{5} \right) \right]^{1/0.973}$$

$$D_B=39051.9 \text{ mm}$$

(1 mm = 0.00328084 ft)

$$D_B = 128.123 \text{ ft}$$

Bus 10BBB01

Perhitungan Arcing Current

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

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \lg(42,58))$$

$$\lg I_a = 1,605$$

$$I_a = 10^{\lg I_a}$$

$$I_a = 10^{1,605}$$

$$I_a = 40,320 \text{ kA}$$

Perhitungan Insiden Energi

$$E = 1,473888 \times I_{bf}^{1,062623} \times t$$

$$E = 1,473888 \times 42,58^{1,062623} \times 0,55$$

$$E = 43,65 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan Flash Protection Boundary

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

$$D_B = \left[4,184 \times 1 \times 23,446 \left(\frac{0,55}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 36764,1 \text{ mm}$$

(1 mm=0,00328084 ft)

$$D_B = 120,62 \text{ ft}$$

Bus 10BCA01

Perhitungan Arcing Current

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

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \lg(43,5))$$

$$\lg I_a = 1,614$$

$$I_a = 10^{\lg I_a}$$

$$I_a = 10^{1,614}$$

$$I_a = 41,177 \text{ kA}$$

Perhitungan Insiden Energi

$$E = 1,250157 \times I_{bf}^{1,062623} \times 0,350$$

$$E = 1,250157 \times 43,5^{1,062623} \times 0,350$$

$$E = 24,10 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan Flash Protection Boundary

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

$$D_B = \left[4,184 \times 1 \times 20,344 \left(\frac{0,35}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 19968,1 \text{ mm}$$

(1 mm=0,00328084 ft)

$$D_B = 65,51 \text{ ft}$$

Bus 10BCB01

Perhitungan Arcing Current

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

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \lg(41,42))$$

$$\lg I_a = 1,593$$

$$I_a = 10^{\lg I_a}$$

$$I_a = 10^{1,593}$$

$$I_a = 39,240 \text{ kA}$$

Perhitungan Insiden Energi

$$E = 1,250157 \times I_{bf}^{1,062623} \times 0,350$$

$$E = 1,250157 \times 41,2^{1,062623} \times 0,350$$

$$E = 22,88 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan Flash Protection Boundary

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

$$D_B = \left[4,184 \times 1 \times 19,312 \left(\frac{0,35}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 18927,7 \text{ mm}$$

(1 mm=0,00328084 ft)

$$D_B = 62,09 \text{ ft}$$

4.7.1.2 Hasil Perhitungan Insiden Energi Arc Flash Resetting Dengan Metode Modifikasi.

Pada perhitungan metode modifikasi, insiden energi *arc flash* diperoleh dengan pertimbangan berkurangnya kontribusi arus hubung saat *subtransient*, *transient* dan *steady state*, *fault clearing time circuit breaker*, dan juga kontribusi arus hubung singkat dari motor induksi sesuai ratingnya. Pada metode modifikasi, kontribusi arus hubung singkat dari setiap beban akan dikelompokkan kedalam beberapa domain waktu seperti yang telah ditunjukkan dalam tabel 2.4 Berikut perhitungan insiden energi *arc flash* pada masing-masing bus.

BUS 10BBA01

Domain waktu 0-0,035 second

$$E_{0,035sec} = 1,473888[(29,01 + 0,657 + 0,657 + 0,657 + 0,656 + 0,291 + 0,413 + 2,4 + 1,9 + 2,33 + 2,33 + 2,59 + 0,356 + 0,244 + 0,393 + 0,203)^{1,0626263} \times 0,035]$$

$$E_{0,035sec} = 1,473888 [(45,087)^{1,0626263} \times 0,035]$$

$$E_{0,035sec} = 2,95 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035-0,067 second

$$E_{0,067sec} = 1,473888[(29 + 0,438 + 0,438 + 0,438 + 0,438 + 0,117 + 0,165 + 1,61 + 1,27 + 1,56 + 1,56 + 1,07 + 0,162 + 0,106 + 0,176 + 0,087)^{1,0626263} \times 0,032]$$

$$E_{0,067sec} = 1,473888[(37,182)^{1,0626263} \times 0,032]$$

$$E_{0,067sec} = 2,19 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,067-0,55 second

$$E_{0,55sec} = 1,473888[(29 + 0,438 + 0,438 + 0,438 + 0,438 + 1,61 + 1,27 + 1,56 + 1,56 + 0,307 + 0,162 + 0,106 + 0,176 + 0,087)^{1,0626263} \times 0,483]$$

$$E_{0,55sec} = 1,473888[(37,59)^{1,0626263} \times 0,483]$$

$$E_{0,55sec} = 33,58 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi

$$E_{Total} = E_{0,035sec} + E_{0,035sec} + E_{0,55sec}$$

$$E_{Total} = 2,95 + 2,19 + 33,58$$

$$E_{Total} = 38,73 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan Flash Protection Boundary

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

$$D_B = \left[4,184 \frac{38,73}{5} \times 910^{0,973} \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 32485,5 \text{ mm}$$

(1 mm=0,00328084 ft)

$$D_B = 106,57 \text{ ft}$$

BUS 10BBB01

Domain waktu 0-0,035 second

$$E_{0,035sec} = 1,473888[(29,01 + 0,657 + 0,657 + 0,291 + 0,291 + 0,464 + 0,414 + 2,41 + 1,9 + 2,33 + 2,8 + 0,416 + 0,289 + 0,508 + 0,242)^{1,0626263} \times 0,035]$$

$$E_{0,035sec} = 1,473888[(42,679)^{1,0626263} \times 0,035]$$

$$E_{0,035sec} = 2,75 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035-0,067 second

$$E_{0,067sec} = 1,473888[(29 + 0,438 + 0,438 + 0,117 + 0,117 + 0,185 + 0,166 + 1,61 + 1,27 + 1,56 + 1,15 + 0,194 + 0,128 + 0,236 + 0,105)^{1,0626263} \times 0,032]$$

$$E_{0,067sec} = 1,473888[(36,714)^{1,0626263} \times 0,032]$$

$$E_{0,067sec} = 2,16 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,067-0,55 second

$$E_{0,55sec} = 1,473888[(29 + 0,438 + 0,438 + 1,61 + 1,27 + 1,56 + 0,28 + 0,194 + 0,128 + 0,236 + 0,105)^{1,0626263} \times 0,483]$$

$$E_{0,55sec} = 1,473888[(35,259)^{1,0626263} \times 0,483]$$

$$E_{0,55sec} = 31,37 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi

$$E_{Total} = E_{0,035sec} + E_{0,035sec} + E_{0,55sec}$$

$$E_{Total} = 2,75 + 2,16 + 31,37$$

$$E_{Total} = 36,33 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan Flash Protection Boundary

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

$$D_B = \left[4,184 \frac{36,32}{5} \times 910^{0,973} \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 30414,15 \text{ mm}$$

$$(1 \text{ mm} = 0,00328084 \text{ ft})$$

$$D_B = 99,78 \text{ ft}$$

BUS 10BCA01

Domain waktu 0-0,035 second

$$E_{0,035sec} = 1,250157[(40,9 + 0,203 + 0,161 + 0,361 + 0,18 + 0,18 + 0,46 + 0,205 + 0,316 + 0,153 + 0,081 + 0,093 + 0,232 +)^{1,0626263} \times 0,035]$$

$$E_{0,035sec} = 1,250157 [(43,525)^{1,0626263} \times 0,035]$$

$$E_{0,035sec} = 2,41 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035-0,067 second

$$E_{0,067sec} = 1,250157[(36,35 + 0,081 + 0,064 + 0,145 + 0,072 + 0,072 + 0,185 + 0,082 + 0,141 + 0,065 + 0,034 + 0,039 + 0,101)^{1,0626263} \times 0,032]$$

$$E_{0,067sec} = 1,250157 [(37,431)^{1,0626263} \times 0,032]$$

$$E_{0,067sec} = 1,87 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,067-0,35 second

$$E_{0,35sec} = 1,250157 [(36,35 + 0,101 + 0,141 + 0,065)^{1,0626263} \times 0,283]$$

$$E_{0,35sec} = 1,250157 [(36,657)^{1,0626263} \times 0,283]$$

$$E_{0,35sec} = 16,25 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi

$$E_{Total} = E_{0,035sec} + E_{0,067sec} + E_{0,35sec}$$

$$E_{Total} = 2,41 + 1,87 + 16,25$$

$$E_{Total} = 20,54 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan Flash Protection Boundary

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

$$D_B = \left[4,184 \frac{20,54}{5} \times 910^{0,973} \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 16926,57 \text{ mm}$$

$$(1 \text{ mm} = 0,00328084 \text{ ft})$$

$$D_B = 55,53 \text{ ft}$$

BUS 10BCB01

Domain waktu 0-0,035 second

$$E_{0,035sec} = 1,250157 [(38,62 + 0,232 + 0,093 + 0,097 + 0,153 + 0,261 + 0,252 + 0,203 + 0,161 + 0,361 + 0,18 + 0,18 + 0,46 + 0,205 +)^{1,0626263} \times 0,035]$$

$$E_{0,035sec} = 1,250157 [(41,458)^{1,0626263} \times 0,035]$$

$$E_{0,035sec} = 2,29 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035-0,067 second

$$E_{0,067sec} = 1,250157 [(34,6 + 0,101 + 0,039 + 0,041 + 0,065 + 0,114 + 0,101 + 0,081 + 0,064 + 0,144 + 0,072 + 0,072 + 0,185 + 0,082)^{1,0626263} \times 0,032]$$

$$E_{0,067sec} = 1,250157 [(35,761)^{1,0626263} \times 0,032]$$

$$E_{0,067sec} = 1,78 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,067-0,35 second

$$E_{0,35sec} = 1,250157 [(34,05 + 0,101 + 0,065 + 0,114)]^{1,0626263} \times 0,483$$

$$E_{0,35sec} = 1,250157 [(34,33)^{1,0626263} \times 0,283]$$

$$E_{0,35sec} = 15,15 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi

$$E_{Total} = E_{0,035sec} + E_{0,067sec} + E_{0,35sec}$$

$$E_{Total} = 2,29 + 1,78 + 15,15$$

$$E_{Total} = 19,23 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan Flash Protection Boundary

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

$$D_B = \left[4,184 \frac{19,23}{5} \times 910^{0,973} \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 15822,83 \text{ mm}$$

(1 mm=0,00328084 ft)

$$D_B = 51,91 \text{ ft}$$

4.8 Perbandingan Nilai Insiden Energi

Perbandingan nilai insiden energi untuk mengetahui perbedaan dari nilai simulasi insiden energi *existing* standar IEEE 1584-2002, dengan perhitungan insiden energi *resetting* standar IEEE 1584-2002 dan insiden energi *resetting* dengan metode modifikasi.

4.8.1 Nilai *Exsisting* Dibanding *Resetting* Dengan Standar IEEE 1584-2002.

Setelah pada beberapa sub-bab sebelumnya dilakukan perhitungan dengan menggunakan standar IEEE 1584-2002 dan metode modifikasi pada sistem *resetting*, perbedaan insiden energi *arc flash* dapat dilihat pada tabel 4.6 berikut.

