



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE 141599

**STUDI KOORDINASI PENGAMANAN
MEMPERTIMBANGKAN BUSUR API DI PT PLTU
TANJUNG JATI B JEPARA**

FIRDAUS YUSUF KURNIAWAN
NRP 07111745000013

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.
Feby Agung Pamuji, S.T., M.T., Ph.D.

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



FINAL PROJECT - EE 141599

**PROTECTION COORDINATION STUDY CONSIDERING
ARC FLASH AT PT PLTU TANJUNG JATI B JEPARA**

Firdaus Yusuf Kurniawan
NRP 07111745000013

Advisor
Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.
Feby Agung Pamuji, 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 Pengamanan Mempertimbangkan Busur Api Di PT PLTU Tanjung Jati B Jepara” 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.

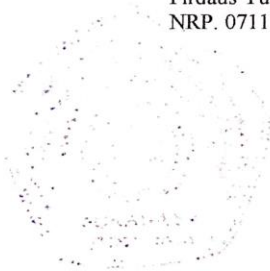
Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

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

Surabaya, Mei 2019



Firdaus Yusuf Kurniawan
NRP. 0711174500013



Halaman ini sengaja dikosongkan

**STUDI KOORDINASI PROTEKSI MEMPERTIMBANGKAN
BUSUR API DI PT PLTU TANJUNG JATI B JEPARA**

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

Dosen Pembimbing II

Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T. Feby Agung Pamuji, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 196603181990101001 NIP. 198702062012121002



Halaman ini sengaja dikosongkan

STUDI KOORDINASI PROTEKSI MEMPERTIMBANGKAN BUSUR API (*ARC FLASH*) DI PT PLTU TANJUNG JATI B JEPARA

Nama : Firdaus Yusuf Kurniawan
Pembimbing I : Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.
Pembimbing II : Feby Agung Pamuji, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRAK

PT PLTU TANJUNG JATI B JEPARA merupakan sebuah pembangkit listrik yang terletak di desa Tubanan Kecamatan Kembang Kabupaten Jepara Provinsi Jawa Tengah, dengan kapasitas 2x660 MW. sebagai perusahaan produsen energy listrik harus dapat menjaga kontinuitas aliran daya dan kehandalan sistem kelistrikan dari gangguan-gangguan yang mungkin timbul agar proses produksi dapat berjalan dengan lancar dan maksimal. Oleh karena itu, koordinasi proteksi memiliki peran yang sangat penting untuk mengatasi gangguan. selain dapat mengganggu sistem kelistrikan, juga dapat menimbulkan insiden busur api (*arc flash*) yang berbahaya bagi pekerja. Serta menentukan perlengkapan keselamatan kerja (*personal protective equipment*) (PPE) sesuai level insiden energi busur api dengan standar NFPA 70E-2015.

Dari hasil plot koordinasi kurva arus waktu kondisi existing dapat diketahui bahwa nilai waktu tunda (*time delay*) terlalu besar sehingga menyebabkan nilai busur api menjadi besar. Analisis busur api (*arc flash*) dapat menggunakan IEEE 1584-2002 dengan menghitung insiden energi menggunakan *bolted three-phase fault* terbesar dan *fault clearing time* untuk mengamankan arus gangguan yang terjadi. Dari hasil perhitungan untuk analisis busur api (*arc flash*) pada sistem kelistrikan 10 kV dan 3 kV, terdapat penurunan nilai insiden energi. Selain itu pada rele differensial 87GT terdapat kesalahan pemilihan *tap* yang akan menyebabkan rele bekerja saat terjadi gangguan eksternal 2 phase pada bus 500 kV. Berdasarkan hasil analisis maka didapatkan rekomendasi pengaturan (*setting*) rele differensial adalah Input 1 CT Tap = 4,1 A, Input 2 CT Tap = 7,3 A , Input 3 CT Tap = 5 A, Slope = 60%

Kata kunci : koordinasi proteksi, busur api (*arc flash*), insiden energi, Perlengkapan keselamatan kerja (*personal protective equipment*)(PPE), rele diferensial .

Halaman ini sengaja dikosongkan

***PROTECTION COORDINATION STUDY
CONSIDERING BUSUR API (ARC FLASH) AT PT
PLTU TANJUNG JATI B JEPARA***

Name : Firdaus Yusuf Kurniawan
1st Advisor : Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.
2nd Advisor : Feby Agung Pamuji, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRACT

PT PLTU TANJUNG JATI B JEPARA is a power plant located in the village of Tubanan, Kembang District, Jepara Regency, Central Java Province, with a capacity of 2x660 MW. as a company producing electricity energy must be able to maintain the continuity of power flow and reliability of the electrical system from disturbances that may arise so that the production process can run smoothly and optimally. Therefore, coordination of protection has a very important role in overcoming interference. besides being able to disrupt the electricity system, it can also cause arcing incidents (Flash Arc) that are dangerous for workers. And determine *personal protective equipment* (PPE) according to the level of incident arc energy with the NFPA 70E-2015 standard.

From the results of the coordination plot of the current time curve, it can be seen that the waktu tunda (*time delay*) value is too large, causing the arc value to be large. *Arc flash* analysis can use IEEE 1584-2002 by calculating energy incidents using the largest bolted three-phase fault and fault clearing time to secure the flow of disturbances that occur. From the results of calculations for *arc flash* analysis on electrical systems of 10 kV and 3 kV, there is a decrease in the value of energy incidents. In addition to the 87GT differential relay there is a tap selection error that will cause the relay to work when there is an external 2 phase interference on the 500 kV bus. Based on the results of the analysis, the recommendations for differensial relay pengaturan (*setting*)s are input 1 CT Tap = 6.8 A, Input 2 CT Tap = 4.4 A, Input 3 CT Tap = 4.1 A, Slope = 40%.

Keywords: protection coordination, busur api (*arc flash*), energy incidents, Perlengkapan keselamatan kerja atau *personal protective equipment*(PPE), differential relay..

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT karena atas rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul “Studi Koordinasi Pengamanan Mempertimbangkan Busur Api Di PT PLTU Tanjung Jati B Jepara”.

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

1. Keluarga tercinta atas do'a, semangat, kasih sayang, dan kepercayaan yang diberikan selama ini, serta dukungan baik moril maupun materiil.
2. Bapak Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT. dan Bapak Feby Agung Pamuji, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing, atas segala kesabaran dan kesediaannya meluangkan waktu untuk membimbing serta memberi dukungan sehingga laporan ini dapat terselesaikan tepat waktu.
3. Pegawai dan karyawan PT PLTU Tanjung Jati B Jepara yang telah memberikan izin untuk pengambilan data.
4. Hanafi, Iik, Ivan, Alfian, Rizki, Mas Wahyu, Mas Imron, Mas Fajar, Mas Singgih, Mas Habibi sebagai teman kontarakan yang telah memberikan bantuan dan dukungan selama ini.
5. Teman-teman LJ teknik sistem tenaga, 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 terselesaikannya 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	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
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.....	1
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan.....	2
1.5 Metodologi.....	2
1.6 Manfaat.....	3
1.7 Sistematika Penulisan.....	3
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 Hubungan Singkat.....	6
2.2 Perhitungan Arus Hubungan Singkat.....	6
2.3 Rele Arus Lebih.....	8
2.2.1 Rele Arus Lebih <i>Definite</i>	8
2.2.2 Rele Arus Lebih <i>Instantaneous</i>	9
2.2.3 Rele Arus Lebih <i>Inverse</i>	9
2.4 Koordinasi Rele Arus Lebih.....	11

2.5	Rele Gangguan Tanah	11
2.6	Rele Differential	12
2.7	Busur api (<i>arc flash</i>).....	12
2.7.1	Perhitungan Insiden Energi Busur api (<i>arc flash</i>) Standar IEEE 1584-2002	13
2.8	<i>Flash Protection Boundary</i>	15
2.9	Kategori PPE Dan Alat Pelindung Diri Sesuai Standar NFPA 70E 2015	16
BAB III SISTEM KELISTRIKAN PT PLTU TANJUNGPATI B JEPARA.....		19
3.1	Sistem Kelistrikan	19
3.2	Data Peralatan	19
3.2.1	Data Generator.....	19
3.2.2	Data Transformator.....	19
3.2.3	Data Beban	21
BAB IV HASIL DAN SIMULASI		23
4.1	Permodelan Sistem Kelistrikan	23
4.2	Pemilihan Tipikal Koordinasi	23
4.3	Data Hubungan Singkat	24
4.3.1	Arus Hubungan Singkat Minimum.....	24
4.3.2	Arus Hubungan Singkat Maksimum.....	24
4.4	Koordinasi Rele Arus Lebih	25
4.4.1	Tipikal 1A, 1B, 1C, 1D.....	25
4.4.2	Tipikal 2A dan 2B.....	33
4.4.3	Tipikal 3A, 3B, 3C, dan 3D.....	40
4.4.4	Tipikal 4A, 4B, 4C, dan 4D.....	46
4.5	Koordinasi Rele Gangguan Fasa Ke Tanah.....	52
4.6	Perbandingan Pengaturan (<i>setting</i>) Rele.....	57

4.7 Pengaturan (<i>Setting</i>) Rele Diferensial.....	59
4.7.1 Kondisi Pengaturan Awal (<i>Exsisting</i>).....	59
Kondisi Normal.....	61
Kondisi Gangguan Eksternal di Bus UNIT BOARD A 3 Fase ...	63
Kondisi Gangguan Eksternal di Bus UNIT BOARD B 3 Fase ...	64
Kondisi Gangguan Eksternal di Bus 500 kV 3 Fase	66
Kondisi Gangguan Eksternal di Bus UNIT BOARD A 2 Fase ...	67
Kondisi Gangguan Eksternal di Bus UNIT BOARD B 2 Fase ...	69
Kondisi Gangguan Eksternal di Bus 500 kV 2 Fase	70
4.7.2 Kondisi Pengaturan Ulang (<i>Resetting</i>)	72
Kondisi Gangguan Internal di Bus U1-AT 3 Fase	73
Kondisi Gangguan Internal di Bus U1-AT 2 Fase	74
4.8 Analisis Busur api (<i>arc flash</i>).....	75
4.8.1 Hasil Simulasi Insiden Energi Busur api (<i>arc flash</i>) Dan Flash Protection Boundary Exsisting.....	75
4.8.2 Nilai Insiden Energi Busur api (<i>arc flash</i>) Dan Flash Protection Boundary Pengaturan ulang (<i>resetting</i>)	76
4.9 Nilai <i>Exsisting</i> Dibanding Pengaturan ulang (<i>resetting</i>) Dengan Standar IEEE 1584-2002.....	85
4.10 Perbandingan FPB dan Personal Protective Equipment	86
4.10.1 Perbandingan PPE Pengaturan ulang (<i>resetting</i>) Dengan Pengaturan awal (<i>exsisting</i>).	87
BAB V PENUTUP.....	93
5.1 Kesimpulan.....	93
5.2 Saran.....	93
DAFTAR PUSTAKA	95
INDEX	97
LAMPIRAN	99
RIWAYAT HIDUP PENULIS	101

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Gangguan Hubungan Singkat Tiga Fasa	6
Gambar 2.2	Gangguan Hubungan Singkat Dua Fasa	7
Gambar 2.3	Gangguan Hubungan Singkat Satu Fasa Ke Tanah	7
Gambar 2.4	Kurva Karakteristik Rele Arus Lebih <i>Definite</i>	9
Gambar 2.5	Kurva Karakteristik Rele Arus Lebih <i>Instantaneous</i>	9
Gambar 2.6	Kurva Karakteristik Rele Arus Lebih <i>Inversee</i>	10
Gambar 2.7	Aliran Arus Kondisi Normal Operasi	12
Gambar 2.8	<i>Arching Fault</i> dan <i>Bolted Fault</i>	13
Gambar 2.9	PPE Berdasarkan Kategori Busur api (<i>arc flash</i>)	18
Gambar 4.1	Diagram satu garis Tipikal 1A, 1B, 1C, 1D	26
Gambar 4.2	Plot TCC Pengaturan awal (<i>existing</i>) Tipikal 1A, 1B, 1C, dan 1D	27
Gambar 4.3	Plot TCC Tipikal 1A, 1B, 1C, dan 1D Pengaturan ulang (<i>resetting</i>)	33
Gambar 4.4	Diagram satu garis Tipikal 2A dan 2B	34
Gambar 4.5	Plot TCC Tipikal 2A Pengaturan awal (<i>existing</i>)	35
Gambar 4.6	Plot TCC Tipikal 2A dan 2B Pengaturan ulang (<i>resetting</i>)	40
Gambar 4.7	Diagram satu garis Tipikal 3A, 3B, 3C, dan 3D	41
Gambar 4.8	Plot TCC Tipikal 3A, 3B, 3C, dan 3D Pengaturan awal (<i>existing</i>)	42
Gambar 4.9	Plot TCC Tipikal 3A, 3B, 3C, dan 3D Pengaturan ulang (<i>resetting</i>)	46
Gambar 4.10	Diagram satu garis Tipikal 4A, 4B, 4C, dan 4D	47
Gambar 4.11	Plot <i>TCC</i> Tipikal 4A dan 4B Pengaturan awal (<i>existing</i>)	48
Gambar 4.12	Plot <i>TCC</i> Tipikal 4A dan 4B Pengaturan ulang (<i>resetting</i>)	52
Gambar 4.13	Diagram satu garis Tipikal <i>Ground Fault</i>	53
Gambar 4.14	Plot TCC <i>Ground Fault</i> Pengaturan awal (<i>existing</i>)	54
Gambar 4.15	Plot TCC <i>Ground Fault</i> Pengaturan ulang (<i>resetting</i>) ...	57
Gambar 4.16	Konfigurasi Rele Diferensial	59
Gambar 4.17	Permodelan Kondisi Normal	62
Gambar 4.18	Permodelan Hubungan Singkat 3 Phasa di Bus UNIT BOARD A	63
Gambar 4.19	Permodelan Hubungan Singkat 3 Phasa di Bus UNIT BOARD B	65