Tabel 4. 6 Perbandingan Insiden Energi Simulasi *Exsisting* Dengan Perhitungan *Resetting* Menggunakan Standar IEEE 1584-2002

ID Bus	Simulasi Insiden Energi (cal/cm^2) <i>existing</i>	Kategori Energi	Perhitungan Insiden Energi (cal/cm^2) <i>Resetting</i>	Kategori Energi
10BBA01	46,126	4	46,29	4
10BBB01	43,495	4	43,65	4
10BCA01	30,878	3	24,10	2
10BCB01	29,321	3	22,88	2

Dari tabel tersebut, ditampilkan data nilai insiden energi *arc flash existing* untuk simulasi dengan standar IEEE 1584-2002 dibandingkan dengan perhitungan dengan *resetting* untuk perhitungan dengan standar IEEE1584-2002. Tabel tersebut menunjukkan bahwa pada bus 10BBA01, dan 10BBB01 tidak terjadi perubahan karena *fault clearing time* dari sistem *existing* sama dengan *fault clearing time* sistem *resetting*, sedangkan 10BCA01 dan 10BCB01 mengalami penurunan nilai insiden energi dan menghasilkan penurunan kategori energi dari sebelumnya 3 menjadi 2.

4.8.2 Nilai *Resetting* Dengan Standar IEEE 1584-2002 Dibanding Metode Modifikasi

Setelah pada beberapa sub-bab sebelumnya dilakukan perhitungan dengan menggunakan standar IEEE 1584-2002 dan metode modifikasi pada sistem *resetting*, perbedaan insiden energi *arc flash* dapat dilihat pada tabel 4.7.

Tabel 4. 7 Perbandingan *Resetting* Insiden Energi Standar IEEE 1584-2002 dengan Perhitungan Insiden Energi Metode Modifikasi

ID Bus	Insiden Energi (cal/cm^2) Standar	Energy Level	Insiden Energi (cal/cm^2) Modifikasi	Energy Level
10BBA01	46,29	4	38,73	3
10BBB01	43,65	4	36,32	3
10BCA01	24,10	2	20,54	2
10BCB01	22,88	2	19,23	2

Dari tabel tersebut, ditampilkan data besar insiden energi *arc flash* setelah *resetting* untuk perhitungan dengan standard IEEE 1584-2002 dibandingkan dengan perhitungan dengan metode modifikasi. Tabel tersebut menunjukkan bahwa insiden energi *arc flash* dengan metode modifikasi lebih kecil dibanding standard IEEE 1584-2002. Hal ini dikarenakan dalam metode modifikasi, dipertimbangkan berkurangnya arus kontribusi dari masing-masing peralatan dalam domain waktu tertentu. Selain itu juga dipertimbangkan pula waktu pemutusan *circuit breaker* dari masing-masing sumber yang berkontribusi menuju titik gangguan, Dengan demikian, metode modifikasi menghasilkan insiden energi yang lebih kecil dibandingkan standar 1584-2002.

4.9 Perbandingan Flash Protection Boundary dan Personal Protective Equipment

Hasil perhitungan FPB (*flash protection boundary*) dari metode modifikasi pada sistem kondisi *resetting* lebih kecil dibandingkan dengan menggunakan standar IEEE 1584-2002. Sehingga, jarak aman pekerja dari titik bahaya *arc flash* lebih dekat. Tetapi tetap diharuskan menggunakan PPE(*Personal Protective Equipment*) sesuai NFPA 2015 yang telah ditetapkan dan dijabarkan pada pembahasan berikutnya. Perbandingan FPB perhitungan standar IEEE 1584-2002 dengan metode modifikasi dapat dilihat pada tabel 4.8.

4.9.1 Nilai Flash Protection Boundary Kondisi Existing, Resetting Standar IEEE 1584-2002 Dan Resetting Metode Modifikasi.

FPB (*flash protection boundary*) digunakan untuk menentukan jarak aman pekerja dari titik bahaya *arc flash*, semakin kecil nilai *flash protection boundary* maka jarak aman pekerja ke titik bahaya *arc flash* akan semakin dekat, begitupula sebaliknya. Berikut merupakan perbandingan FPB dari kondisi *existing* dan *resetting* berdasarkan perhitungan insiden energi menggunakan standar IEEE 1584-2002 dan metode modifikasi

Tabel 4. 8 Perbandingan FPB *Existing*, *Resetting* IEEE 1584-2002 dan *Resetting* Metode Modifikasi

ID Bus	FPB Existing Simulasi IEEE 1584-2002 (ft)	FPB Resetting Standar IEEE 1584-2002 (ft)	FPB Resetting Metode Modifikasi (ft)
10BBA01	127,57	128,12	105,57
10BBB01	120,10	120,61	99,78
10BCA01	84,45	65,51	55,53
10BCB01	80,05	62,09	51,91

Berdasarkan tabel 4.8 maka dapat diketahui perbandingan dari masing-masing bus yang mana kondisi *resetting* dengan standar IEEE 1584-2002 dibanding *existing* simulasi mengalami penurunan yang cukup signifikan pada bus 10BCA01 dan 10BCB01 dikarenakan terjadi penurunan nilai insiden energi yang terjadi pada bus tersebut.

Sedangkan pada bus 10BBA01 dan 10BBB01 tidak mengalami penurunan jarak aman/ FPB karena tidak terjadi perubahan nilai insiden energi. Perbandingan pada saat kondisi *resetting* dengan standar IEEE 1584-2002 dengan metode modifikasi, maka menghasilkan jarak aman/ FPB yang lebih kecil untuk metode modifikasi pada setiap bus yang mana menunjukkan terjadinya penurunan nilai insiden energi pada setiap bus tersebut.

4.9.2 PPE Resetting Dengan Standar IEEE 1584-2002 Dengan Metode Modifikasi.

Personal Protective Equipment (PPE) merupakan alat perlindungan diri yang harus digunakan ketika melakukan pekerjaan di daerah beresiko akan bahaya *arc flash*. Dari hasil perhitungan insiden energi sesuai standar IEEE 1584-2002 dan metode modifikasi setelah *resetting*, Bus 10BBA01 dan 10BBB01 mengalami penurunan nilai insiden energi *arc flash* yang signifikan sehingga kategori energi berubah dari sebelumnya 4 menjadi 3. Hal ini berdampak terhadap PPE yang harus digunakan. Sedangkan untuk 10BCA01 dan 10BCB01 mengalami penurunan nilai insiden energi, akan tetapi kategori energi tidak mengalami perubahan.

Jenis PPE yang harus digunakan berdasarkan kategori energi *arc flash* berdasarkan perhitungan standar IEEE 1584-2002 pada kondisi resetting dapat dilihat pada tabel 4.9 berikut.

Tabel 4. 9 Jenis PPE Berdasarkan Kategori Energi *Arc Flash* Kondisi *Resetting* Berdasarkan Perhitungan Standar IEEE 1584-2002

ID Bus	Insiden Energi (cal/cm^2)	Kategori Energi	Jenis PPE	
			Pakaian	Perlatan pelindung
10BBA01	46,333	4	Kemeja lengan panjang dan celana dengan arc rating Hood suit atau pelindung	Topi, Kacamata pengaman atau kacamata keselamatan (SR), Pelindung

Tabel 4. 10(Lanjutan) Jenis PPE Berdasarkan Kategori Energi *Arc Flash* Kondisi *Resetting* Berdasarkan Perhitungan Standar IEEE 1584-2002

ID Bus	Insiden Energi (cal/cm²)	Kategori Energi	Jenis PPE	
			Pakaian	Perlatan Pelindung
10BBB01	43,690	4	wajah, dengan arc rating dan balaclava, Jaket, jaket, jas hujan dengan arc rating	pendengaran (sisipan saluran saluran telinga), Sarung tangan kulit, Alas kaki kulit.
10BCA01	24,124	2	Kemeja lengan panjang dan celana dengan arc rating Hood suit atau pelindung wajah dengan arc rating dan balaclava, Jaket, jaket, jas hujan dengan arc rating	Kacamata pengaman atau kacamata keselamatan, Pelindung pendengaran (sisipan saluran saluran telinga), Sarung tangan kulit, Sepatu kulit
10BBB01	22,900	2		

Sedangkan jenis PPE yang harus digunakan berdasarkan kategori energi *arc flash* dengan metode modifikasi pada kondisi *resetting* dapat dilihat pada tabel 4.10.

Tabel 4. 11 Jenis PPE Berdasarkan Kategori Energi *Arc Flash* Kondisi *Resetting* Berdasarkan Metode Modifikasi

ID Bus	Insiden Energi (cal/cm ²)	Kategori Energi	Jenis PPE	
			Pakaian	Perlatan Pelindung
10BBA01	28,395	3	Kemeja lengan panjang dan Celana dengan arc rating Jaket setelan arcflash dengan pengenal busur Celana arc suit flash, Hood suit arc flash dengan nilai arc rating Sarung tangan dengan arc raing, Jaket, jaket, jas hujan, atau topi	Topi, Kacamata pengaman atau kacamata keselamatan (SR) Pelindung pendengaran (sisipan saluran telinga) Sepatu kulit
10BBB01	26,631	3		
10BCA01	17,753	2	Kemeja lengan panjang dan celana dengan arc rating Hood suit atau pelindung wajah dengan arc rating dan balaclava, Jaket, jaket, jas hujan dengan arc rating	Kacamata pengaman atau kacamata keselamatan, Pelindung pendengaran (sisipan saluran telinga), Sarung tangan kulit, Sepatu kulit
10BBB01	16,625	2		

4.10 Analisis Setting Rele Diferensial

Setting pada rele diferensial dapat dilakukan dengan cara perhitungan manual. Parameter yang dihitung antara lain arus sekunder CT, selisih arus pada sekunder CT, dan slope. Rele diferensial adalah

arus yang masuk sama dengan arus yang keluar. Parameter *setting* harus memperhatikan perbedaan arus yang melalui rele differensial dan slope saat kondisi normal dan gangguan eksternal.

Spesifikasi Rele

<i>Manufacturer</i>	= Nanjing Nari Relays Electric
Tipe Relay	= RCSS-985B
I_Pkp_PcntDiff	= 0,10-2(Ie) step 0,01
I_InstDiff	= 4,0-14,0(Ie) step 0,01
Slope1_PcntDiff	= 0,05-0,80 step 0,01
Slope2_PcntDiff	= 0,40-0,80 step 0,01
BreakPoint 1	= Ie(fix)
Breakpoint 2	= 6Ie(fix)

Setting Existing

I_Pkp_PcntDiff	= 0,55In
I_InstDiff	= 5,3In
Slope1_PcntDiff	= 0,6
Slope2_PcntDiff	= 0,6

Kondisi Normal

Kondisi normal merupakan kondisi tanpa adanya gangguan sehingga daya yang dibangkitkan oleh generator mengalir melalui transformator UAT A, UAT B, atau GT menuju ke beban. Pemodelan sistem dan rele diferensial pada kondisi normal dapat dilihat pada gambar 4.10.