Gambar 4.20 Permodelan Hubungan Singkat 3 Fasa di Bus Grid	66
Gambar 4.21 Permodelan Hubungan Singkat 2 Fasa di Bus UNIT BOARD A.....	68
Gambar 4.22 Permodelan Hubungan Singkat 2 Fasa di Bus UNIT BOARD B.....	69
Gambar 4.23 Permodelan Hubungan Singkat 3 Fasa di Bus 500KV	71
Gambar 4.25 Kurva Karakteristik Operasi.....	72
Gambar 4.26 Permodelan Hubungan Singkat 3 Fasa di Bus U1-AT	73
Gambar 4.27 Kurva Karakteristik Operasi.....	75

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tabel Karakteristik Rele Arus Lebih <i>Inversee</i>	10
Tabel 2.2 <i>Interval</i> Waktu Antar Rele	11
Tabel 2.3 Parameter <i>Gap</i> Bus dan <i>Working Distance</i>	14
Tabel 2.4 Parameter Jarak Faktor x	15
Tabel 3.1 Data Generator.....	19
Tabel 3.2 Data Transformator.....	20
Tabel 3.3 Data Beban	21
Tabel 4.1 Data Hubungan Singkat Minimum.....	24
Tabel 4.2 Data Hubungan Singkat Maksimum.....	25
Tabel 4.3 Simulasi Insiden Energi Busur api (<i>arc flash</i>) Pengaturan awal (<i>exsisting</i>)	76
Tabel 4.4 Perbandingan Insiden Energi Simulasi Pengaturan awal (<i>exsisting</i>) Dengan Perhitungan Pengaturan ulang (<i>resetting</i>) Menggunakan Standar IEEE 1584-2002.....	85

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PT PLTU TANJUNG JATI B JEPARA merupakan sebuah pembangkit listrik yang terletak di desa Tubanan Kecamatan Kembang Kabupaten Jepara Provinsi Jawa Tengah, dengan kapasitas 2x660 MW. Untuk menjadikan sistem kelistrikan Jawa-Bali tunggal dan terpadu, maka pembangkit tersebut tersambung dengan saluran transmisi 500 kV. Dengan kapasitas yang besar, maka pembangkit tersebut sangat berpengaruh terhadap sistem kelistrikan maupun permintaan beban di daerah Jawa-Bali, sehingga dibutuhkan keandalan dan kontinuitas yang sangat tinggi. Untuk menjaga keamanan dan proses produksi agar tidak terganggu, dibutuhkan sistem proteksi yang baik untuk memisahkan bagian gangguan dengan bagian normal, melindungi peralatan dari kerusakan dan kecelakaan pekerja, sehingga untuk itu perlu dilakukan koordinasi proteksi. Salah satu faktor yang harus juga ikut dihitung dalam penentuan pengaturan (*setting*) sistem proteksi pada sebuah plant adalah adanya bahaya busur api (*arc flash*) atau busur api yang sering dilupakan oleh instalatir lapangan.

Busur api (*arc flash*) merupakan fenomena percikan api akibat adanya arus hubungan singkat pada sistem tenaga listrik. Busur api (*arc flash*) terjadi pada saat hubungan singkat. Busur api (*arc flash*) memiliki efek, yaitu berupa ledakan, radiasi panas, cahaya yang menyilaukan, dan tekanan yang sangat besar. dengan melakukan perhitungan arus busur (*arcing current*) dan insiden energi akan diketahui level energi bahaya busur api (*arc flash*) yang mungkin terjadi pada sistem, agar pemilihan peralatan pengaman dapat diperhitungkan untuk mengurangi level bahaya energi busur api (*arc flash*) tersebut. Dari analisis dan perhitungan energi busur api maka akan didapatkan besar nilai insiden energi busur api berdasarkan standar IEEE 1584-2002 dan rekomendasi perlengkapan keselamatan kerja atau *personal protective equipment* (PPE) bagi para pekerja sesuai level energi berdasarkan standar NFPA 70E.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas pada tugas akhir ini adalah:

1. Menentukan pengaturan (*setting*) koordinasi proteksi OCR dan GFR pada level tegangan 10 kV dan 3kV.
2. mengetahui pengaturan (*setting*) rele diferensial pada bus U1-T 22,8 kV.
3. Menghitung besar insiden energi busur api (*arc flash*) pada kondisi pengaturan ulang (*resetting*) sesuai standar IEEE 1984-2002 .
4. Menentukan kategori insiden energi, alat pelindung diri dan jarak aman berdasarkan sesuai standar NFPA 70E 2015 pada kondisi pengaturan ulang (*resetting*).

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah:

1. Pengaturan (*setting*) rele OCR dan GFR hanya dilakukan pada tegangan menengah 10 kV dan 3kV.
2. Pengaturan (*setting*) rele differential hanya dilakukan pada bus tegangan 22,8 kV.
3. Penentuan nilai insiden energi busur api (*arc flash*) hanya pada switchgear tegangan menengah 10 kV dan 3kV.
4. Simulasi hanya dilakukan dengan perangkat lunak ETAP 12.6

1.4 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah:

1. Dapat mengetahui pengaturan (*setting*) rele OCR, GFR, dan diferensial yang tepat agar sistem proteksi terkoordinasi.
2. Dapat mengetahui besar level insiden energi busur api yang mungkin timbul saat terjadi gangguan, sehingga didapatkan rekomendasi besarnya kemungkinan bahaya dan alat pelindung diri bagi pekerja

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah:

1. Studi Literatur
Hal yang dilakukan pertama kali adalah pengumpulan data dan studi literatur untuk menambah pemahaman mengenai permasalahan yang dihadapi berupa analisis sistem tenaga, arus hubungan singkat, koordinasi proteksi dan busur api (*arc flash*) dari standar buku, jurnal dan tugas akhir.
2. Pengumpulan Data

Mencari dan mengumpulkan data secara langsung di PLTU TANJUNG JATI B JEPARA.

3. **Pemodelan Sistem dan Simulasi**

Pada tahap ini dilakukan pemodelan dari Diagram satu garis sistem, dan penentuan *typical* pada software ETAP. Setelah proses pengumpulan data dan pemodelan sistem dengan software, dilakukan simulasi untuk mendapatkan data-data yang dibutuhkan.

4. **Analisis Data**

Dari hasil simulasi didapatkan pengaturan (*setting*) koordinasi proteksi pengaturan awal (*existing*) dan baru, kemudian menghitung energi busur api (*arc flash*) yang terjadi dan dilakukan analisis untuk mengetahui kategori busur api (*arc flash*), *flash protection boundary* dan alat pelindung diri yang diperlukan.

5. **Penyusunan Buku Tugas Akhir**

Pada tahap ini akan dilakukan penyusunan laporan terkait hasil analisis dan kesimpulan tugas akhir yang telah dilakukan. Penyusunan buku tugas akhir dilakukan sebagai bentuk laporan tertulis dari proses dan hasil tugas akhir.

1.6 Manfaat

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

1. Digunakan sebagai rekomendasi untuk PLTU TANJUNG JATI B JEPARA dalam melakukan evaluasi pengaturan (*setting*) rele, penentuan jarak aman pekerja, serta pemilihan alat pelindung diri yang tepat.
2. Digunakan sebagai sumber referensi mengenai koordinasi proteksi mempertimbangkan insiden energi busur api (*arc flash*) dan pengaturan (*setting*) rele diferensial .

1.7 Sistematika Penulisan

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

1. **BAB 1 Pendahuluan**

Bab ini meliputi penjelasan 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 PLTU TANJUNG JATI B JEPARA**
Bab ini membahas tentang konfigurasi kelistrikan eksisting pada PLTU TANUNG JATI B JEPARA.
4. **BAB 4 Simulasi dan Analisis**
Bab ini membahas analisis koordinasi proteksi hasil simulasi serta insiden energi yang dihasilkan sesuai standar IEEE 1984-2002. Penentuan kategori insiden energi, jarak aman pekerja dan pemilihan alat pelindung diri yang tepat.
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 yang terjadi pada sistem tenaga Gangguan tersebut adalah ketidaknormalan dalam sistem tenaga listrik yang menyebabkan mengalirnya arus yang tidak seimbang dalam sistem tiga fasa. Berdasarkan asalnya, terdapat dua macam gangguan yaitu[2]:

1. Gangguan berasal dari dalam sistem[2]

Penyebab gangguan yang berasal dari dalam sistem antara lain disebabkan oleh kesalahan mekanis yaitu terjadi karena proses penuaan atau karena kerusakan material seperti kawat putus, isolator pecah, retaknya bearing, Pemasangan yang kurang baik, tegangan dan arus tidak normal pada sistem serta beban yang melebihi kapasitas sistem.

2. Gangguan berasal dari luar sistem[2]

Gangguan yang berasal dari luar sistem antara lain pengaruh cuaca seperti hujan, angin, serta surja petir, pengaruh lingkungan antara lain pohon tumbang, benda asing jatuh, dan juga akibat kecerobohan manusia. Pada gangguan surja petir dapat menyebabkan gangguan hubungan singkat karena tembus pada isolasi peralatan (breakdown).

Berdasarkan sifat gangguan, maka jenis gangguan pada sistem tenaga listrik dapat dibagi menjadi 2 yaitu[2]:

1. Gangguan sementara (*temporary*)[2]

Menunjukkan gangguan yang dapat hilang dengan sendirinya atau pada bagian yang terganggu diputus secara sesaat dari sumber tegangannya.

2. Gangguan permanen (*stationary*)[2]

Menunjukkan gangguan yang tidak hilang atau tetap ada apabila pemutus tenaga telah terbuka. Untuk menghilangkan gangguan permanen diperlukan tindakan perbaikan pada titik penyebab gangguan tersebut.

2.1.1 Gangguan Beban Lebih

Gangguan beban lebih terjadi ketika arus hubungan singkat lebih besar daripada arus nominal ($I > I_{NOM}$) atau konsumsi daya listrik melebihi daya listrik yang dihasilkan pada pembangkit[2].

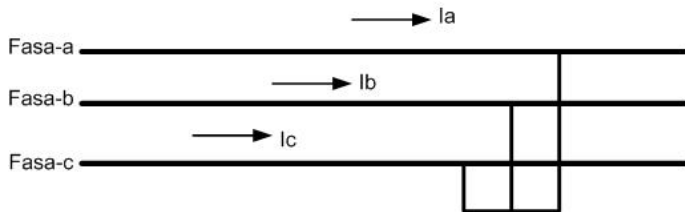
2.1.2 Gangguan Hubungan Singkat

Gangguan hubungan singkat pada sistem tenaga listrik dibagi menjadi dua yaitu simetri dan asimetri. Gangguan simetris yaitu gangguan hubungan singkat tiga fasa dan gangguan hubungan singkat tiga fasa ke tanah. Sedangkan gangguan hubungan singkat asimetris terdiri dari gangguan hubungan singkat antar fasa, gangguan hubungan singkat satu fasa ke tanah, gangguan hubungan singkat dua fasa ke tanah. Pada sistem tenaga listrik gangguan asimetris sering terjadi.

2.2 Perhitungan Arus Hubungan Singkat

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

a. Hubungan Singkat Tiga Fasa



Gambar 2.1 Gangguan Hubungan Singkat Tiga Fasa

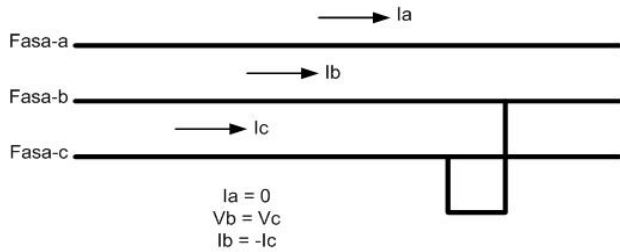
$$I_{sc}3\phi = \frac{V_{LN}}{Z_1} \dots\dots\dots(1)$$

Dimana

V_{LN} = Tegangan saat gangguan

Z_1 = Impedansi urutan positif.

b. Hubungan Singkat Antar Fasa



Gambar 2.2 Gangguan Hubungan Singkat Dua Fasa

$$I_{SC\ 2\phi} = \frac{V_{LL}}{Z_1 + Z_2} \dots\dots\dots (2)$$

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 :

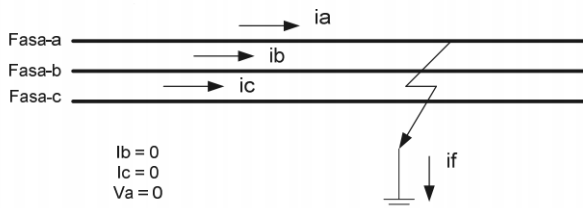
$$I_{SC\ 2\phi} = \frac{\sqrt{3} V_{LN}}{2X_1}$$

apabila mengacu pada persamaan maka :

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

$$I_{SC\ 2\phi} = 0,86 \times I_{SC\ 3\phi} \dots\dots\dots (3)$$

c. Hubungan Singkat Satu Fasa ke Tanah



Gambar 2.3 Gangguan Hubungan Singkat Satu Fasa Ke Tanah

$$I_{SC\ 1\phi - G} = \frac{V_{LL}/\sqrt{3}}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \dots\dots\dots (4)$$

Dengan NGR

$$I_{SC} 1\phi - G = \frac{V_{LL}/\sqrt{3}}{R_0} \dots\dots\dots(5)$$

Keterangan:

- $I_{SC1\phi}$ = arus hubungan singkat 1 fasa ke tanah
- V_{LL} = tegangan bus saat gangguan
- Z_1 = Impedansi urutan positif
- Z_2 = Impedansi urutan negatif
- Z_0 = Impedansi urutan nol
- R_0 = Resistansi NGR

2.3 Rele Arus Lebih

Rele arus lebih digunakan untuk mengamankan gangguan beban lebih (*overload*) dan gangguan hubungan singkat (*short circuit*). Prinsip kerja dari rele arus lebih adalah sebagai berikut:

- Jika $I_f > I_p$ rele bekerja
- Jika $I_f < I_p$ rele tidak bekerja.

Dimana:

I_f = arus *fault* yaitu arus gangguan.

I_p = arus *pickup* yaitu pengaturan (*setting*) arus pada rele.

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

$$1,05 \times I_{FLA} \leq I_{set} \leq 1,4 \times I_{FLA} \dots\dots\dots(6)$$

Persamaan untuk *high set* adalah sebagai berikut:

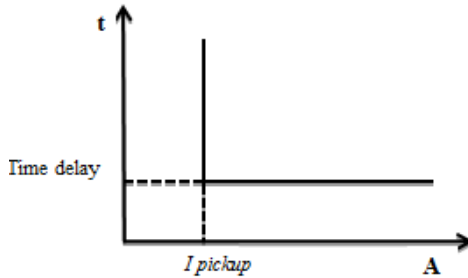
$$1,6 \times I_{FL} \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc \ min} \dots\dots\dots(7)$$

Rele arus lebih ini melindungi hampir semua bagian pada sistem tenaga listrik seperti transformator, motor, dan generator. Sesuai standar IEEE 242 mengenai koordinasi proteksi overcurrent relay, rele analog pada umumnya akan bekerja dengan waktu 0,3-0,4 detik. Sedangkan untuk rele digital berbasis mikroprosesor akan bekerja saat 0,2-0,3 detik[3]. Tujuan adanya standar waktu kerja rele adalah untuk memastikan zona backup akan bekerja apabila zona primer gagal bekerja. Tujuan lain adalah untuk menghindari terjadinya trip secara serentak

2.2.1 Rele Arus Lebih *Definite*

Tipe rele ini terdapat batas waktu pasti antara *pickup* dan *closing* kontak rele. Pengaturan rele ini tidak bergantung pada jumlah

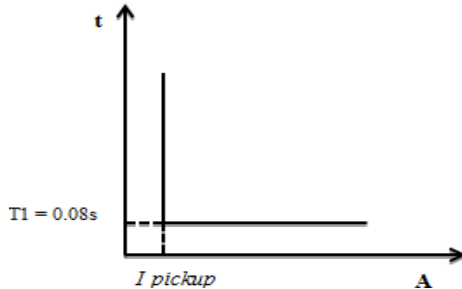
arus melalui koil rele. Kurva karakteristik rele arus lebih waktu tertentu ditunjukkan pada Gambar dibawah.



Gambar 2.4 Kurva Karakteristik Rele Arus Lebih *Definite*

2.2.2 Rele Arus Lebih *Instantaneous*

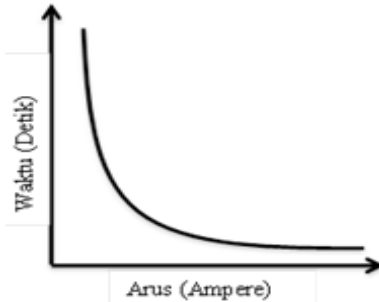
Rele arus lebih *instant* atau rele arus lebih seketika merupakan rele dimana tidak ada penundaan waktu yang disengaja. Meskipun dalam kenyataannya terdapat interval waktu singkat antara *pickup* dan *closing* rele, tidak ada waktu penundaan yang disengaja yang telah ditambahkan. Rele ini memiliki waktu pengoperasian kurang dari 0,1 detik. Rele arus lebih instan ini biasanya dikombinasikan dengan karakteristik rele arus lebih yang lain. Kurva karakteristik rele arus lebih waktu seketika ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Kurva Karakteristik Rele Arus Lebih *Instantaneous*

2.2.3 Rele Arus Lebih *Inverse*

Rele arus lebih *Inversee* 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 2.6 Kurva Karakteristik Rele Arus Lebih *Inversee*

Waktu kerja (*time dial*) pada rele pengaman arus lebih waktu terbalik digunakan untuk menentukan waktu rele untuk bekerja. Pengaturan (*setting*) waktu kerja (*time dial*) pada rele arus lebih tergantung pada masing – masing pabrikan dan nilai waktu kerja (*time dial*) rele arus lebih ini ditentukan dengan persamaan waktu tunda (*time delay*) rele arus lebih. Tabel 2.1 menunjukkan pengaturan (*setting*) waktu kerja (*time dial*) rele arus lebih

Tabel 2.1 Tabel Karakteristik Rele Arus Lebih *Inversee*

No	<i>Inversee</i> Tipe	Standar	Operation Formula
1	<i>Standart Inversee</i>	ANSI	$T_d = T_D * (0,0226 + \frac{0,0104}{M^{0,02-1}})$
2	<i>Inversee</i>	ANSI	$T_d = T_D * (0,18 + \frac{5,95}{M^2-1})$
3	<i>Very Inversee</i>	ANSI	$T_d = T_D * (0,0963 + \frac{3,88}{M^2-1})$
4	<i>Extremely Inversee</i>	ANSI	$T_d = T_D * (0,0352 + \frac{5,67}{M^2-1})$
5	<i>Short – time Inversee</i>	ANSI	$T_d = T_D * (0,00262 + \frac{0,00342}{M^{0,02-1}})$
6	<i>Standart Inversee</i>	IEC	$T_d = T_D * (\frac{0,14}{M^{0,02-1}})$
7	<i>Very Inversee</i>	IEC	$T_d = T_D * (\frac{13,5}{M-1})$
8	<i>Extremely Inversee</i>	IEC	$T_d = T_D * (\frac{80}{M^2-1})$
9	<i>Long - Time Inversee</i>	IEC	$T_d = T_D * (\frac{120}{M^2-1})$

Keterangan :

T_d = Waktu tunda (waktu tunda (*time delay*))

T_D = Waktu kerja (*time dial*)

$$M = \frac{I_{SC\ MAX}}{I_{set}} \dots\dots\dots (8)$$

2.4 Koordinasi Rele Arus Lebih

Rele pengamanan harus terkoordinasikan satu dengan yang lainnya berdasarkan karakteristik arus dan waktu. Pengaturan (*setting*) time koordinasi rele dimulai dari rele pada beban paling akhir atau bawah, dan menuju ke atas atau sumber tenaga listrik. Koordinasi rele pengamanan ini dengan melihat kurva karakteristik arus-waktu (TCC). Kurva tiap-tiap rele tidak boleh saling bersinggungan atau memotong. *Interval* waktu tiap-tiap rele tidak boleh terlalu lama. Berdasarkan IEEE std. 242, interval waktu antara rele utama dengan rele *back up* dapat dilihat pada Tabel 2.2 :

Tabel 2.2 *Interval* Waktu Antar Rele

Komponen	Rele Konvensional	Rele Digital Berbasis Mikroprosesor
Waktu Buka Circuit Breaker (2-5 Cycle)	0,08 detik	0,08 detik
<i>Relay Overtravel</i>	0,1 detik	0 detik
Toleransi Rele dan Error Pengaturan (<i>setting</i>)	0,17 detik	0,17 detik
Total Interval Waktu	0,35 detik	0,25 detik

Total *interval* waktu yang diperlukan rele digital adalah 0,2 – 0,3 detik dan untuk rele analog 0,3 – 0,4 detik.

2.5 Rele Gangguan Tanah

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

Pengaturan (*setting*) rele gangguan tanah digunakan I_{sc} L-G atau arus hubungan singkat satu fasa ke tanah, sebagai batas penentuan arus pengaturan (*setting*)-nya. Dengan persamaan sebagai berikut[2]:

$$5-10\% \times I_{sc\ L-G} \leq I_{set} \leq 50\% \times I_{sc\ L-G} \dots\dots\dots (9)$$

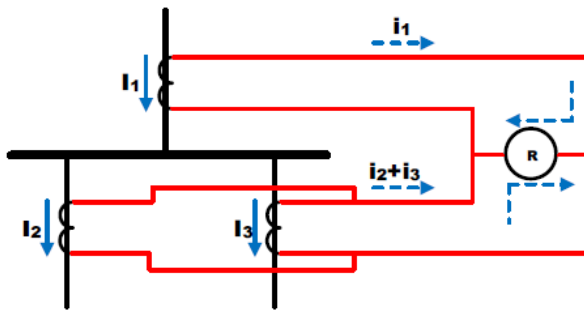
Pada sistem dengan menggunakan *Neutral Grounding Resistor* (NGR), nilai arus gangguan satu fasa ke tanah diasumsikan adalah nilai arus maksimum melalui NGR tersebut. Sehingga persamaannya sebagai berikut :

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

2.6 Relé Differential

Relé diferensial adalah relé yang bekerja berdasarkan hukum Kirchof II, dimana arus yang masuk sama dengan arus yang keluar pada sebuah titik daerah pengamanan yang dibatasi lebih dari satu CT (*Current Transformer*). Secara umum relé diferensial digunakan sebagai pengamanan belitan transformator, belitan generator, belitan motor, saluran kabel/pendek, dan busbar[2].

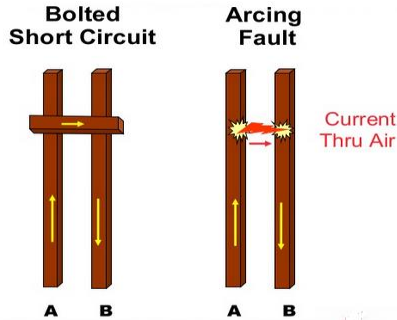
Berikut merupakan aliran arus pada relé differential saat kondisi normal.



Gambar 2.7 Aliran Arus Kondisi Normal Operasi

2.7 Busur api (*arc flash*)

Definisi dari busur api adalah pelepasan energi panas yang sangat tinggi sehingga mengakibatkan *arc fault* ataupun *bolted fault*. *Arc fault* dan *bolted fault* memiliki makna yang berbeda, *arc fault* adalah arus gangguan yang mengalir melalui udara antara konduktor satu dengan konduktor lainnya atau konduktor dengan tanah[4]. sedangkan *bolted fault* menggunakan perantara konduktor sebagai jalur arus gangguannya. Gambar 2.10 menunjukkan perbedaan *arc fault* dengan *bolted fault* berdasarkan referensi[5].



Gambar 2.8 *Arching Fault dan Bolted Fault*

Energi yang dihasilkan busur api (*arc flash*) linier dengan arus hubungan singkat yang terjadi, serta total waktu kerja peralatan pengaman memutus gangguan. Energi panas yang ditimbulkan oleh busur api (*arc flash*) dapat mencapai 35.000 °C atau lebih besar 3.5 kali lipat dari energi panas matahari sehingga perlu untuk digunakan alat pelindung diri[7].

2.7.1 Perhitungan Insiden Energi Busur api (*arc flash*) Standar IEEE 1584-2002

Untuk Pengaplikasian pada sistem dibawah 1000V menggunakan persamaan IEEE 1584-2002 sebagai berikut.

$$l_g I_a = K + 0,662 l_g I_{bf} + 0,0966V + 0,000526G + 0,5588V(I_g I_{bf}) - 0,00304G(l_g I_{bf}) \dots\dots\dots (11)$$

Untuk pengaplikasian pada sistem diatas 1000V menggunakan persamaan berikut.

$$l_g I_a = 0,00402 + 0,983 l_g I_{bf} \dots\dots\dots (12)$$

Atau

Dimana:

$$l_g = \log_{10}$$

I_a = Arus busur (*arcing current*) (kA)

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

I_{bf} = bolted fault current untuk gangguan tiga fasa (*Symetrical RMS*)(kA)

V = Tegangan Sistem (kV)

G = Gap antar konduktor (mm)

Untuk mendapatkan nilai gap atau jarak antar konduktor dari jenis peralatan dapat mengikuti standar IEEE 1584 – 2002 yang tertera pada table dibawah.