Bagian Primer Rele Diferensial

CT-1	
Tegangan	= 500 kV
Kapasitas	= 730 MVA
Rasio CT	= 1000/5
CT Class	= 5P20
I_p (Primer CT)	= $\frac{730000}{\sqrt{3} \times 525} = 802,8 \text{ A}$
I_s (Sekunder CT)	= $\frac{802,792}{2500} = 2,781 \text{ A}$

5

Bagian Sekunder Rele Diferensial

CT-2	
Tegangan	= 20 kV

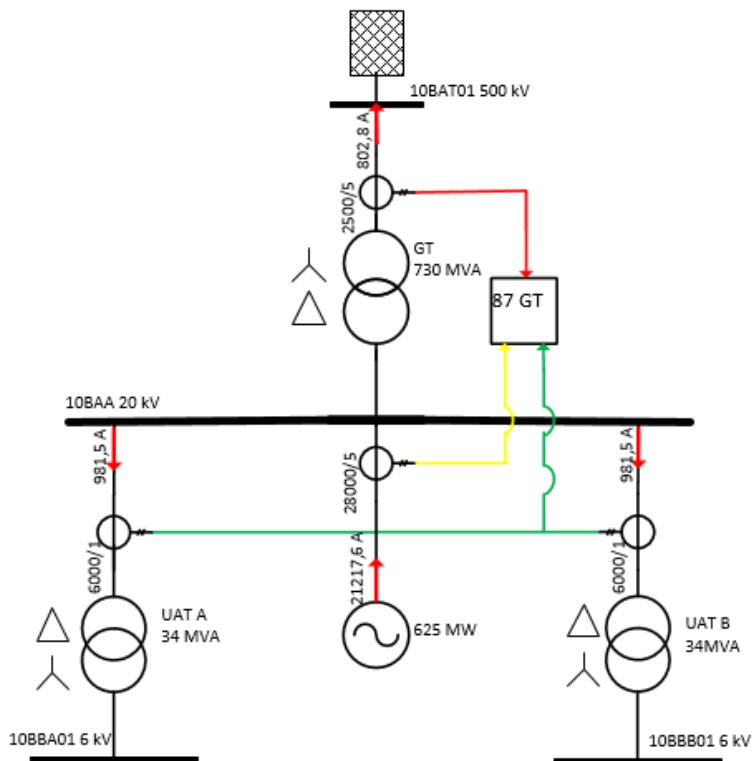
Kapasitas = 34 MVA
 Rasio CT = 6000/1
 CT Class = 5P20
 $I_p(\text{Primer CT}) = \frac{34000}{\sqrt{3} \times 20} = 981,5 \text{ A}$
 $I_s(\text{Sekunder CT}) = \frac{981,5}{6000} = 0,164 \text{ A}$

Bagian Sekunder Rele Differensial

CT-3
 Tegangan = 20 kV
 Kapasitas = $\frac{625}{0,85} = 735,3 \text{ MVA}$
 Rasio CT = 28000/5
 CT Class = 5P20
 $I_p(\text{Primer CT}) = \frac{735300000}{\sqrt{3} \times 20} = 21226,1 \text{ A}$
 $I_s(\text{Sekunder CT}) = \frac{21226,11}{28000} = 3,789 \text{ A}$

Bagian Sekunder Rele Differensial

CT-4
 Tegangan = 20 kV
 Kapasitas = 34 MVA
 Rasio CT = 6000/1
 CT Class = 5P20
 $I_p(\text{Primer CT}) = \frac{34000}{\sqrt{3} \times 20} = 981,5 \text{ A}$
 $I_s(\text{Sekunder CT}) = \frac{981,5}{6000} = 0,164 \text{ A}$



Gambar 4. 13 Permodelan Kondisi Normal

$$\begin{aligned}
 I_{Diff} &= |I_3 - (I_1 + I_2 + I_4)| \\
 &= |I_3 - (I_1 + I_2 + I_4)| \\
 &= \left| \left(\frac{21217,6}{28000/5} \right) - \left(\left(\frac{802,8 \times \sqrt{3}}{2500/5} \right) + \left(\frac{981,5}{6000/1} \right) + \left(\frac{981,5}{6000/1} \right) \right) \right| \\
 &= |(3,789) - ((2,781) + (0,164) + (0,164))| \\
 &= |(3,789) - (3,108)| \\
 &= 0,681 \text{ A} \\
 I_{Restrain} &= \frac{|I_1| + |I_2| + |I_3| + |I_4|}{2} \\
 &= \frac{|2,781| + |0,164| + |3,789| + |0,164|}{2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 3,448 \text{ A} \\
 \text{Slope} &= \frac{I_{Diff}}{I_{Restrain}} \times 100\% \\
 &= \frac{0,681}{3,448} \times 100\% \\
 &= 19,740\%
 \end{aligned}$$

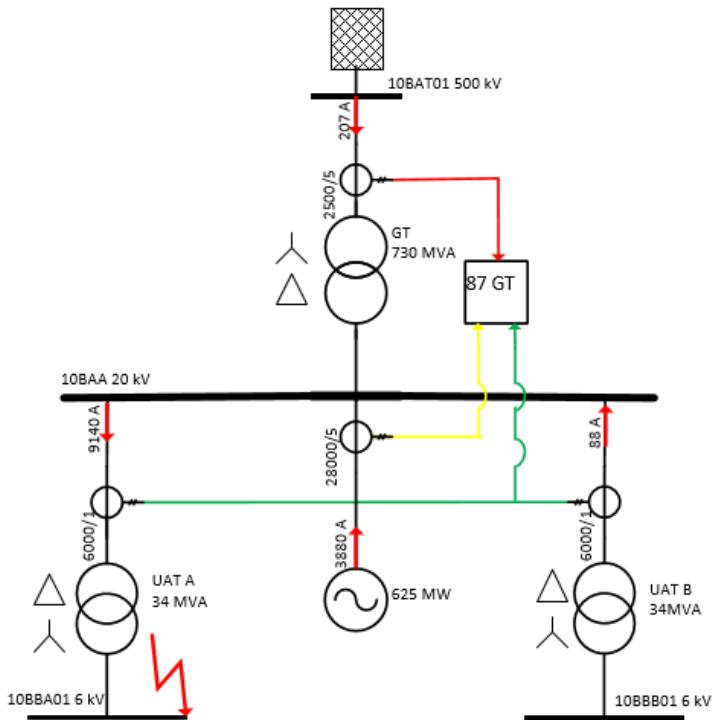
Setelah dilakukan perhitungan untuk mengetahui arus differensial, arus restrain dan slope, maka selanjutnya dilakukan plot untuk mengetahui karakteristik operasi rele saat kondisi normal, berikut gambar 4.11 merupakan plot kurva karakteristik operasi kondisi normal.



Gambar 4. 14 Kurva Karakteristik Operasi Kondisi Normal

Kondisi Gangguan Eksternal 3 Phasa di Bus 10BBA01

Saat terjadi hubung singkat 3 phasa di Unit Board A, maka seluruh arus akan menuju titik gangguan yaitu Unit Board A. Hal tersebut menyebabkan perubahan arah arus pada UAT B dan GT. Perubahan arah arus ditandai dengan tanda negatif pada I_1 dan I_4 . Pemodelan sistem dan rele diferensial saat hubung singkat 3 phasa di Unit Board A dapat dilihat pada gambar 4.23.



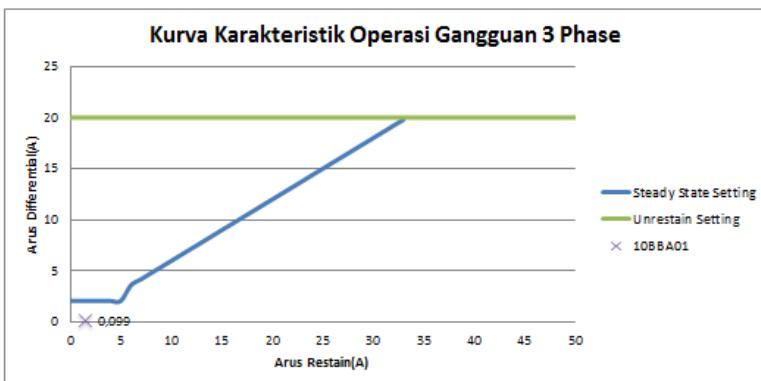
Gambar 4. 15 Permodelan Hubung Singkat 3 Phasa di Bus 10BBA01

$$\begin{aligned}
 I_{Diff} &= |I_3 - (I_1 + I_2 + I_4)| \\
 &= |I_3 - (-I_1 + I_2 - I_4)| \\
 &= \left| \left(\frac{3880}{28000/5} \right) - \left(\left(-\frac{207\sqrt{3}}{2500/5} \right) + \left(\frac{9140}{6000/1} \right) - \left(\frac{88}{6000/1} \right) \right) \right| \\
 &= |(0,693) - ((-0,717) + (1,523) + (-0,015))| \\
 &= |(0,693) - (0,792)| \\
 &= 0,099 \text{ A}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{Restrain} &= \frac{|I_1| + |I_2| + |I_3| + |I_4|}{2} \\
 &= \frac{|0,717| + |1,523| + |0,693| + |0,015|}{2} \\
 &= 1,474 \text{ A}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Slope} &= \frac{I_{Diff}}{I_{Restrain}} \times 100\% \\
 &= \frac{0,099}{1,474} \times 100\% \\
 &= 6,699\%
 \end{aligned}$$

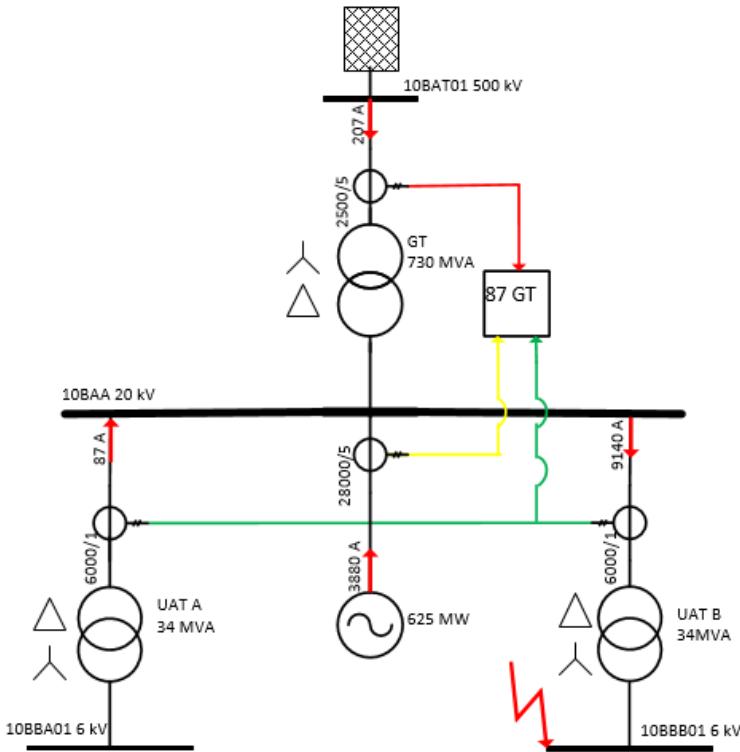
Setelah dilakukan perhitungan untuk mengetahui arus differensial, arus restrain dan slope, maka selanjutnya dilakukan plot untuk mengetahui karakteristik operasi rele saat gangguan eksternal, berikut gambar 4.13 merupakan plot kurva karakteristik operasi gangguan eksternal 3 phase pada bus 10BBA01.



Gambar 4. 16 Kurva Karakteristik Operasi Eksternal 3 Phase 10BBA01

Kondisi Gangguan Eksternal 3 Phasa di Bus 10BBB01

Saat terjadi hubung singkat 3 phasa di Unit Board B, maka seluruh arus akan menuju titik gangguan yaitu Unit Board B. Hal tersebut menyebabkan perubahan arah arus pada UAT A dan GT. Perubahan arah arus ditandai dengan tanda negatif pada I_1 dan I_2 . Pemodelan sistem dan rele diferensial saat hubung singkat 3 phasa di Unit Board B dapat dilihat pada gambar 4.14.

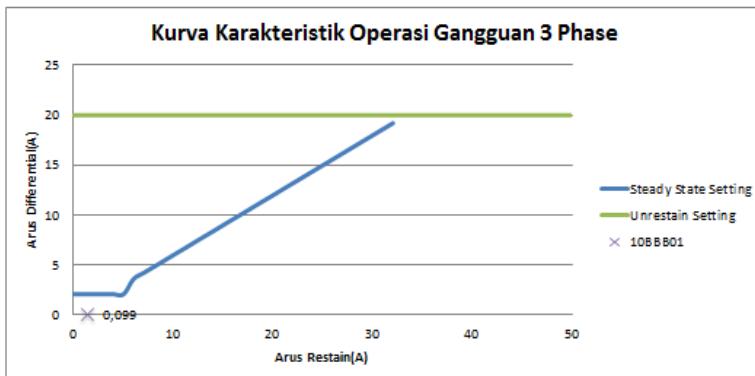


Gambar 4. 17 Permodelan Hubung Singkat 3 Phasa di Bus 10BBB01

$$\begin{aligned}
 I_{Diff} &= |I_3 - (I_1 + I_2 + I_4)| \\
 &= |I_3 - (-I_1 - I_2 + I_4)| \\
 &= \left| \left(\frac{3880}{28000/5} \right) - \left(\left(-\frac{207\sqrt{3}}{2500/5} \right) - \left(\frac{87}{6000/1} \right) + \left(\frac{9140}{6000/1} \right) \right) \right| \\
 &= |(0,693) - ((-0,717) - (0,015) + (1,523))| \\
 &= |(0,693) - (0,792)| \\
 &= 0,099 \text{ A} \\
 I_{Restrain} &= \frac{|I_1| + |I_2| + |I_3| + |I_4|}{2} \\
 &= \frac{|0,717| + |0,015| + |0,099| + |1,523|}{2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 1,474 \text{ A} \\
 \text{Slope} &= \frac{I_{Diff}}{I_{Restrain}} \times 100\% \\
 &= \frac{0,099}{1,474} \times 100 \% \\
 &= 6,711 \%
 \end{aligned}$$

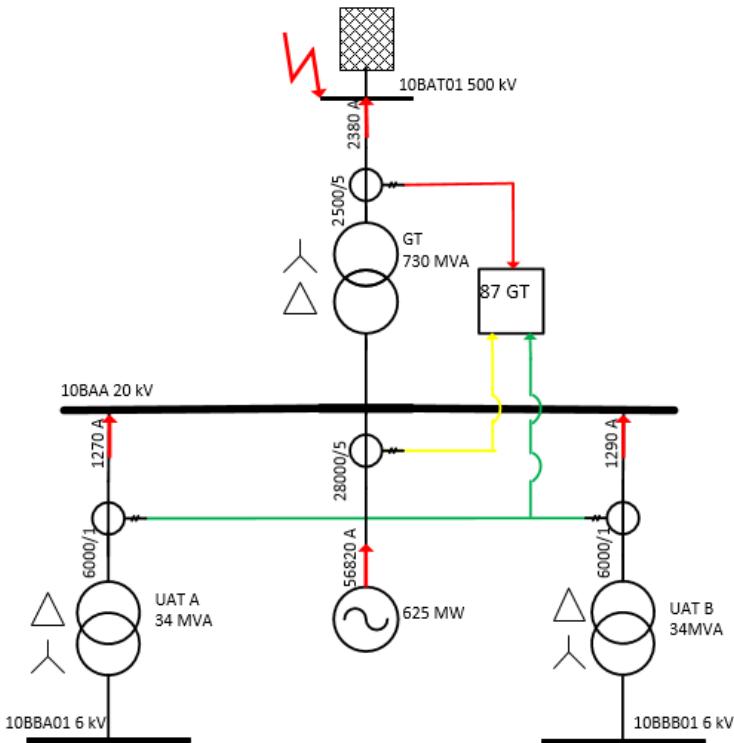
Setelah dilakukan perhitungan untuk mengetahui arus differensial, arus restrain dan slope, maka selanjutnya dilakukan plot untuk mengetahui karakteristik operasi rele saat gangguan eksternal, berikut gambar 4.15 merupakan plot kurva karakteristik operasi gangguan eksternal 3 phase pada bus 10BBB01.



Gambar 4. 18 Kurva Karakteristik Operasi Eksternal 3 Phase 10BBB01

Kondisi Gangguan Eksternal 3 Phasa di Bus 10BAT 500 kV

Saat terjadi hubung singkat 3 phasa di Bus 500kV, maka seluruh arus akan menuju titik gangguan yaitu Bus 500 kV. Hal tersebut menyebabkan perubahan arah arus pada UAT A dan UAT B. Perubahan arah arus ditandai dengan tanda negatif pada I_2 dan I_4 . Pemodelan sistem dan rele diferensial saat hubung singkat 3 phasa di bus 500kV dapat dilihat pada gambar 4.16.

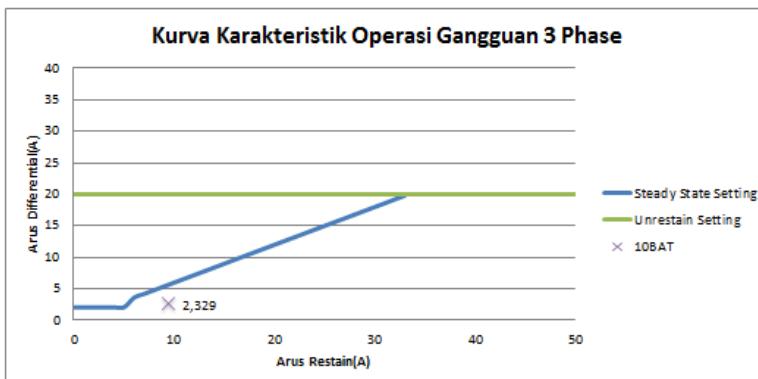


Gambar 4. 19 Permodelan Hubung Singkat 3 Phasa di Bus 10BAT

$$\begin{aligned}
 I_{Diff} &= |I_3 - (I_1 + I_2 + I_4)| \\
 &= |I_3 - (I_1 - I_2 - I_4)| \\
 &= \left| \left(\frac{56820}{28000/5} \right) - \left(\left(\frac{2380\sqrt{3}}{2500/5} \right) - \left(\frac{1270}{6000/1} \right) - \left(\frac{1290}{6000/1} \right) \right) \right| \\
 &= |(10,146) - ((8,245) - (0,212) - (0,215))| \\
 &= |(10,146) - (7,818)| \\
 &= 2,329 \text{ A} \\
 I_{Restraint} &= \frac{|I_1| + |I_2| + |I_3| + |I_4|}{2} \\
 &= \frac{|8,245| + |0,212| + |10,146| + |0,215|}{2} \\
 &= 9,409 \text{ A}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Slope} &= \frac{I_{Diff}}{I_{Restrain}} \times 100\% \\ &= \frac{2,329}{9,409} \times 100\% \\ &= 24,748\%\end{aligned}$$

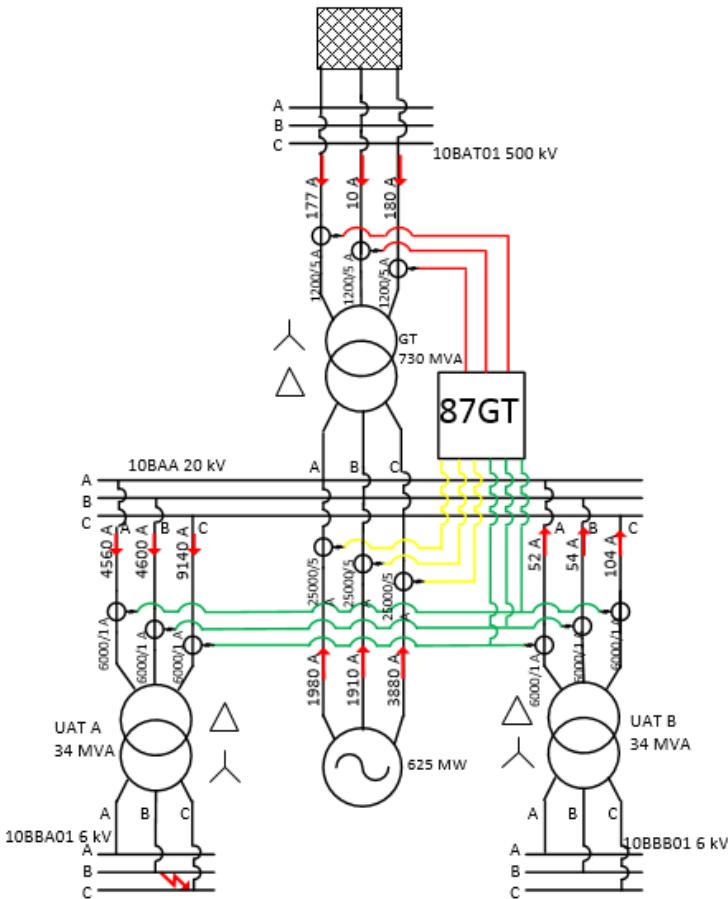
Setelah dilakukan perhitungan untuk mengetahui arus differensial, arus restrain dan slope, maka selanjutnya dilakukan plot untuk mengetahui karakteristik operasi rele saat gangguan eksternal, berikut gambar 4.17 merupakan plot kurva karakteristik operasi gangguan eksternal 3 phase pada bus 10BAT.



Gambar 4. 20 Kurva Karakteristik Operasi Eksternal 3 Phase 10BAT

Kondisi Gangguan Eksternal 2 Phasa di Bus 10BBA01

Saat terjadi hubung singkat 2 phasa di Unit Board A, maka seluruh arus akan menuju titik gangguan yaitu Unit Board A. Hal tersebut menyebabkan perubahan arah arus pada UAT B dan GT. Perubahan arah arus ditandai dengan tanda negatif pada I_1 dan I_4 . Pemodelan sistem dan rele diferensial saat hubung singkat 3 phasa di Unit Board A dapat dilihat pada gambar 4.18.



Gambar 4. 21 Permodelan Hubung Singkat 2 Phasa di Bus 10BBA01

Perhitungan arus differensial, arus restrain dan slope pada masing-masing phasa adalah sebagai berikut:

Phasa A

$$\begin{aligned}
 I_{Diff} &= |I_3 - (I_1 + I_2 + I_4)| \\
 &= |I_3 - (-I_1 + I_2 - I_4)| \\
 &= \left| \left(\frac{1980}{28000/5} \right) - \left(\left(-\frac{177\sqrt{3}}{2500/5} \right) + \left(\frac{4560}{6000/1} \right) - \left(\frac{52}{6000/1} \right) \right) \right|
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= |(0,354) - ((-0,613) + (0,760) + (-0,009))| \\
&= |(0,354) - (0,138)| \\
&= 0,215 \text{ A} \\
I_{\text{Restrain}} &= \frac{|I_1| + |I_2| + |I_3| + |I_4|}{2} \\
&= \frac{|0,613| + |0,760| + |0,354| + |0,009|}{2} \\
&= 0,868 \text{ A} \\
\text{Slope} &= \frac{I_{\text{Diff}}}{I_{\text{Restrain}}} \times 100\% \\
&= \frac{0,215}{0,868} \times 100 \% \\
&= 24,823 \%
\end{aligned}$$

Phasa B

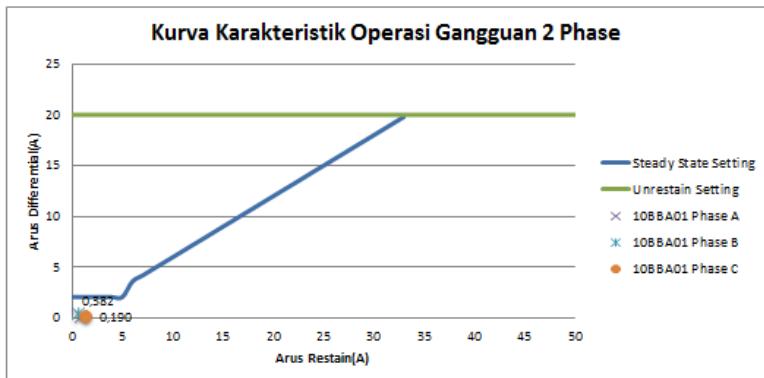
$$\begin{aligned}
I_{\text{Diff}} &= |I_3 - (I_1 + I_2 + I_4)| \\
&= |I_3 - (-I_1 + I_2 - I_4)| \\
&= \left| \left(\frac{1910}{28000/5} \right) - \left(\left(-\frac{10\sqrt{3}}{2500/5} \right) + \left(\frac{4600}{6000/1} \right) - \left(\frac{54}{6000/1} \right) \right) \right| \\
&= |(0,341) - ((-0,035) + (0,767) + (-0,009))| \\
&= |(0,341) - (0,723)| \\
&= 0,382 \text{ A} \\
I_{\text{Restrain}} &= \frac{|I_1| + |I_2| + |I_3| + |I_4|}{2} \\
&= \frac{|0,035| + |0,767| + |0,341| + |0,009|}{2} \\
&= 0,576 \text{ A} \\
\text{Slope} &= \frac{I_{\text{Diff}}}{I_{\text{Restrain}}} \times 100\% \\
&= \frac{0,382}{0,576} \times 100 \% \\
&= 66,347 \%
\end{aligned}$$