Tabel 2. 3 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* insiden energi. Besar *normally* insiden energi adalah

$$\lg E_n = K_1 + K_2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011G \dots\dots\dots(13)$$

kemudian

$$E_n = 10^{\lg E_n} \dots\dots\dots(14)$$

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 pentanahan
- G = Gap antar konduktor(mm)

Setelah nilai E_n didapatkan, untuk menghitung besar insiden energi E digunakan persamaan berikut :

$$E = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \dots\dots\dots(15)$$

Dimana

- E = insiden energi(J/cm^2)
- C_f = faktor pengali
1,0 untuk tegangan diatas 1kV, dan
1,5 untuk tegangan dibawah 1kV
- E_n = insiden energinormalized
- t = waktu *arching* (detik) yang dapat dilihat pada Tabel
- D = jarak kerja (mm) yang dapat dilihat pada Tabel 2.4
- X = jarak eksponen yang dapat dilihat pada Tabel 2.4

Parameter yang digunakan untuk menghitung insiden energidibedakan berdasarkan level tegangan peralatan dan jenis peralatan. Parameter – parameter untuk menghitung insiden energitertera pada tabel berikut.

Tabel 2. 4 Parameter Jarak Faktor x

Tegangan Sistem (kV)	Jenis Peralatan	Typical gap between conductor(mm)	Jarak faktor x
0,208-1	Open Air	10-40	2,000
	Switchgear	32	1,473
	MCC dan Panel	25	1,641
	Cable	13	2,000
>1-5	Open air	102	2,000
	Switchgear	13-102	0,973
	Cable	13	2,000
>5-15	Open air	13-153	2,000
	Switchgear	153	0,973
	Cable	13	2,000

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].

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \dots\dots\dots (16)$$

Atau

$$D_B = \left[4,184 \frac{E}{E_B} D^x \right]^{\frac{1}{x}} \dots\dots\dots (17)$$

Dimana:

- D_B =Jarak batas dari titik arcing(mm)
- C_f =Faktor Perhitungan
1.0 untuk tegangan diatas 1 kV
1.5 untuk tegangan dibawah 1,5 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($5 J / cm^2$ saat tanpa perlindungan
 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 energiserta 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 energiditunjukkan pada tabel 2.5 berikut.

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

Kategori PPE	Minimum Insiden Energi	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.

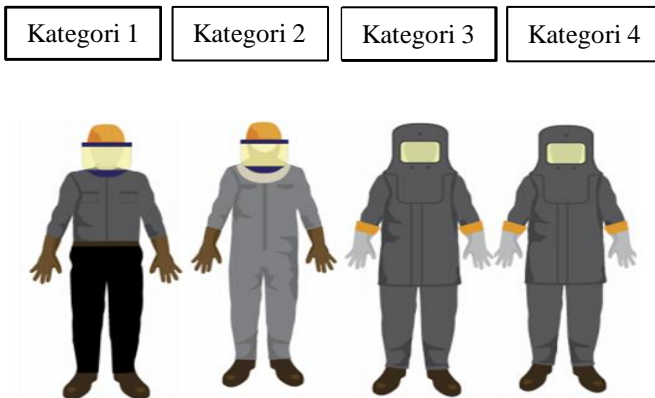
Tabel 2. 5(Lanjutan) Kategori PPE (*Personal Protective Equipment*)

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

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

Kategori PPE	Minimum Insiden Energi	Alat Pelindung Diri/ PPE	
		Pakaian	Peralatan Pelindung
4	40	Kemeja lengan panjang dan Celana dengan arc rating Jaket setelan flash arc dengan pengenalan busur Celana arc suit flash, Hood suit busur api (<i>arc flash</i>) dengan nilai arc rating Sarung tangan dengan 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 2.9 PPE Berdasarkan Kategori Busur api (*arc flash*)

BAB III

SISTEM KELISTRIKAN PT PLTU TANJUNGGATI B JEPARA

3.1 Sistem Kelistrikan

PT PLTU Tanjung Jati B merupakan pembangkit listrik bertenaga uap dengan kapasitas 2 x 660 MW Net. Bahan bakar yang digunakan untuk PLTU Tanjung Jati B adalah batu bara yang akan didatangkan dari Kalimantan. Energi yang diproduksi generator pada PLTU Tanjung jati B disalurkan ke gardu induk Ungaran melalui saluran tegangan tinggi 150 kV.

Untuk menjalankan proses produksi energi listrik yang optimal, PLTU Tanjung Jati B membutuhkan energi listrik untuk kebutuhan peralatan listrik pada gedung – gedung yang terdapat pada kawasan PLTU Tanjung Jati B. Untuk memenuhi energi listrik pada PLTU Tanjung Jati B, sistem kelistrikan pada PLTU Tanjung Jati B disuplai dari unit transformator (UT) untuk menurunkan tegangan dari generator ke beban sesuai level tegangan yang dibutuhkan beban.

3.2 Data Peralatan

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

3.2.1 Data Generator

Pada PLTU Tanjung Jati B terdapat dua generator dengan kapasitas masing – masing unit sebesar 802 MW yang terhubungan ke *grid* PLN 500 kV. Data dari generator PLTU Tanjung Jati B dan *grid* PLN diperlihatkan pada tabel 3.1 berikut

Tabel 3. 1 Data Generator

No	ID	Daya (MW)	Tegangan (kV)	FLA (Amp)	Cos ϕ
1	Gen 1	802	22,8 kV	10698	0.9
2	Gen 2	802	22,8 kV	10698	0.9

3.2.2 Data Transformator

Sistem kelistrikan tegangan menengah pada terdapat PLTU Tanjung Jati B terdapat tiga jenis transformator yaitu Generator Trafo

(GT) , Unit Trafo (UT) dan Trafo Unit Board. Generator Trafo (GT) digunakan untuk menaikkan tegangan dari generator menuju grid pln 500 kV, Unit Trafo (UT) digunakan untuk menurunkan tegangan dari generator menuju beban 10kV, sedangkan Trafo Unit Board digunakan untuk menurunkan tegangan dari UT menuju beban 3kV. Tabel 3.2 menunjukkan data transformator pada sistem kelistrikan PLTU Tanjung Jati B. Data Transformator dapat dilihat pada tabel 3.2

Tabel 3. 2 Data Transformator

No	ID	Daya (MVA)	Tegangan Prim/Sek (kV)	FLA Prim/Sek (A)
1	UT 1	54	22,8 / 10	1155/2291
2	UT 2	54	22,8 / 10	1155/2291
3	GT 1	786	22,8/500	19903/907.6
4	GT 2	786	22,8/500	19903/907.6
4	3KV UNIT BOARD	6	10/3	346.4/1100
5	380 V UNIT BOARD	2,5	10/0,4	144,3/3798
6	PRECIP BOARD	1,75	10/0,4	141,5/3722
7	CHLORINATION SYSTEM	2	10/0,4	115,5/3039
6	STATION SERVICE BOARD	2,5	10/0,4	144,3/3798
7	WATER TREATMENT PLANT	1,25	10/0,4	72,17
8	ASH PLANT BOARD	0,75	10/0,4	1899
9	CW PUMP HOUSE	1	10/0,4	57,74/1519
10	JETTY SWITCHING CENTER	5,333	10/0,4	238,68/6280,1
11	PROD BUILDING	1	10/0,4	57,74/192,5
12	CRUSHER BUILDING	3,75	10/3,15	
13	FGD BULIDING	6	10/3,15	433/1443
14	NORTH COAL YARD MCC	1	10/0,4	76,96/2025

3.2.3 Data Beban

Beban pada sistem kelistrikan tegangan menengah PLTU Tanjung Jati B sebagian besar terdiri dari motor induksi yang berguna untuk proses produksi energi listrik. Beban tegangan menengah pada PLTU Tanjung Jati B dijelaskan pada tabel 3.3 berikut.

Tabel 3.3 Data Beban

Switchboard 10kV Unit Board 1A				
No	ID	Daya (kW)	Tegangan (kV)	FLA (A)
1	ID FAN 1A	4525	10	320
2	FD FAN 1A	1176	10	87,1
3	PA FAN 1A	2318	10	160
4	CW PUMP 1A	2950	10	233
5	CE PUMP 1A	1500	10	107
6	BF PUMP 1A	10000	10	633
Switchboard 10kV Unit Board 1B				
1	ID FAN 1B	4525	10	320
2	FD FAN 1B	1176	10	87,1
3	PA FAN 1B	2318	10	160
4	CW PUMP 1B	2950	10	233
5	CE PUMP 1B	1500	10	107
6	BF PUMP 1B	10000	10	633
7	BF PUMP 1C-B	10000	10	633
Switchboard 10kV Unit Board 2A				
1	ID FAN 2A	4525	10	320
2	FD FAN 2A	1176	10	87,1
3	PA FAN 2A	2318	10	160
4	CW PUMP 2A	2950	10	233
5	CE PUMP 2A	1500	10	107
6	BF PUMP 2A	10000	10	633
Switchboard 10kV Unit Board 2B				
1	ID FAN 2B	4525	10	320
2	FD FAN 2B	1176	10	87,1
3	PA FAN 2B	2318	10	160
4	CW PUMP 2B	2950	10	233
5	CE PUMP 2B	1500	10	107
6	BF PUMP 2B	10000	10	633
7	BF PUMP 2C-B	10000	10	633

Tabel 3.4 (Lanjutan) Data Beban

Switchboard 3kV Unit Board 1A				
No	ID	Daya (kW)	Tegangan (kV)	FLA (A)
1	MILL 1A, B, C	597	3	153
2	HP FEED WATER PUMP A	800	3	172
3	SEA WATER BOOSTER PUMP	160	3	39
4	CLOSED CYCLE COOLING	510	3	119
5	SERVICE AIR COMPRESSOR	250	3	59
Switchboard 3kV Unit Board 1B				
1	MILL 1D, E, F	597	3	153
2	FIRE FIGHTING	337,5	3	85
3	SERVICE AIR COMPRESSOR	250	3	59
4	SEA WATER BOOSTER PUMP	160	3	39
5	CLOSED CYCLE COOLING	510	3	119
6	INSTRUMENT AIR COMPRESSOR	355	3	85
Switchboard 3kV Unit Board 2A				
1	MILL 2A, B, C	597	3	153
2	HP FEED WATER PUMP A	800	3	172
3	SEA WATER BOOSTER PUMP	160	3	39
4	CLOSED CYCLE COOLING	510	3	119
5	SERVICE AIR COMPRESSOR	250	3	59
Switchboard 3kV Unit Board 2B				
1	MILL 2D, E, F	597	3	153
2	HP FEED WATER PUMP	800	3	172
3	INSTRUMENT AIR COMPRESSOR	355	3	85
4	SEA WATER BOOSTER PUMP	160	3	39
5	CLOSED CYCLE COOLING	510	3	119

BAB IV

HASIL DAN SIMULASI

4.1 Permodelan Sistem Kelistrikan

Permodelan sistem kelistrikan pada PLTU Tanjung Jati B Jepara dengan menggambar ulang diagram satu garis (*single line diagram*) sistem ke dalam ETAP 12.6. Langkah pertama yang dilakukan untuk membuat diagram satu garis tersebut adalah pengumpulan data yang meliputi data kabel, transformator, generator, motor, bus, relay eksisting dan sistem pentanahan.