Phasa C

$$\begin{aligned}
I_{\text{Diff}} &= |I_3 - (I_1 + I_2 + I_4)| \\
&= |I_3 - (-I_1 + I_2 - I_4)| \\
&= \left| \left(\frac{3880}{28000/5} \right) - \left(\left(-\frac{180\sqrt{3}}{2500/5} \right) + \left(\frac{9140}{6000/1} \right) - \left(\frac{104}{6000/1} \right) \right) \right| \\
&= |(0,693) - ((-0,624) + (1,523) + (-0,017))| \\
&= |(0,693) - (0,882)| \\
&= 0,190 \text{ A} \\
I_{\text{Restrain}} &= \frac{|I_1| + |I_2| + |I_3| + |I_4|}{2}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{|0,624| + |1,523| + |0,693| + |0,017|}{2} \\
 &= 1,429 \text{ A} \\
 \text{Slope} &= \frac{I_{Diff}}{I_{Restrain}} \times 100\% \\
 &= \frac{0,190}{1,429} \times 100\% \\
 &= 13,273\%
 \end{aligned}$$

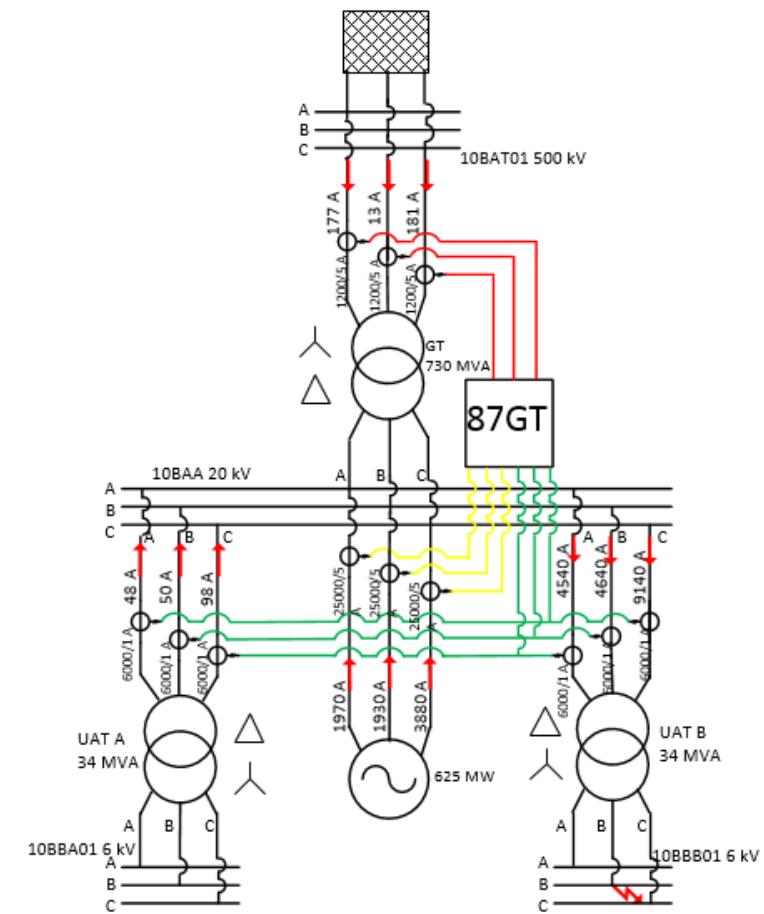
Setelah dilakukan perhitungan untuk mengetahui arus differensial, arus restrain dan slope, maka selanjutnya dilakukan plot untuk mengetahui karakteristik operasi rele saat gangguan eksternal, berikut gambar 4.19 merupakan plot kurva karakteristik operasi gangguan eksternal 2 phase pada bus 10BBA01.



Gambar 4. 22 Kurva Karakteristik Operasi Eksternal 2 Phase 10BBA01

Kondisi Gangguan Eksternal 2 Phasa di Bus 10BBB01

Saat terjadi hubung singkat 2 phasa di Unit Board B, maka seluruh arus akan menuju titik gangguan yaitu Unit Board B. Hal tersebut menyebabkan perubahan arah arus pada UAT A dan GT. Perubahan arah arus ditandai dengan tanda negatif pada I_1 dan I_2 . Pemodelan sistem dan rele diferensial saat hubung singkat 2 phasa di Unit Board B dapat dilihat pada gambar 4.20.



Gambar 4. 23 Permodelan Hubung Singkat 2 Phasa di Bus 10BBB01

Perhitungan arus differensial, arus restrain dan slope pada masing-masing phasa adalah sebagai berikut:

Phase A

$$\begin{aligned}
 I_{Diff} &= |I_3 - (I_1 + I_2 + I_4)| \\
 &= |I_3 - (-I_1 - I_2 + I_4)|
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \left| \left(\frac{1970}{28000/5} \right) - \left(\left(-\frac{177\sqrt{3}}{2500/5} \right) - \left(\frac{48}{6000/1} \right) + \left(\frac{4540}{6000/1} \right) \right) \right| \\
&= |(0,352) - ((-0,613) - (0,008) + 0,757)| \\
&= |(0,352) - (0,136)| \\
&= 0,216 \text{ A} \\
I_{\text{Restrain}} &= \frac{|I_1| + |I_2| + |I_3| + |I_4|}{2} \\
&= \frac{|0,613| + |0,008| + |0,352| + |0,773|}{2} \\
&= 0,865 \text{ A} \\
\text{Slope} &= \frac{\frac{I_{\text{Diff}}}{I_{\text{Restrain}}}}{\times 100\%} \\
&= \frac{0,216}{0,865} \times 100 \% \\
&= 25,008 \%
\end{aligned}$$

Phase B

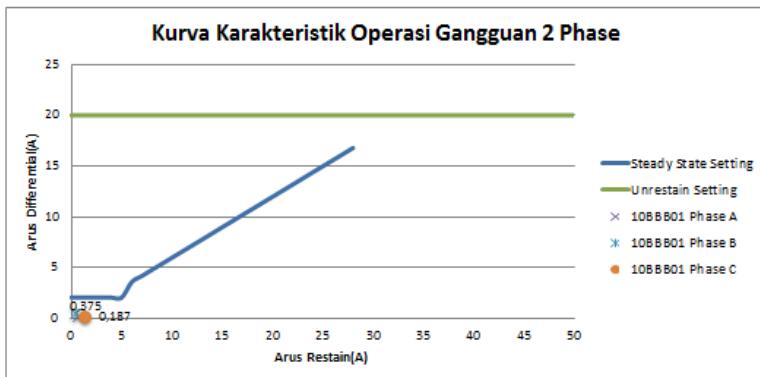
$$\begin{aligned}
I_{\text{Diff}} &= |I_3 - (I_1 + I_2 + I_4)| \\
&= |I_3 - (-I_1 - I_2 + I_4)| \\
&= \left| \left(\frac{1930}{28000/5} \right) - \left(\left(-\frac{13\sqrt{3}}{2500/5} \right) - \left(\frac{50}{6000/1} \right) + \left(\frac{4640}{6000/1} \right) \right) \right| \\
&= |(0,345) - ((-0,045) - (0,008) + 0,773)| \\
&= |(0,386) - (0,671)| \\
&= 0,375 \text{ A} \\
I_{\text{Restrain}} &= \frac{|I_1| + |I_2| + |I_3| + |I_4|}{2} \\
&= \frac{|0,045| + |0,008| + |0,345| + |0,773|}{2} \\
&= 0,586 \text{ A} \\
\text{Slope} &= \frac{\frac{I_{\text{Diff}}}{I_{\text{Restrain}}}}{\times 100\%} \\
&= \frac{0,375}{0,586} \times 100 \% \\
&= 64,084 \%
\end{aligned}$$

Phase C

$$\begin{aligned}
I_{\text{Diff}} &= |I_3 - (I_1 + I_2 + I_4)| \\
&= |I_3 - (-I_1 - I_2 + I_4)| \\
&= \left| \left(\frac{3880}{28000/5} \right) - \left(\left(-\frac{181\sqrt{3}}{2500/5} \right) - \left(\frac{98}{6000/1} \right) + \left(\frac{9140}{6000/1} \right) \right) \right| \\
&= |(0,693) - ((-0,627) - (0,016) + 1,523)| \\
&= |(0,693) - (0,880)|
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{Restrain} &= \frac{|I_1| + |I_2| + |I_3| + |I_4|}{2} \\
 &= \frac{|0,627| + |0,016| + |0,693| + |1,523|}{2} \\
 &= 1,430 \text{ A} \\
 \text{Slope} &= \frac{I_{Diff}}{I_{Restrain}} \times 100\% \\
 &= \frac{0,187}{1,430} \times 100\% \\
 &= 13,089\%
 \end{aligned}$$

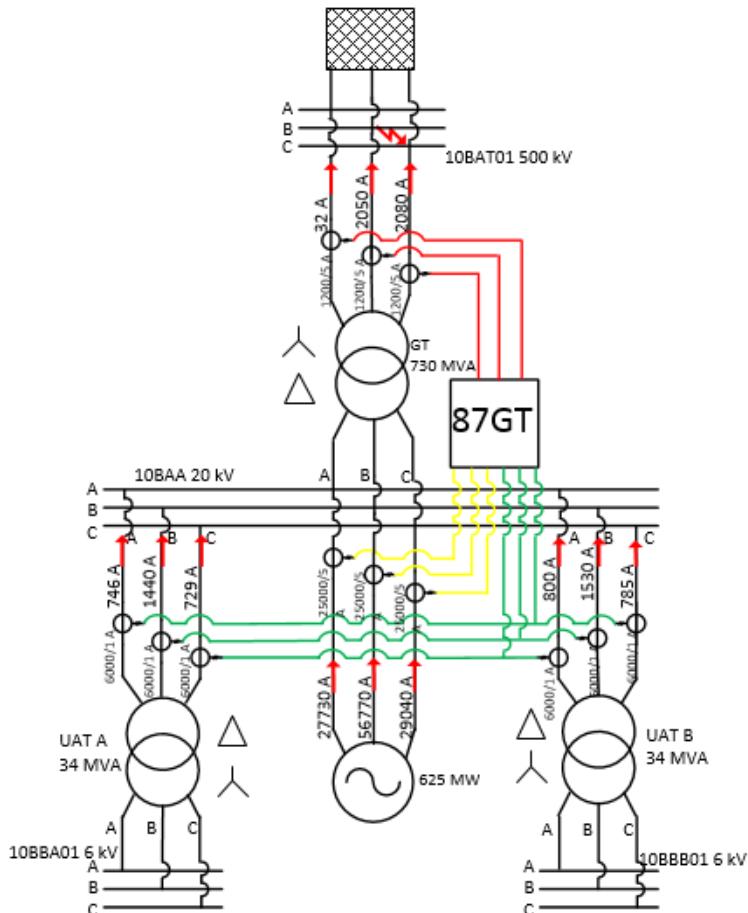
Setelah dilakukan perhitungan untuk mengetahui arus differensial, arus restrain dan slope, maka selanjutnya dilakukan plot untuk mengetahui karakteristik operasi rele saat gangguan eksternal, berikut gambar 4.21 merupakan plot kurva karakteristik operasi gangguan eksternal 2 phase pada bus 10BBB01.