Setelah menggambar diagram satu garis (*single line diagram*) sistem kelistrikan dan memasukkan parameter – parameter yang telah ada, dilakukan 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

Dalam melakukan koordinasi proteksi rele arus lebih diperlukan pemilihan tipikal untuk memudahkan dalam melakukan pengaturan (*setting*) pada rele. Dalam pemilihan tipikal dipilih yang mewakili koordinasi pada sistem kelistrikan PLTU Tanjung Jati B Jepara. Berikut merupakan tipikal koordinasi yang ditampilkan dalam tugas akhir ini, antara lain :

- 1) Tipikal 1A: Rele Incoming 2A, Rele 3Kv UB 2A, Rele Incoming 3Kv 2A, Rele Mill 2A
- 2) Tipikal 1B: Rele Incoming 2B, Rele 3Kv UB 2B, Rele Incoming 3Kv 2B, Rele Mill 2B
- 3) Tipikal 1C: Rele Incoming 1A, Rele 3Kv UB 1A, Rele Incoming 3Kv 1A, Rele Mill 1A
- 4) Tipikal 1D: Rele Incoming 1B, Rele 3Kv UB 2B, Rele Incoming 3Kv 1B, Rele Mill 1B
- 5) Tipikal 2A: Rele Incoming 2A, Rele Tie 2A, Rele FGD A
- 6) Tipikal 2B: Rele Incoming 2B, Rele Tie 2B, Rele FGD B
- 7) Tipikal 3A: Rele Incoming 2A, Rele CE Fan 2A
- 8) Tipikal 3B: Rele Incoming 2A, Rele CE Fan 2B
- 9) Tipikal 3C: Rele Incoming 2A, Rele CE Fan 1A
- 10) Tipikal 3D: Rele Incoming 2A, Rele CE Fan 2B

- 11) Tipikal 4A: Rele Incoming 2A, Rele 380V UB 2A
- 12) Tipikal 4B: Rele Incoming 2A, Rele 380V UB 2B
- 13) Tipikal 4C: Rele Incoming 2A, Rele 380V UB 1A
- 14) Tipikal 4D: Rele Incoming 2A, Rele 380V UB 1B

Tipikal A, B, C, dan D 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 Hubungan Singkat

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

4.3.1 Arus Hubungan Singkat Minimum

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

Tabel 4. 1 Data Hubungan Singkat Minimum

No	ID Bus	kV	Isc Min 30 Cycle (kA)
1	10KvUnit Board 2A	10	18,71
2	3KvUnit Board 2B	3	10,34
3	Station Board A	10	18,71

4.3.2 Arus Hubungan Singkat Maksimum

Hubungan singkat maksimum adalah hubungan singkat 3 fasa pada saat 4 *cycle*. Hubungan singkat maksimum 4 *cycle* digunakan untuk pengaturan (*setting*) rele dengan pengaturan (*setting*) kelambatan waktu 0.08-0.5s. Hubungan singkat maksimum digunakan sebagai batasan arus hubungan singkat terbesar yang mungkin terjadi. Dalam

mencari hubungan singkat maksimum diambil dari arus kontribusi yang menuju ke bus, data hubungan singkat maksimum dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4. 2 Data Hubungan Singkat Maksimum

No	ID Bus	kV	Isc Max 4 Cycle (kA)
1	10KvUnit Board 2A	10	28,66
2	3KvUnit Board 2B	3	14,71
3	Station Board A	10	28,66

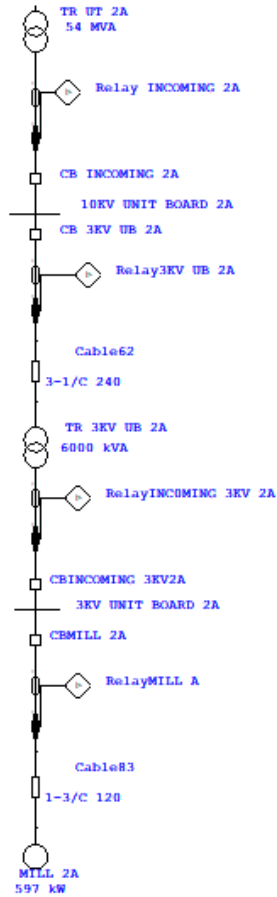
4.4 Koordinasi Rele Arus Lebih

Pada koordinasi rele arus lebih gangguan fasa akan dilakukan penentuan arus *pickup* serta waktu kerja (*time dial*). Penentuan pengaturan (*setting*) tersebut dibedakan kedalam 6 tipikal.

Setelah menentukan pengaturan (*setting*) *pick up* dan waktu kerja (*time dial*) langkah selanjutnya yaitu melakukan plot kurva TCC pada ETAP 12.6.0 untuk mengevaluasi pengaturan (*setting*) koordinasi yang dilakukan.

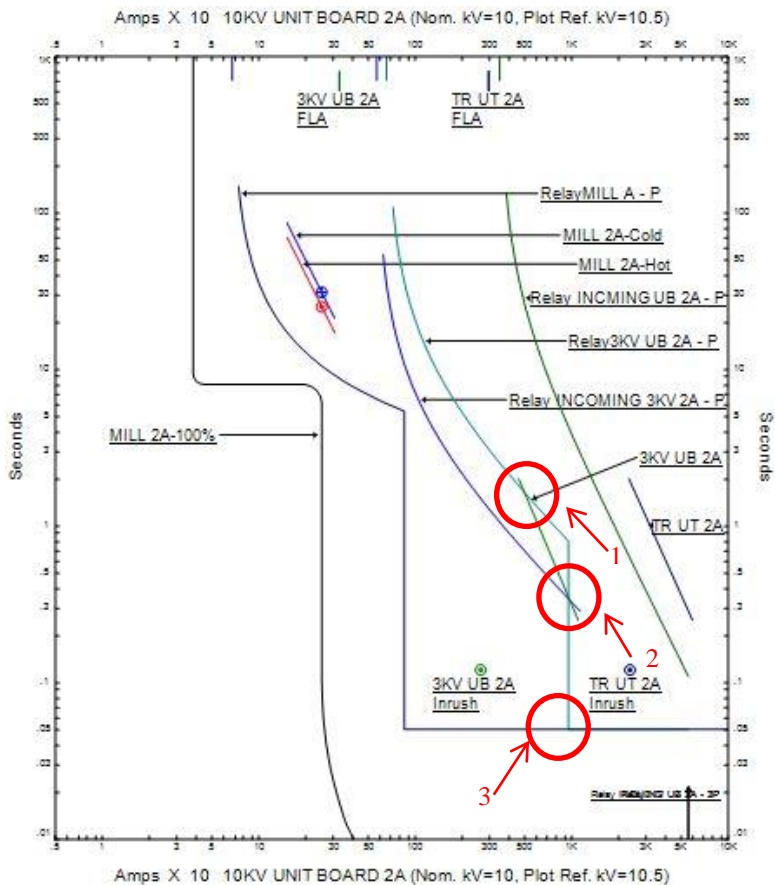
4.4.1 Tipikal 1A, 1B, 1C, 1D

Sebelum melakukan pengaturan ulang (*resetting*) koordinasi proteksi, maka diperlukan simulasi dari sistem pengaturan awal (*existing*) tipikal 1A, 1B, 1C, dan 1D untuk mengetahui keadaan mula sistem. Pada tipikal 1A, 1B, 1C, dan 1D memiliki spesifikasi beban, level tegangan yang sama sehingga pengaturan (*setting*) koordinasi proteksi identik. Berikut gambar 4.1 merupakan diagram satu garis dari tipikal 1A dan 1B.



Gambar 4.1 Diagram satu garis Tipikal 1A, 1B, 1C, 1D

Berikut merupakan hasil dari plot TCC Tipikal 1A, 1B, 1C, dan 1D.



Gambar 4.2 Plot TCC Pengaturan awal (*existing*) Tipikal 1A, 1B, 1C, dan 1D

Dari hasil plot kurva koordinasi rele pada tipikal 1A, 1B, 1C, dan 1D pengaturan awal (*existing*) terdapat kesalahan yang akan menyebabkan koordinasi proteksi tidak bekerja dengan baik. Pada lingkaran 1, rele 3KV UB 2A bersinggungan terhadap *damage* trafo TR 3KV UB 2A. Pada lingkaran 2 rele 3KV UB 2A memotong kurva rele INCOMING 3KV 2A dan *damage* trafo. Pada lingkaran 3 waktu tunda

kurva IOC untuk rele INCOMING 3KV 2A dan rele MILL 2A terlalu kecil yaitu 0,05 .

Dari hasil analisis terhadap koordinasi existing tipikal 1A, 1B, 1C, dan 1D, maka diperlukan pengaturan ulang (*resetting*). Perhitungan pengaturan ulang (*resetting*) sebagai berikut.

a. Rele MILL-A

Manufaktur	: TOSHIBA
Model	: MCR 24
Kurva	: IEC Standar <i>Inversee</i>
Rasio CT	: 300/5
Isc min	: 9,75 kA
Isc max	: 14,42 kA
FLA	: 130 A

Batas *Time Overcurrent*

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

$$1,05 \times 130 < I_{set} < 1,4 \times 130$$

$$136,5 < I_{set} < 182$$

Dipilih Iset = 143 A

$$Tap = \frac{I_{set}}{CT \text{ Primary}} = \frac{143}{300/5} = 2,38$$

Waktu kerja (*time dial*)

Dipilih waktu operasi (t_d) = 0,1 detik

$$t_d = TD \times \left(\frac{K}{\left(\frac{I}{I_{set}} \right)^\alpha - 1} + L \right)$$

$$TD = \frac{t_d \times \left[\left(\frac{I}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TD = \frac{t_d \times \left[\left(\frac{I_{sc \text{ max Bus}}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TD = \frac{0,1 \times \left[\left(\frac{14420}{143} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

TD minimum = 0.069

Maka, dipilih pengaturan (*setting*) TD sebesar 2,2

Batas *Instaneous*

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

$$1,6 \times 130 < I_{set} < 0,8 \times 9750$$

$$208 < I_{set} < 7800$$

$$\text{Dipilih Iset} = 1170 \text{ A}$$

$$Tap = \frac{I_{set}}{CT \text{ Primary}} = \frac{1170}{300/5} = 19,5 \text{ A}$$

Waktu tunda (*time delay*)

Dipilih waktu tunda (*time delay*) = 0,1 detik

b. Rele INCOMING 3KV 2A

Manufaktur : TOSHIBA

Model : MCR 24

Kurva : IEC *Very Inverse*

Rasio CT : 2000/5

Isc min : 10,34 kA

Isc max : 12,46 kA

FLA : 1100 A

Batas *Time Overcurrent*

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

$$1,05 \times 1100 < I_{set} < 1,4 \times 1100$$

$$1155 < I_{set} < 1540$$

$$\text{Dipilih Iset} = 1210 \text{ A}$$

$$Tap = \frac{I_{set}}{CT \text{ Primary}} = \frac{1210}{2000/5} = 3,03$$

Waktu kerja (*time dial*)

Dipilih waktu operasi (t_d) = 0,3 detik

$$t_d = TD \times \left(\frac{K}{\left(\frac{I}{I_{set}}\right)^\alpha - 1} + L \right)$$

$$TD = \frac{t_d \times \left[\left(\frac{I}{I_{set}}\right)^1 - 1 \right]}{13,5}$$

$$TD = \frac{t_d \times \left[\left(\frac{I_{sc \max \text{ Bus}}}{I_{set}} \right)^1 - 1 \right]}{13.5}$$

$$TD = \frac{0,3 \times \left[\left(\frac{12460}{1210} \right)^1 - 1 \right]}{13.5}$$

TD minimum = 0,38

Maka, dipilih pengaturan (*setting*) TD sebesar 0,38

c. Rele 3KV UB 2A

Manufaktur	: TOSHIBA
Model	: MCR 24
Kurva	: IEC <i>Very Inverse</i>
Rasio CT	: 600/5
Isc min	: 18,43 kA
Isc max	: 28,01 A
FLA	: 346 A

Batas *Time Overcurrent*

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

$$1,05 \times 346 < I_{set} < 1,4 \times 346$$

$$363.72 < I_{set} < 485$$

Dipilih Iset = 381 A

$$Tap = \frac{I_{set}}{CT \text{ Primary}} = \frac{381}{600/5} = 3.18$$

Waktu kerja (*time dial*)

Dipilih waktu operasi (t_d) = 0,5 detik

$$t_d = TD \times \left(\frac{K}{\left(\frac{I}{I_{set}} \right)^\alpha - 1} + L \right)$$

$$TD = \frac{t_d \times \left[\left(\frac{I}{I_{set}} \right)^1 - 1 \right]}{13.5}$$

$$TD = \frac{t_d \times \left[\left(\frac{I_{sc \max \text{ Bus}}}{I_{set}} \right)^1 - 1 \right]}{13.5}$$

$$TD = \frac{0,5 \times \left[\left(\frac{28010}{381} \right)^1 - 1 \right]}{13.5}$$

TD minimum = 0.53

Maka, dipilih pengaturan (*setting*) TD sebesar 0,53

Batas *Instantaneous*

$$1,6 \times FLA < I_{set} < 0,8 \times I_{sc \min}$$

$$1,6 \times 346 < I_{set} < 0,8 \times 18430$$

$$554,24 < I_{set} < 14744$$

Dipilih Iset = 7905 A

$$Tap = \frac{I_{set}}{CT \text{ Primary}} = \frac{7905}{600/5} = 65,88$$

Waktu tunda (*time delay*)

Dipilih waktu tunda (*time delay*) = 0,1 detik

d. Rele INCOMING 2A

Manufaktur : TOSHIBA

Model : MCR 24

Kurva : IEC *Extremely Inverse*

Rasio CT : 3500/5

Isc min : 18,71 kA

Isc max : 21,68A

FLA : 2969 A

Batas *Time Overcurrent*

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

$$1,05 \times 2969 < I_{set} < 1,4 \times 2969$$

$$3117,45 < I_{set} < 4157$$

Dipilih Iset = 3265,9 A

$$Tap = \frac{I_{set}}{CT \text{ Primary}} = \frac{3265,9}{3500/5} = 4,67$$

Waktu kerja (*time dial*)

Dipilih waktu operasi (t_d) = 0,7 detik

$$t_d = TD \times \left(\frac{K}{\left(\frac{I}{I_{set}}\right)^\alpha - 1} + L \right)$$

$$TD = \frac{t_d \times \left[\left(\frac{I}{I_{set}}\right)^2 - 1 \right]}{80}$$

$$TD = \frac{t_d \times \left[\left(\frac{I_{sc \max \text{ Bus}}}{I_{set}}\right)^2 - 1 \right]}{80}$$

$$TD = \frac{t_d \times \left[\left(\frac{21680}{3265,9}\right)^{0,02} - 1 \right]}{80}$$

$$TD \text{ minimum} = 0,37$$

Maka, dipilih pengaturan (*setting*) TD sebesar 0,37

Batas *Instantaneous*

$$1,6 \times FLA < I_{set} < 0,8 \times I_{sc \min}$$

$$1,6 \times 2969 < I_{set} < 0,8 \times 18710$$

$$4750,4 < I_{set} < 14968$$

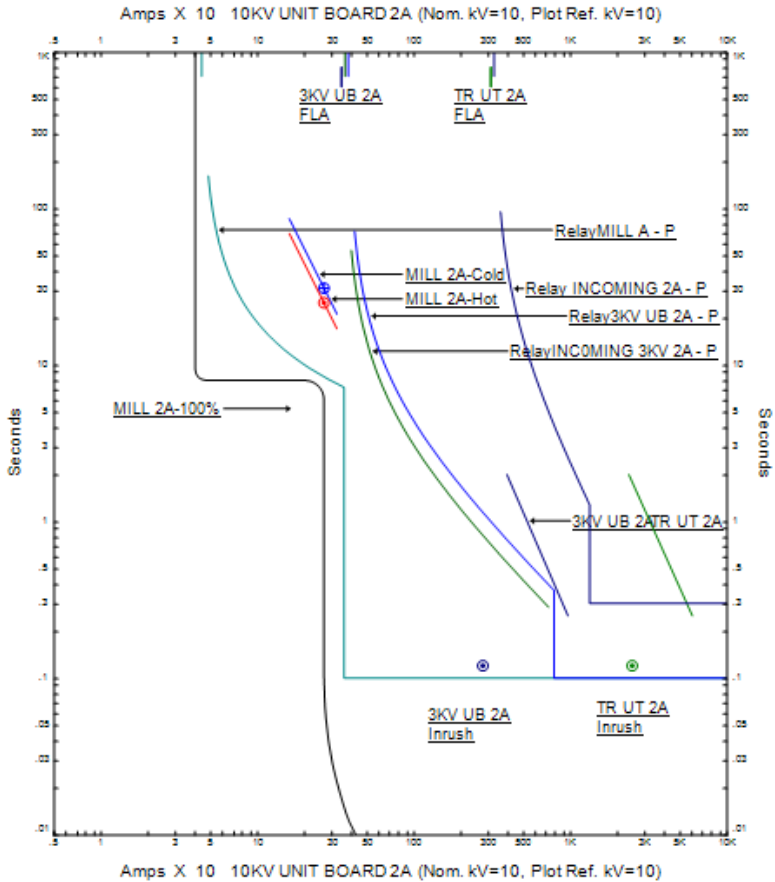
$$\text{Dipilih } I_{set} = 13360 \text{ A}$$

$$Tap = \frac{I_{set}}{CT \text{ Primary}} = \frac{13360}{3500/5} = 19,1$$

Waktu tunda (*time delay*)

Dipilih waktu tunda (*time delay*) = 0,3 detik

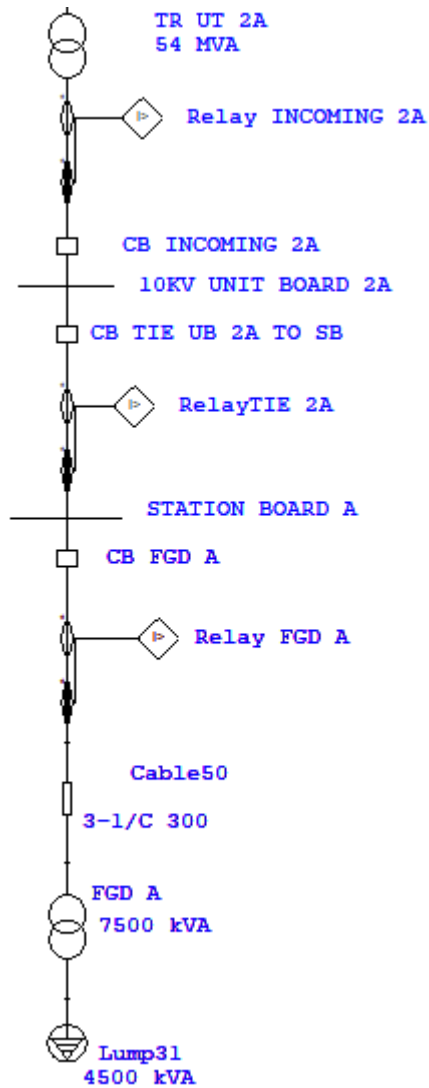
Gambar 4.3 menunjukkan plot kurva TCC hasil perhitungan dan pengaturan ulang (*resetting*) koordinasi proteksi tipikal 1.



Gambar 4.3 Plot TCC Tipikal 1A, 1B, 1C, dan 1D Pengaturan ulang (*resetting*)

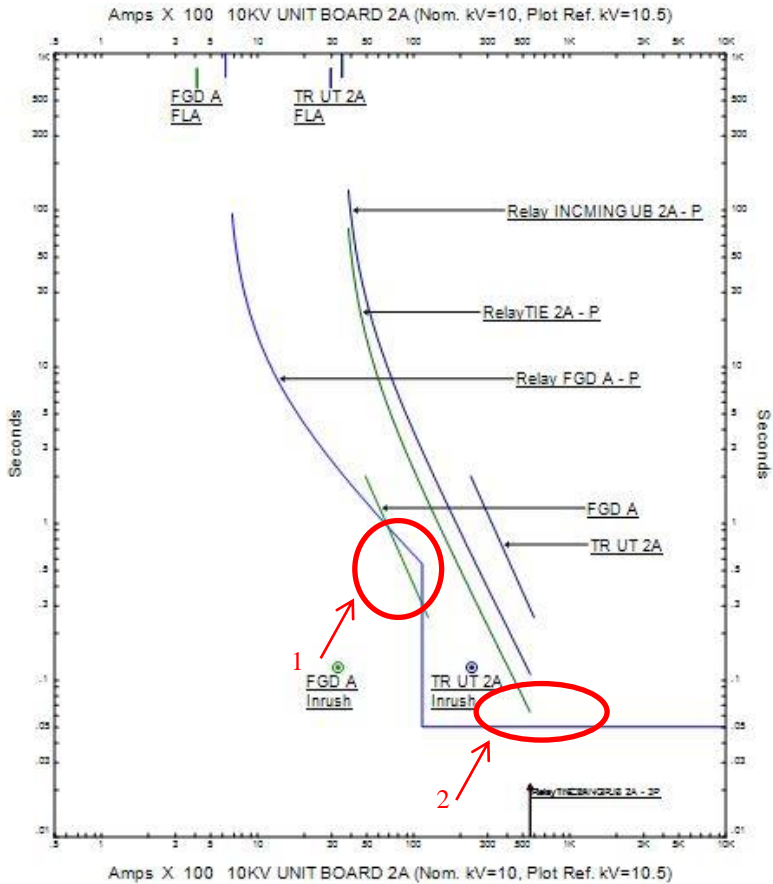
4.4.2 Tipikal 2A dan 2B

Sebelum melakukan pengaturan ulang (*resetting*) koordinasi proteksi, maka diperlukan simulasi dari sistem pengaturan awal (*existing*) tipikal 2A dan 2B untuk mengetahui keadaan mula sistem. Pada tipikal 2A dan tipikal 2B memiliki spesifikasi beban, level tegangan yang sama sehingga pengaturan (*setting*) koordinasi proteksi identik. Berikut merupakan diagram satu garis dari tipikal 2A dan 2B.



Gambar 4.4 Diagram satu garis Tipkal 2A dan 2B

Berikut merupakan hasil dari plot TCC Tipikal 2A dan 2B.



Gambar 4.5 Plot TCC Tipikal 2A Pengaturan awal (*existing*)

Dari hasil plot kurva koordinasi rele pada tipikal 2A dan 2B pengaturan awal (*existing*) terdapat kesalahan yang akan menyebabkan koordinasi proteksi tidak bekerja dengan baik. Pada lingkaran 1, rele FGD A memotong *damage* trafo. Sedangkan Pada lingkaran 2 waktu kerja kurva IOC pada rele FGD A terlalu singkat yaitu 0,05s.

Dari hasil analisis terhadap koordinasi *existing* tipikal 2A dan 2B, maka diperlukan pengaturan ulang (*resetting*). Perhitungan pengaturan ulang (*resetting*) sebagai berikut.

a. Rele FGD-A

Manufaktur	: TOSHIBA
Model	: MCR 24
Kurva	: IEC <i>Very Inverse</i>
Rasio CT	: 600/5
Isc min	: 15.97 kA
Isc max	: 27.9 kA
FLA	: 433 A

Batas *Time Overcurrent*

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

$$1,05 \times 433 < I_{\text{set}} < 1,4 \times 433$$

$$454,65 < I_{\text{set}} < 606,2$$

$$\text{Dipilih Iset} = 476,3 \text{ A}$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{\text{set}}}{\text{CT Primary}} = \frac{476,3}{600/5} = 3,97$$

Waktu kerja (*time dial*)

Dipilih waktu operasi (t_d) = 0,1 detik

$$t_d = \text{TD} \times \left(\frac{K}{\left(\frac{I}{I_{\text{set}}}\right)^\alpha - 1} + L \right)$$

$$\text{TD} = \frac{t_d \times \left[\left(\frac{I}{I_{\text{set}}}\right)^1 - 1 \right]}{13,5}$$

$$\text{TD} = \frac{t_d \times \left[\left(\frac{\text{Isc max Bus}}{I_{\text{set}}}\right)^1 - 1 \right]}{13,5}$$

$$\text{TD} = \frac{t_d \times \left[\left(\frac{27900}{476,3}\right)^1 - 1 \right]}{13,5}$$

TD minimum = 0.43

Maka, dipilih pengaturan (*setting*) TD sebesar 0,43

Batas *Instaneous*

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

$$1,6 \times 433 < I_{set} < 0,8 \times 15970$$

$$692,8 < I_{set} < 12776$$

$$\text{Dipilih Iset} = 4330 \text{ A}$$

$$Tap = \frac{I_{set}}{CT \text{ Primary}} = \frac{5509,2}{600/5} = 45,91 \text{ A}$$

Waktu tunda (*time delay*)

$$\text{Dipilih waktu tunda (time delay)} = 0,1 \text{ detik}$$

b. Rele TIE 2A

Manufaktur : TOSHIBA

Model : MCR 24

Kurva : IEC *Extremely Inverse*

Rasio CT : 3500/5

Isc min : 18.71 kA

Isc max : 26.64 kA

FLA : 1447,49 A

Batas *Time Overcurrent*

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

$$1,05 \times 1447,49 < I_{set} < 1,4 \times 1447,49$$

$$1519,87 < I_{set} < 2026,48$$

$$\text{Dipilih Iset} = 1592,24 \text{ A}$$

$$Tap = \frac{I_{set}}{CT \text{ Primary}} = \frac{1592,24}{3500/5} = 2,27$$

Waktu kerja (*time dial*)

Dipilih waktu operasi (t_d) = 0,1 detik

$$t_d = TD \times \left(\frac{K}{\left(\frac{I}{I_{Set}}\right)^{\alpha} - 1} + L \right)$$

$$TD = \frac{t_d \times \left[\left(\frac{I}{I_{Set}}\right)^2 - 1 \right]}{80}$$

$$TD = \frac{t_d \times \left[\left(\frac{I_{sc \max \text{ Bus}}}{I_{set}} \right)^2 - 1 \right]}{80}$$

$$TD = \frac{t_d \times \left[\left(\frac{27900}{476,3} \right)^2 - 1 \right]}{80}$$

TD minimum = 0.35

Maka, dipilih pengaturan (*setting*) TD sebesar 0,5

Batas *Instaneous*

$$1,6 \times FLA < I_{set} < 0,8 \times I_{sc \min}$$

$$1,6 \times 1447,49 < I_{set} < 0,8 \times 18710$$

$$2315,9 < I_{set} < 14968$$

$$\text{Dipilih } I_{set} = 14474 \text{ A}$$

$$Tap = \frac{I_{set}}{CT \text{ Primary}} = \frac{14474}{3500/5} = 20,7 \text{ A}$$

Waktu tunda (*time delay*)

Dipilih waktu tunda (*time delay*) = 0,1 detik

c. Rele INCOMING 2A

Manufaktur : TOSHIBA

Model : MCR 24

Kurva : IEC *Extremely Inverse*

Rasio CT : 3500/5

I_{sc} min : 18,71 kA

I_{sc} max : 21,68A

FLA : 2969 A

Batas *Time Overcurrent*

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

$$1,05 \times 2969 < I_{set} < 1,4 \times 2969$$

$$3117,45 < I_{set} < 4157$$

$$\text{Dipilih } I_{set} = 3265,9 \text{ A}$$

$$Tap = \frac{I_{set}}{CT \text{ Primary}} = \frac{3265,9}{3500/5} = 4,67$$

Waktu kerja (*time dial*)