Gambar 4. 24 Kurva Karakteristik Operasi Eksternal 2 Phase 10BBB01

Kondisi Gangguan Eksternal 2 Phasa di Bus 10BAT 500 kV

Saat terjadi hubung singkat 2 phasa di Bus 500kV, maka seluruh arus akan menuju titik gangguan yaitu Bus 500 kV. Hal tersebut menyebabkan perubahan arah arus pada UAT A dan UAT B. Perubahan arah arus ditandai dengan tanda negatif pada I_2 dan I_4 . Pemodelan sistem dan rele diferensial saat hubung singkat 2 phasa di bus 500kV dapat dilihat pada gambar 4.22.



Gambar 4. 25 Permodelan Hubung Singkat 2 Phasa di Bus 10BAT

Perhitungan arus differensial, arus restrain dan slope pada masing-masing phasa adalah sebagai berikut:

Phase A

$$\begin{aligned}
 I_{Diff} &= |I_3 - (I_1 + I_2 + I_4)| \\
 &= |I_3 - (I_1 - I_2 - I_4)|
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \left| \left(\frac{27730}{28000/5} \right) - \left(\left(\frac{32\sqrt{3}}{2500/5} \right) - \left(\frac{746}{6000/1} \right) - \left(\frac{800}{6000/1} \right) \right) \right| \\
&= |(4,952) - ((0,111) - (0,124) - (0,133))| \\
&= |(4,952) - (-0,147)| \\
&= 5,099 \text{ Å} \\
I_{\text{Restrain}} &= \frac{|I_1| + |I_2| + |I_3| + |I_4|}{2} \\
&= \frac{|0,111| + |0,124| + |4,952| + |0,133|}{2} \\
&= 2,660 \text{ Å} \\
\text{Slope} &= \frac{I_{\text{Diff}}}{I_{\text{Restrain}}} \times 100\% \\
&= \frac{\frac{5,099}{2,660}}{2} \times 100 \% \\
&= 191,666 \%
\end{aligned}$$

Phase B

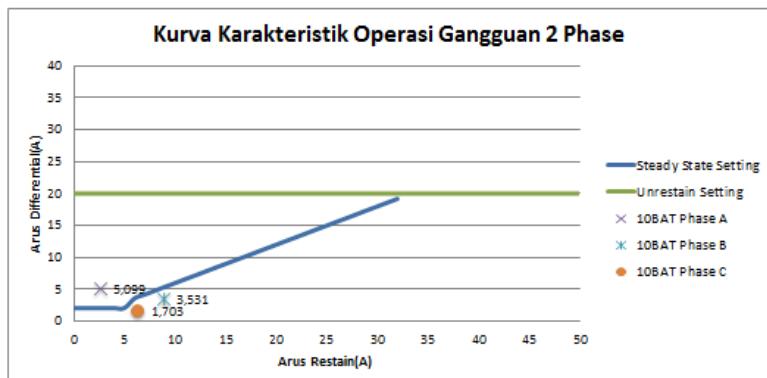
$$\begin{aligned}
I_{\text{Diff}} &= |I_3 - (I_1 + I_2 + I_4)| \\
&= |I_3 - (I_1 - I_2 - I_4)| \\
&= \left| \left(\frac{56770}{28000/5} \right) - \left(\left(\frac{2050\sqrt{3}}{2500/5} \right) - \left(\frac{1440}{6000/1} \right) - \left(\frac{1530}{6000/1} \right) \right) \right| \\
&= |(10,138) - ((7,101) - (0,240) - (0,255))| \\
&= |(10,138) - (6,606)| \\
&= 3,531 \text{ Å} \\
I_{\text{Restrain}} &= \frac{|I_1| + |I_2| + |I_3| + |I_4|}{2} \\
&= \frac{|7,101| + |0,240| + |10,138| + |0,255|}{2} \\
&= 8,867 \text{ Å} \\
\text{Slope} &= \frac{I_{\text{Diff}}}{I_{\text{Restrain}}} \times 100\% \\
&= \frac{\frac{8,867}{3,531}}{2} \times 100 \% \\
&= 39,823 \%
\end{aligned}$$

Phase C

$$\begin{aligned}
I_{\text{Diff}} &= |I_3 - (I_1 + I_2 + I_4)| \\
&= |I_3 - (I_1 - I_2 - I_4)| \\
&= \left| \left(\frac{29040}{28000/5} \right) - \left(\left(\frac{2080\sqrt{3}}{2500/5} \right) - \left(\frac{729}{6000/1} \right) - \left(\frac{785}{6000/1} \right) \right) \right| \\
&= |(5,250) - ((7,205) - (0,122) - (0,131))| \\
&= |(5,250) - (6,953)|
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 1,703 \text{ A} \\
 I_{Restrain} &= \frac{|I_1| + |I_2| + |I_3| + |I_4|}{2} \\
 &= \frac{|7,205| + |0,122| + |5,250| + |0,131|}{2} \\
 &= 6,354 \text{ A} \\
 \text{Slope} &= \frac{I_{Diff}}{I_{Restrain}} \times 100\% \\
 &= \frac{1,703}{6,354} \times 100\% \\
 &= 26,803\%
 \end{aligned}$$

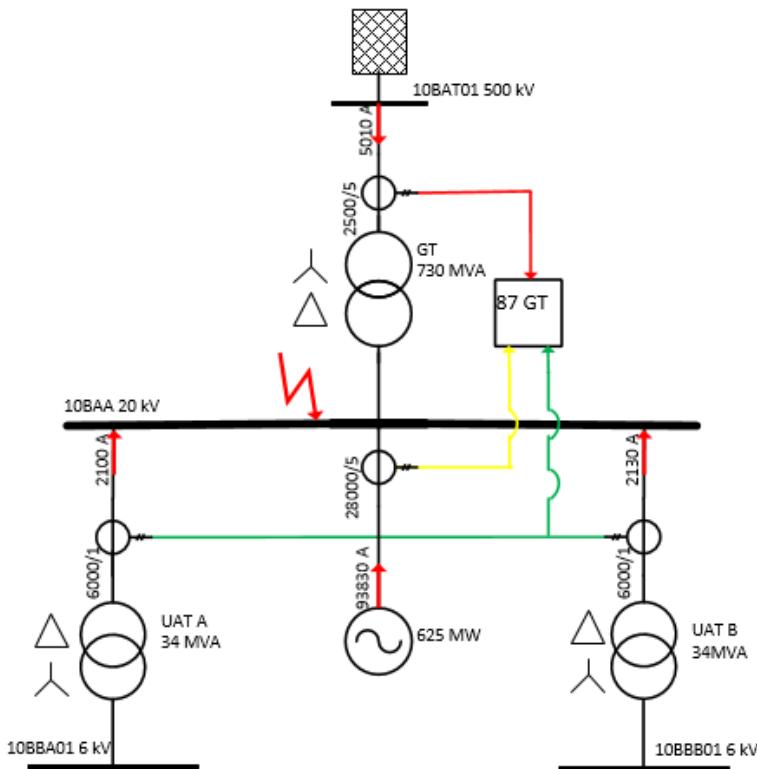
Setelah dilakukan perhitungan untuk mengetahui arus differensial, arus restrain dan slope, maka selanjutnya dilakukan plot untuk mengetahui karakteristik operasi rele saat gangguan eksternal, berikut gambar 4.23 merupakan plot kurva karakteristik operasi gangguan eksternal 2 phase pada bus 10BAT.



Gambar 4. 26 Kurva Karakteristik Operasi Eksternal 2 Phase 10BAT

Kondisi Gangguan Internal 3 Phasa di Bus 10BAA

Saat terjadi hubung singkat 3 phasa di Bus 10BAA, maka seluruh arus akan menuju titik gangguan yaitu bus 10BAA. Hal tersebut menyebabkan perubahan arah arus pada UAT A, UAT B dan GT. Perubahan arah arus ditandai dengan tanda negatif pada I_1 , I_2 dan I_4 . Pemodelan sistem dan rele diferensial saat hubung singkat 3 phasa di bus 10BAA dapat dilihat pada gambar 4.24.

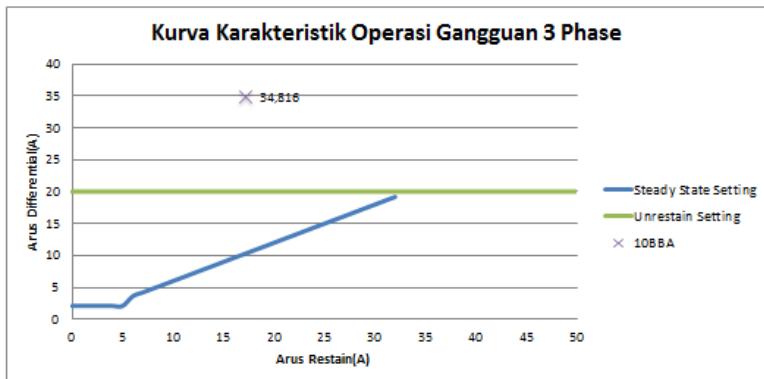


Gambar 4. 27 Permodelan Hubung Singkat 3 Phasa di Bus 10BAA

$$\begin{aligned}
 I_{Diff} &= |I_3 - (I_1 + I_2 + I_4)| \\
 &= |I_3 - (-I_1 - I_2 - I_4)| \\
 &= \left| \left(\frac{93830}{28000/5} \right) - \left(-\left(\frac{5010\sqrt{3}}{2500/5} \right) - \left(\frac{2100}{6000/1} \right) - \left(\frac{2130}{6000/1} \right) \right) \right| \\
 &= |(16,755) - (-(17,355) - (0,350) - (0,355))| \\
 &= |(16,755) - (-18,060)| \\
 &= 34,816 \text{ A} \\
 I_{Restrain} &= \frac{|I_1| + |I_2| + |I_3| + |I_4|}{2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{|17,355| + |0,350| + |16,755| + |0,355|}{2} \\
 &= 17,408 \text{ A} \\
 \text{Slope} &= \frac{I_{Diff}}{I_{Restrain}} \times 100\% \\
 &= \frac{34,816}{17,408} \times 100\% \\
 &= 200\%
 \end{aligned}$$

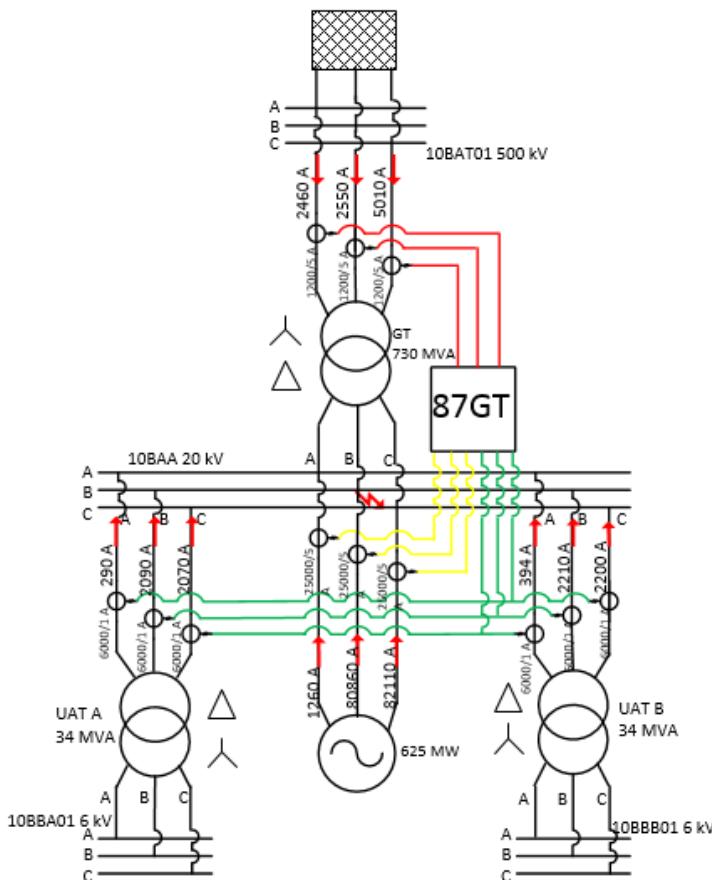
Setelah dilakukan perhitungan untuk mengetahui arus differensial, arus restrain dan slope, maka selanjutnya dilakukan plot untuk mengetahui karakteristik operasi rele saat gangguan eksternal, berikut gambar 4.35 merupakan plot kurva karakteristik operasi gangguan eksternal 3 phase pada bus 10BAA.