Dipilih waktu operasi (t_d) = 0,7 detik

$$t_d = TD \times \left(\frac{K}{\left(\frac{I}{I_{Set}}\right)^\alpha - 1} + L \right)$$

$$TD = \frac{t_d \times \left[\left(\frac{I}{I_{Set}}\right)^2 - 1 \right]}{80}$$

$$TD = \frac{t_d \times \left[\left(\frac{I_{sc \max \text{ Bus}}}{I_{Set}}\right)^2 - 1 \right]}{80}$$

$$TD = \frac{t_d \times \left[\left(\frac{21680}{3265,9}\right)^{0,02} - 1 \right]}{80}$$

$$TD \text{ minimum} = 0,37$$

Maka, dipilih pengaturan (*setting*) TD sebesar 0,37

Batas *Instantaneous*

$$1,6 \times FLA < I_{set} < 0,8 \times I_{sc \min}$$

$$1,6 \times 2969 < I_{set} < 0,8 \times 18710$$

$$4750,4 < I_{set} < 14968$$

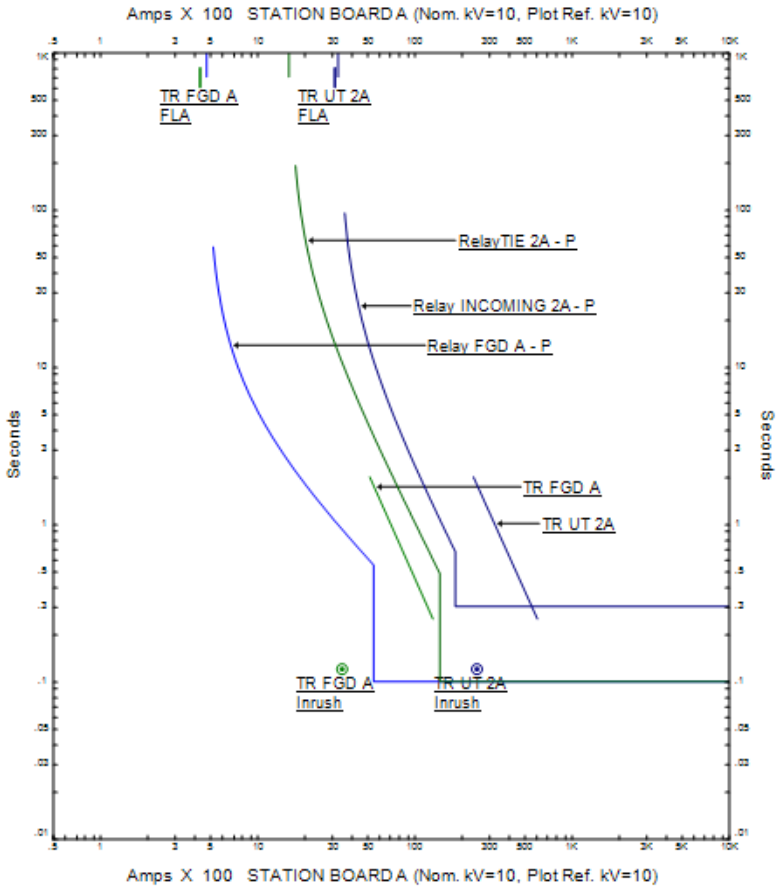
$$\text{Dipilih } I_{set} = 13360 \text{ A}$$

$$Tap = \frac{I_{set}}{CT \text{ Primary}} = \frac{13360}{3500/5} = 19,1$$

Waktu tunda (*time delay*)

$$\text{Dipilih waktu tunda } (time \text{ delay}) = 0,3 \text{ detik}$$

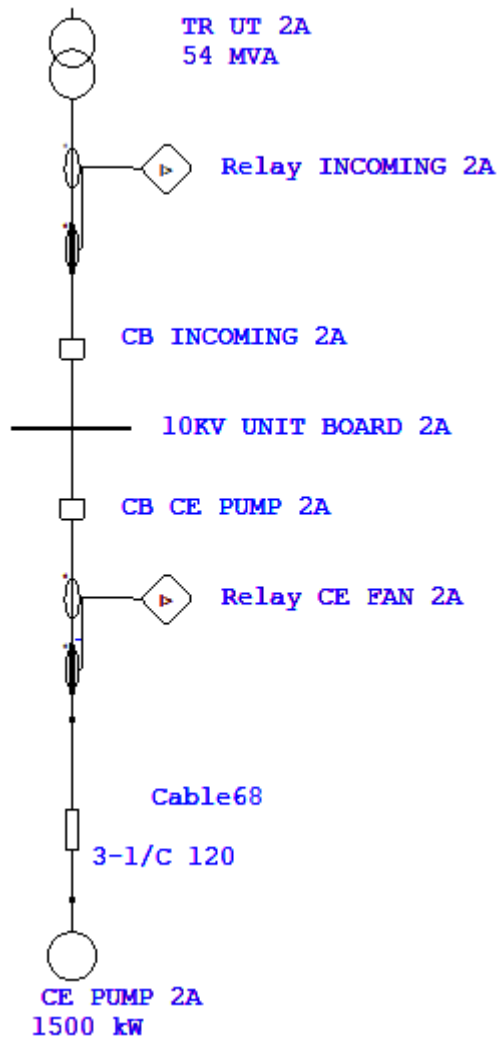
Gambar 4.6 menunjukkan plot *Time Current Curve* hasil perhitungan dan pengaturan ulang (*resetting*) koordinasi proteksi tipikal 2.



Gambar 4.6 Plot TCC Tipikal 2A dan 2B Pengaturan ulang (*resetting*)

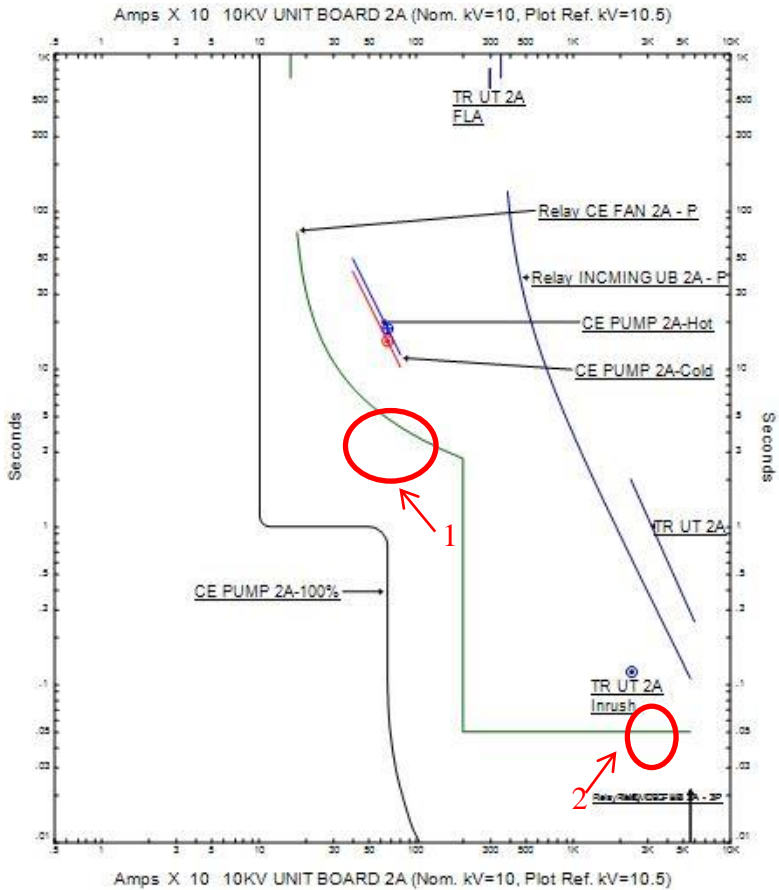
4.4.3 Tipikal 3A, 3B, 3C, dan 3D

Sebelum melakukan pengaturan ulang (*resetting*) koordinasi proteksi, maka diperlukan simulasi dari sistem pengaturan awal (*existing*) tipikal 3A, 3B, 3C, dan 3D untuk mengetahui keadaan mula sistem. Pada tipikal 3A, 3B, 3C, dan 3D memiliki spesifikasi beban, level tegangan yang sama sehingga pengaturan (*setting*) koordinasi proteksi identik. Berikut merupakan diagram satu garis dari tipikal 3A dan 3B.



Gambar 4.7 Diagram satu garis Tipikal 3A, 3B, 3C, dan 3D

Berikut merupakan hasil dari plot TCC Tipikal 3A, 3B, 3C, dan 3D.



Gambar 4.8 Plot TCC Tipikal 3A, 3B, 3C, dan 3D Pengaturan awal (*existing*)

Dari hasil plot kurva koordinasi rele pada tipikal 3A, 3B, 3C, dan 3D pengaturan awal (*existing*) terdapat kesalahan yang akan menyebabkan koordinasi proteksi tidak bekerja dengan maksimal, yaitu pada lingkaran 1 pengaturan (*setting*) waktu kerja (*time dial*) untuk kurva TOC terlalu besar dan waktu tunda (*time delay*) kurva IOC pada lingkaran 2 terlalu kecil yaitu 0,05. Dari hasil analisis terhadap koordinasi *existing* tipikal

3A, 3B, 3C, dan 3D, maka diperlukan pengaturan ulang (*resetting*).
Perhitungan pengaturan ulang (*resetting*) sebagai berikut

a. Rele CE FAN 2A

Manufaktur	: TOSHIBA
Model	: MCR 24
Kurva	: IEC Standart <i>Inverse</i>
Rasio CT	: 200/5
Isc min	: 17,75 kA
Isc max	: 27,9 kA
FLA	: 107 A

Batas *Time Overcurrent*

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

$$1,05 \times 107 < I_{set} < 1,4 \times 107$$

$$112,35 < I_{set} < 150$$

$$\text{Dipilih Iset} = 117,7 \text{ A}$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{set}}{CT \text{ Primary}} = \frac{117,7}{200/5} = 2,94$$

Waktu kerja (*time dial*)

Dipilih waktu operasi (t_d) = 0,1 detik

$$t_d = TD \times \left(\frac{K}{\left(\frac{I}{I_{Set}}\right)^\alpha - 1} + L \right)$$

$$TD = \frac{t_d \times \left[\left(\frac{I}{I_{Set}}\right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TD = \frac{t_d \times \left[\left(\frac{I_{sc \text{ max Bus}}}{I_{Set}}\right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TD = \frac{t_d \times \left[\left(\frac{27900}{117,7}\right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

TD minimum = 0.08

Maka, dipilih pengaturan (*setting*) TD sebesar 0,3

Batas *Instantaneous*

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

$$1,6 \times 107 < I_{set} < 0,8 \times 17750$$

$$171,2 < I_{set} < 14200$$

$$\text{Dipilih } I_{set} = 963 \text{ A}$$

$$Tap = \frac{I_{set}}{CT \text{ Primary}} = \frac{963}{200/5} = 24,07A$$

Waktu tunda (*time delay*)

$$\text{Dipilih waktu tunda (*time delay*)} = 0,1 \text{ detik}$$

b. Rele INCOMING 2A

Manufaktur	: TOSHIBA
Model	: MCR 24
Kurva	: IEC <i>Extremely Inverse</i>
Rasio CT	: 3500/5
Isc min	: 18,71 kA
Isc max	: 21,68A
FLA	: 2969 A

Batas *Time Overcurrent*

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

$$1,05 \times 2969 < I_{set} < 1,4 \times 2969$$

$$3117,45 < I_{set} < 4157$$

$$\text{Dipilih } I_{set} = 3265,9 \text{ A}$$

$$Tap = \frac{I_{set}}{CT \text{ Primary}} = \frac{3265,9}{3500/5} = 4,67$$

Waktu kerja (*time dial*)

$$\text{Dipilih waktu operasi } (t_d) = 0,7 \text{ detik}$$

$$t_d = TD \times \left(\frac{K}{\left(\frac{I}{I_{Set}} \right)^\alpha - 1} + L \right)$$

$$TD = \frac{t_d \times \left[\left(\frac{I}{I_{Set}} \right)^2 - 1 \right]}{80}$$

$$TD = \frac{t_d \times \left[\left(\frac{I_{sc \max \text{ Bus}}}{I_{set}} \right)^2 - 1 \right]}{80}$$

$$TD = \frac{t_d \times \left[\left(\frac{21680}{3265,9} \right)^{0,02} - 1 \right]}{80}$$