Gambar 4. 28 Kurva Karakteristik Operasi Internal 3 Phase 10BAA

Kondisi Gangguan Internal 2 Phasa di Bus 10BAA

Saat terjadi hubung singkat 2 phasa di Bus 10BAA, maka seluruh arus akan menuju titik gangguan yaitu bus 10BAA. Hal tersebut menyebabkan perubahan arah arus pada UAT A, UAT B dan GT. Perubahan arah arus ditandai dengan tanda negatif pada I_1 , I_2 dan I_4 . Pemodelan sistem dan rele diferensial saat hubung singkat 2 phasa di bus 10BAA dapat dilihat pada gambar 4.26.



Gambar 4. 29 Permodelan Hubung Singkat 2 Phasa di Bus 10BAA

Perhitungan arus differensial, arus restrain dan slope pada masing-masing phasa adalah sebagai berikut:

Phasa A

$$\begin{aligned}
 I_{Diff} &= |I_3 - (I_1 + I_2 + I_4)| \\
 &= |I_3 - (-I_1 - I_2 - I_4)|
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \left| \left(\frac{1260}{28000/5} \right) - \left(-\left(\frac{2460\sqrt{3}}{2500/5} \right) - \left(\frac{290}{6000/1} \right) - \left(\frac{394}{6000/1} \right) \right) \right| \\
&= |(0,225) - (-(8,522) - (0,048) - (0,066))| \\
&= |(0,225) - (-8,636)| \\
&= 8,861 \text{ A} \\
I_{\text{Restrain}} &= \frac{|I_1| + |I_2| + |I_3| + |I_4|}{2} \\
&= \frac{|8,522| + |0,048| + |0,225| + |0,066|}{2} \\
&= 4,430 \text{ A} \\
\text{Slope} &= \frac{\frac{I_{\text{Diff}}}{I_{\text{Restrain}}}}{\frac{8,861}{4,430}} \times 100\% \\
&= \frac{8,861}{4,430} \times 100 \% \\
&= 200 \%
\end{aligned}$$

Phasa B

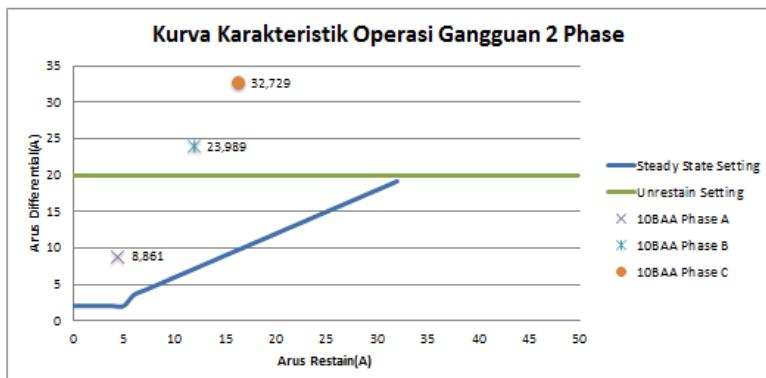
$$\begin{aligned}
I_{\text{Diff}} &= |I_3 - (I_1 + I_2 + I_4)| \\
&= |I_3 - (-I_1 - I_2 - I_4)| \\
&= \left| \left(\frac{80860}{28000/5} \right) - \left(-\left(\frac{2550\sqrt{3}}{2500/5} \right) - \left(\frac{2090}{6000/1} \right) - \left(\frac{2210}{6000/1} \right) \right) \right| \\
&= |(14,439) - (-(8,833) - (0,348) - (0,368))| \\
&= |(14,439) - (-9,550)| \\
&= 23,989 \text{ A} \\
I_{\text{Restrain}} &= \frac{|I_1| + |I_2| + |I_3| + |I_4|}{2} \\
&= \frac{|8,833| + |0,348| + |14,439| + |0,368|}{2} \\
&= 11,995 \text{ A} \\
\text{Slope} &= \frac{\frac{I_{\text{Diff}}}{I_{\text{Restrain}}}}{\frac{23,989}{11,995}} \times 100\% \\
&= \frac{23,989}{11,995} \times 100 \% \\
&= 200 \%
\end{aligned}$$

Phasa C

$$\begin{aligned}
I_{\text{Diff}} &= |I_3 - (I_1 + I_2 + I_4)| \\
&= |I_3 - (-I_1 - I_2 - I_4)| \\
&= \left| \left(\frac{82110}{28000/5} \right) - \left(-\left(\frac{5010\sqrt{3}}{2500/5} \right) - \left(\frac{2070}{6000/1} \right) - \left(\frac{2200}{6000/1} \right) \right) \right| \\
&= |(14,663) - (-(17,355) - (0,345) - (0,367))| \\
&= |(14,663) - (-18,067)|
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 32,729 \text{ A} \\
 I_{Restrain} &= \frac{|I_1| + |I_2| + |I_3| + |I_4|}{2} \\
 &= \frac{|17,355| + |0,345| + |14,663| + |0,367|}{2} \\
 &= 16,365 \text{ A} \\
 \text{Slope} &= \frac{I_{Diff}}{I_{Restrain}} \times 100\% \\
 &= \frac{32,729}{16,365} \times 100\% \\
 &= 200\%
 \end{aligned}$$

Setelah dilakukan perhitungan untuk mengetahui arus differensial, arus restrain dan slope, maka selanjutnya dilakukan plot untuk mengetahui karakteristik operasi rele saat gangguan eksternal, berikut gambar 4.27 merupakan plot kurva karakteristik operasi gangguan eksternal 2 phase pada bus 10BAA.



Gambar 4. 30 Kurva Karakteristik Operasi Internal 2 Phase 10BAA

Rekomendasi Setting

Berdasarkan plot kurva karakteristik operasi saat kondisi normal, gangguan eksternal 3 phase dan gangguan eksternal 2 phase, diketahui bahwa saat terjadi gangguan eksternal 2 phase pada bus 10BAT atau bus grid PLN 500 kV. Rele akan memerintahkan CB untuk membuka karena gangguan eksternal 2 phase pada bus 10BAT berada pada kurva operasi rele, yang mana rele differensial dilarang untuk bekerja saat kondisi normal dan gangguan eksternal. Berikut merupakan data saat terjadi gangguan eksternal 2 phase A pada bus 10BAT:

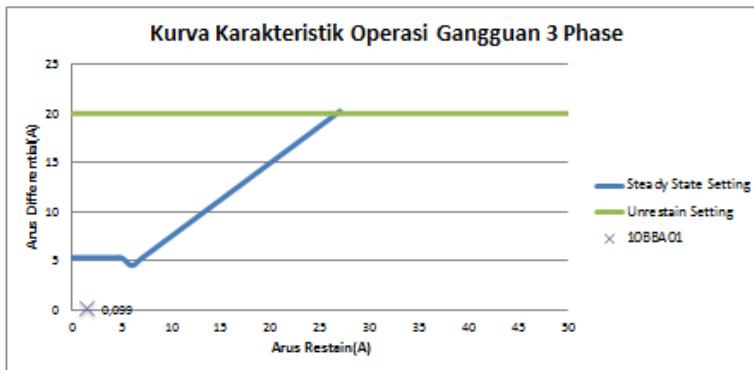
- I_{Diff} adalah 5,099 A
- $I_{Restrain}$ adalah 2,660 A
- Nilai slope adalah 191,666%

Oleh karena itu, rekomendasi *setting* yang disarankan akan berdasarkan analisis gangguan eksternal 2 phase pada bus 10BAT.

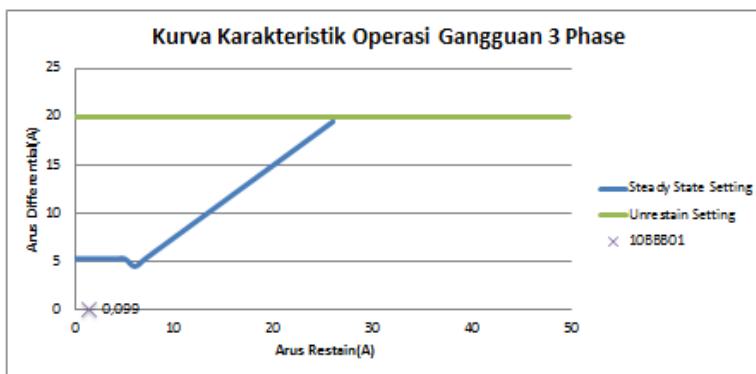
Pertimbangan pemilihan *setting pick up* berdasarkan I_{Diff} terbesar yaitu $pick\ up > 5,099A$, *setting pickup* dipilih 1,4 $Ie = 1,4 \times 3,8 = 5,3A$, sedangkan untuk *pick up* instan adalah 5,3Ie agar rele bekerja secara cepat yaitu 20 ms saat gangguan internal.

$$\circ \text{ Setting slope} = 0,75$$

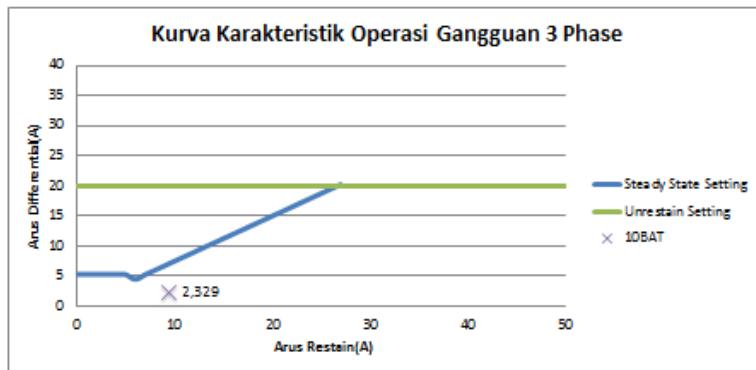
Pertimbangan pemilihan *setting slope* sebesar 0,75 untuk mengantisipasi kemungkinan rele tidak stabil ketika terjadi gangguan eksternal dan CT mengalami saturasi. Rele *differensial* bekerja dengan logika AND sehingga rele *differensial* akan bekerja hanya jika telah memenuhi kedua parameter I_{Diff} dan slope. Berikut gambar 4.28 hingga 4.35 merupakan kurva karakteristik operasi *resetting* pada setiap gangguan eksternal dan internal.



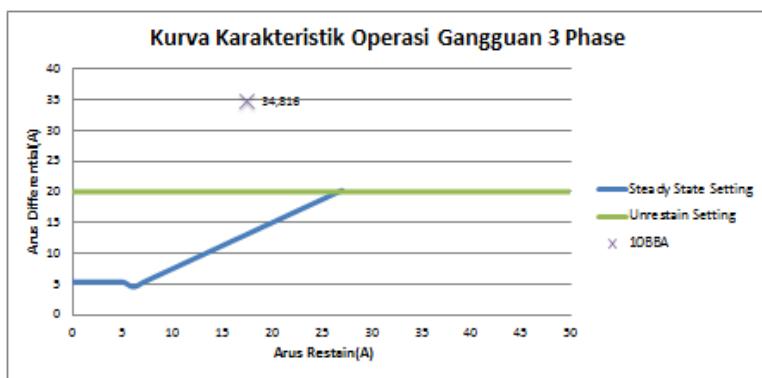
Gambar 4. 31 Kurva Karakteristik Operasi Eksternal 3 Phase 10BBA01 *Resetting*



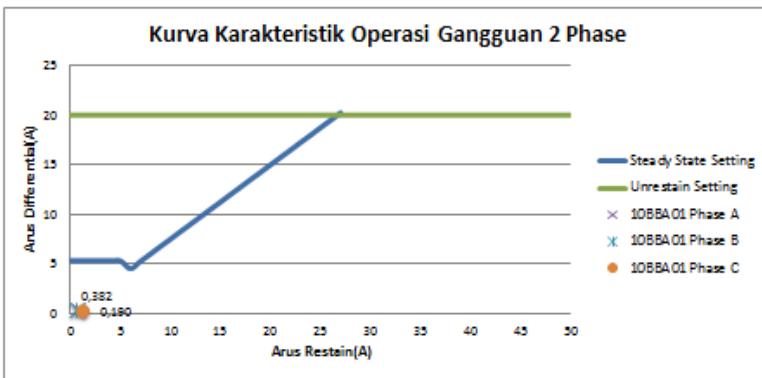
Gambar 4. 32 Kurva Karakteristik Operasi Eksternal 3 Phase 10BBB01
Resetting



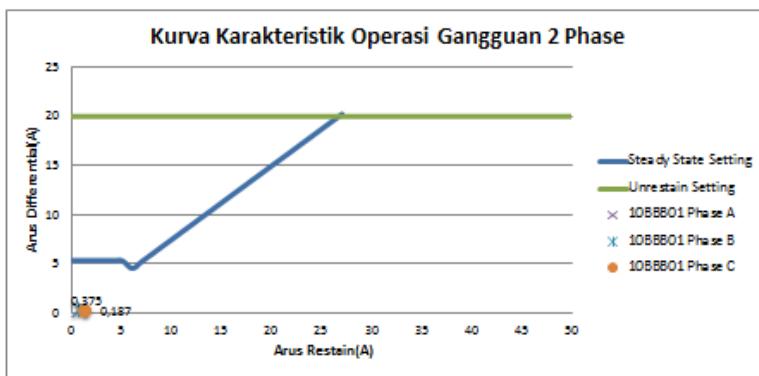
Gambar 4. 33 Kurva Karakteristik Operasi Eksternal 3 Phase 10BAT01
Resetting



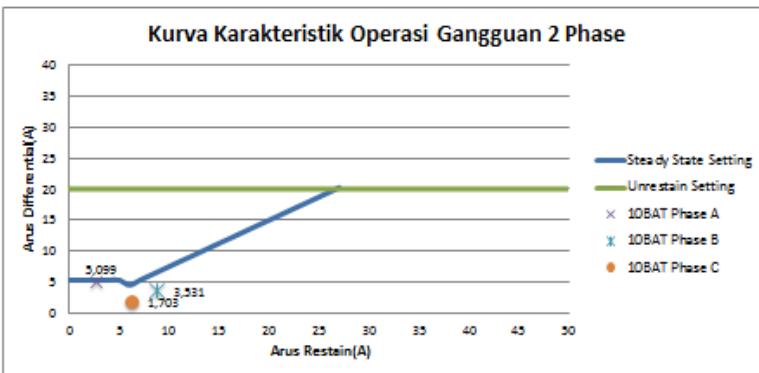
Gambar 4. 34 Kurva Karakteristik Operasi Internal 3 Phase 10BAA Resetting



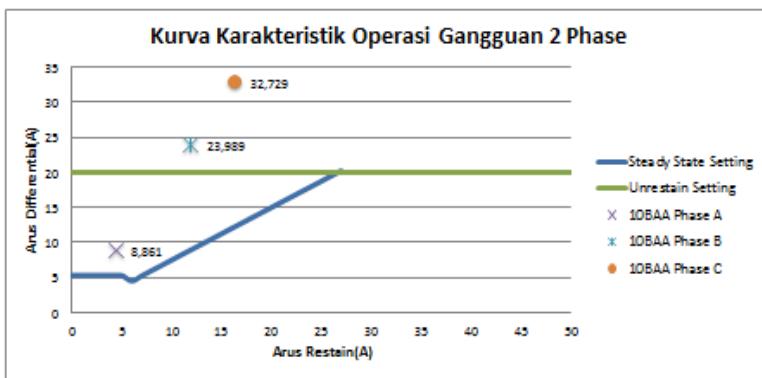
Gambar 4. 35 Kurva Karakteristik Operasi Eksternal 2 Phase 10BBA01 Resetting



Gambar 4. 36 Kurva Karakteristik Operasi Eksternal 2 Phase 10BBB01
Resetting



Gambar 4. 37 Kurva Karakteristik Operasi Eksternal 2 Phase 10BAT
Resetting



Gambar 4. 38 Kurva Karakteristik Operasi Internal 2 Phase 10BAA *Resetting*

Daerah di atas kurva *setting* merupakan daerah kerja rele, sehingga rele diferensial hanya akan bekerja apabila gangguan yang terjadi berada di atas kurva *setting* rele. Pada saat terjadi gangguan eksternal 2 phase dan 3 phase pada setiap bus menunjukkan bahwa rele tidak akan bekerja. Sedangkan saat terjadi gangguan internal 2 phase dan 3 phase maka gangguan terletak pada daerah kurva *unrestain setting* yang mana rele akan bekerja dengan waktu operasi 20 ms.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan pada PT Indonesia Power UJP PLTU Banten 1 Suralaya Unit 8 dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada rele *overcurrent* tipikal 1 terdapat kekeliruan yaitu rele 10BCA01, 10BBA01 dengan rele 10BBU01 dapat bekerja bersamaan karena *gradding time* sebesar 0,1s, terjadi kurva yang bertabrakan antara rele 10BFT01 dengan rele 10BCA01, 10BBA01.
2. Pada rele *overcurrent* tipikal 1,2 dan 3 terdapat kekeliruan yaitu *setting pick up* yang terlalu besar mencapai 1,5In dan 3In sehingga rele tidak dapat mengamankan peralatan saat terjadi *overload*.
3. Pada rele *ground fault* terdapat kesalahan pada *I pickup* yang mana melebihi dari 50% *Isc* dan *gradding time* 0,8s, sehingga dilakukan *resetting* dengan *I pickup* 20A dan *gradding time* 0,3s.
4. Perhitungan insiden energi *arc flash* dengan menggunakan metode modifikasi menghasilkan nilai insiden energi yang mengalami penurunan dibandingkan dengan standar IEEE 1584-2002, sebagai contoh bus 10BBA01 dengan menggunakan standar IEEE 1584-2002 adalah 46,29 cal/cm² sedangkan dengan metode modifikasi adalah 38,73 cal/cm² dan kategori energi mengalami penurunan dari 4 menjadi 3. Perubahan ini terjadi karena pada metode modifikasi mempertimbangkan awal mula arus kontribusi berdasarkan domain waktu hubung singkat dengan batas yaitu putusnya masing-masing circuit breaker.
5. *Setting* rele differensial didasarkan pada nilai I_{diff} dan slope saat kondisi normal dan gangguan eksternal karena rele differensial tidak boleh bekerja saat kondisi normal dan gangguan eksternal. Kedua parameter tersebut (I_{diff} dan slope) diatur dengan logika AND sehingga rele hanya akan bekerja jika kedua parameter tersebut tercapai.

6. Rekomendasi *setting* rele differensial adalah $I_{pick\ up} = 1,4$ Ie atau $5,3$ A, slope=0,75. *Setting* $I_{pick\ up}$ didasarkan pada nilai I_{diff} terbesar pada daerah $< Bp_2$ yaitu saat gangguan eksternal 2 phase pada bus 10BAT atau bus grid PLN 500 kV.

5.2 Saran

Dengan mempertimbangkan hasil studi yang telah dilakukan pada tugas akhir ini, terdapat saran yang dapat menjadi masukan sebagai berikut:

1. Pada *setting* rele yang terdapat pada tugas akhir ini, dapat dijadikan pertimbangan dan referensi untuk melakukan *resetting* yang sebenarnya.
2. Pekerja diharapkan dapat menggunakan APD sesuai dengan kategori level insiden energi pada daerah kerja tersebut.
3. Pemilihan *setting* rele untuk trafo $\Delta - Y$, disarankan menghitung saat gangguan 2 phasa, karena terdapat perbedaan belitan trafo yang mengakibatkan perbedaan arus pada sisi $\Delta - Y$.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. IEEE Std 242-2001™., “IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, Ch. 15, 2001
- [2]. Lazar, Irwin., “Electrical Systems Analysis and Design For Industrial Plants”, McGraw-Hill Book Company,1980.
- [3]. IEEE Std. 1584-2002.,”IEEE Guide for Performing Arc Flash Hazard Calculation”, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc 2002.
- [4]. Wu, Alex Y., “Modified Medium Voltage Arc Flash Incident Energy Calculation Method”, IEEE Transaction on Industry Application, USA, 2010.
- [5]. National Fire Protection Association., ” NFPA 70E Standar For Electrical Safety in the Workplace 2015 Edition”, Massachusetts, 2014.
- [6]. IEEE Std 551™-2006., “IEEE Recommended Practice for Calculating Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 2006.
- [7]. Riyadi, Rahmat., “Analisa Sistem Proteksi dengan Metode Perhitungan Arc-Flash yang Dimodifikasi untuk diaplikasikan pada Sistem Tegangan Menengah di PT. Pupuk Kaltim Unit 1(PKT 1)”, Jurnal Teknik ITS Vol 1, September, 2012.
- [8]. Préve, Christope., “Protection for Electrical Network”, ISTE Ltd., London, Ch. 7, 9, 2006.
- [9]. Guodian Nanjing Automation Co.LTD., “NEP 980 Series Protection And Control Equipment” Guodian Nanjing Automation Co.LTD, 2008.
- [10]. Shanghai Electric., “Generator Technical Data Sheet”, Shanghai Electric Power Generation Equipment Co.LTD.
- [11]. Gelpag., “VEP Medium Voltage Embedded Pole Vacuum Circuit Breaker”, 2007.
- [12]. Gelpag ., “VEC Vacuum Contactor Instruction Manual, 2007.
- [13]. Nari, nanjing., “RCS-985B Generator Protection Instruction Manual”, Nanjing Nari Relays Electric CO., LTD, 2008.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIOGRAFI PENULIS



Muhammad Hanafi Riskiawan, lahir di Klaten pada tanggal 10 September 1996. Penulis akrab dipanggil Hanafi merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara dan mulai menempuh jenjang pendidikan di SD Negeri 2 Karanglo (2002-2008), SMP N 1 Klaten (2008-2011), SMA N 2 Klaten (2011-2014). Setelah lulus dari SMA, penulis melanjutkan pendidikan di Sekolah Vokasi Universitas Gadjah Mada dengan mengambil bidang studi Power. Setelah lulus pada tahun 2017, penulis melanjutkan pendidikan program strata-1 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2017 dengan mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Penulis dapat dihubungi melalui email: mhriskiawan@gmail.com.