TD minimum = 0.37

Maka, dipilih pengaturan (*setting*) TD sebesar 0,37

Batas *Instantaneous*

$$1,6 \times FLA < I_{set} < 0,8 \times I_{sc \min}$$

$$1,6 \times 2969 < I_{set} < 0,8 \times 18710$$

$$4750,4 < I_{set} < 14968$$

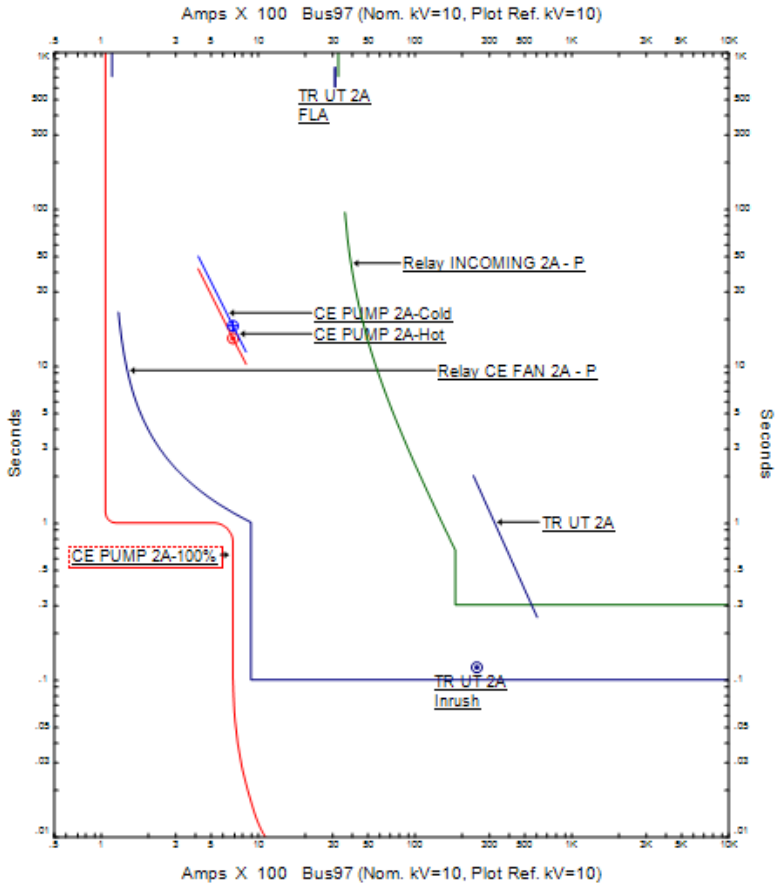
Dipilih $I_{set} = 13360 \text{ A}$

$$Tap = \frac{I_{set}}{CT \text{ Primary}} = \frac{13360}{3500/5} = 19.1$$

Waktu tunda (*time delay*)

Dipilih waktu tunda (*time delay*) = 0,3 detik

Gambar 4.9 menunjukkan plot *Time Current Curve* hasil perhitungan dan pengaturan ulang (*resetting*) koordinasi proteksi tipikal 3.

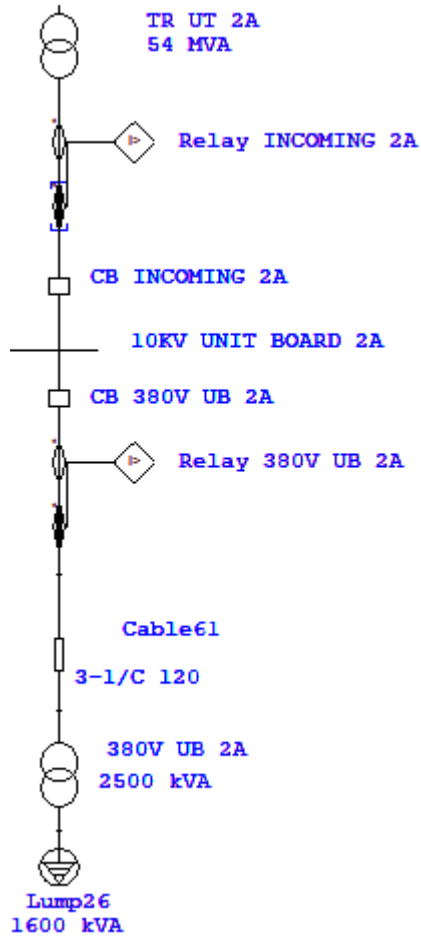


Gambar 4.9 Plot TCC Tipikal 3A, 3B, 3C, dan 3D Pengaturan ulang (*resetting*)

4.4.4 Tipikal 4A, 4B, 4C, dan 4D

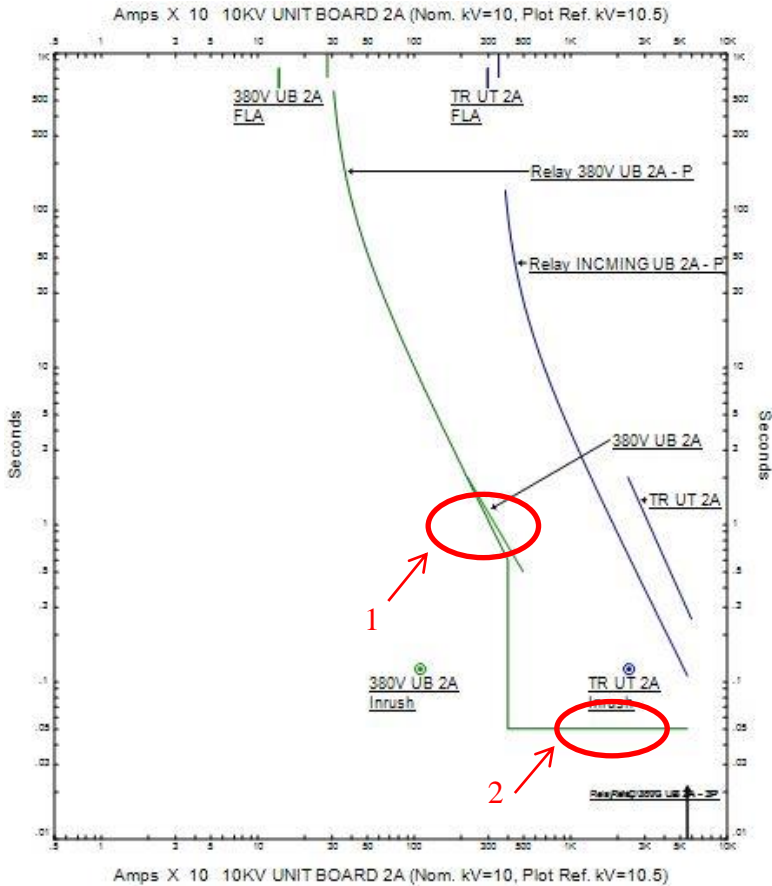
Sebelum melakukan pengaturan ulang (*resetting*) koordinasi proteksi, maka diperlukan simulasi dari sistem pengaturan awal (*existing*) tipikal 4A, 4B, 4C, dan 4D untuk mengetahui keadaan mula sistem. Pada tipikal 4A, 4B, 4C, dan 4D memiliki spesifikasi beban, level tegangan yang sama sehingga pengaturan (*setting*) koordinasi

proteksi identik. Berikut merupakan diagram satu garis dari tipikal 4A, 4B, 4C, dan 4D.



Gambar 4.10 Diagram satu garis Tipikal 4A, 4B, 4C, dan 4D

Berikut merupakan hasil dari plot TCC Tipikal 4A, 4B, 4C, dan 4D.



Gambar 4.11 Plot *TCC* Tipikal 4A dan 4B Pengaturan awal (*existing*)

Dari hasil plot kurva koordinasi rele pada tipikal 4A, 4B, 4C, dan 4D pengaturan awal (*existing*) terdapat kesalahan yang akan menyebabkan koordinasi proteksi tidak bekerja dengan baik. Pada lingkaran 1, rele 380KV UB 2A tidak dapat melindungi trafo dari kondisi *damage* trafo. Sedangkan pada lingkaran 2 waktu tunda (*time delay*) kurva IOC pada rele 380KV UB terlalu singkat. Perhitungan pengaturan ulang (*resetting*) sebagai berikut.

a. Rele CE FAN 2A

Manufaktur	: TOSHIBA
Model	: MCR 24
Kurva	: IEC Extremely <i>Inverse</i>
Rasio CT	: 200/5
Isc min	: 17,28 kA
Isc max	: 28,53 kA
FLA	: 144,3A

Batas *Time Overcurrent*

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

$$1,05 \times 144,3 < I_{\text{set}} < 1,4 \times 144,3$$

$$151,5 < I_{\text{set}} < 202$$

Dipilih Iset = 158,7 A

$$\text{Tap} = \frac{I_{\text{set}}}{\text{CT Primary}} = \frac{158,7}{200/5} = 3,97$$

Waktu kerja (*time dial*)

Dipilih waktu operasi (t_d) = 0,1 detik

$$t_d = \text{TD} \times \left(\frac{K}{\left(\frac{I}{I_{\text{Set}}}\right)^\alpha - 1} + L \right)$$

$$\text{TD} = \frac{t_d \times \left[\left(\frac{I}{I_{\text{Set}}}\right)^2 - 1 \right]}{80}$$

$$\text{TD} = \frac{t_d \times \left[\left(\frac{\text{Isc max Bus}}{I_{\text{Set}}}\right)^2 - 1 \right]}{0,14}$$

$$\text{TD} = \frac{t_d \times \left[\left(\frac{28530}{158,7}\right)^{0,02} - 1 \right]}{80}$$

TD minimum = 0.4

Maka, dipilih pengaturan (*setting*) TD sebesar 0,41

Batas *Instaneous*

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

$$1,6 \times 107 < I_{set} < 0,8 \times 17280$$

$$230,88 < I_{set} < 14968$$

$$\text{Dipilih Iset} = 963 \text{ A}$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{set}}{CT \text{ Primary}} = \frac{1872}{200/5} = 46,8 \text{ A}$$

Waktu tunda (*time delay*)

$$\text{Dipilih waktu tunda (*time delay*)} = 0,1 \text{ detik}$$

b. Rele INCOMING 2A

Manufaktur	: TOSHIBA
Model	: MCR 24
Kurva	: IEC <i>Extremely Inverse</i>
Rasio CT	: 3500/5
Isc min	: 18,71 kA
Isc max	: 21,68A
FLA	: 2969 A

Batas *Time Overcurrent*

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

$$1,05 \times 2969 < I_{set} < 1,4 \times 2969$$

$$3117,45 < I_{set} < 4157$$

$$\text{Dipilih Iset} = 3265,9 \text{ A}$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{set}}{CT \text{ Primary}} = \frac{3265,9}{3500/5} = 4,67$$

Waktu kerja (*time dial*)

$$\text{Dipilih waktu operasi (} t_d \text{)} = 0,7 \text{ detik}$$

$$t_d = TD \times \left(\frac{K}{\left(\frac{I}{I_{Set}} \right)^\alpha - 1} + L \right)$$

$$TD = \frac{t_d \times \left[\left(\frac{I}{I_{Set}} \right)^2 - 1 \right]}{80}$$

$$TD = \frac{t_d \times \left[\left(\frac{I_{sc \text{ max Bus}}}{I_{set}} \right)^2 - 1 \right]}{80}$$

$$TD = \frac{t_d \times \left[\left(\frac{21680}{3265,9} \right)^{0,02} - 1 \right]}{80}$$

TD minimum = 0.37

Maka, dipilih pengaturan (*setting*) TD sebesar 0,37

Batas *Instantaneous*

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

$$1,6 \times 2969 < I_{set} < 0,8 \times 18710$$

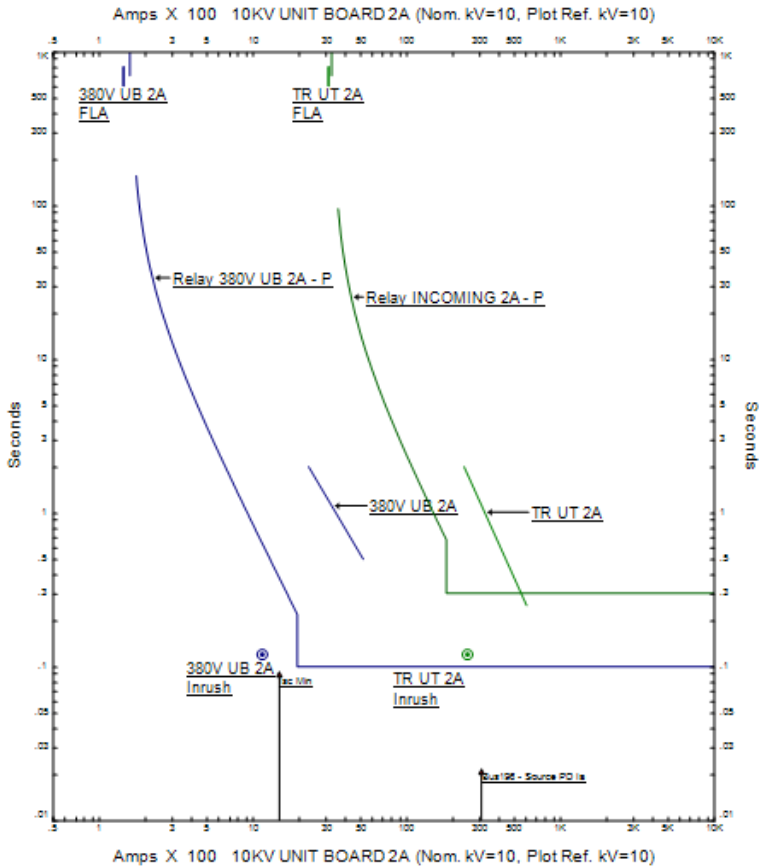
$$4750,4 < I_{set} < 14968$$

Dipilih $I_{set} = 13360 \text{ A}$

$$Tap = \frac{I_{set}}{CT \text{ Primary}} = \frac{13360}{3500/5} = 19.1$$

Waktu tunda (*time delay*)

Dipilih waktu tunda (*time delay*) = 0,3 detik

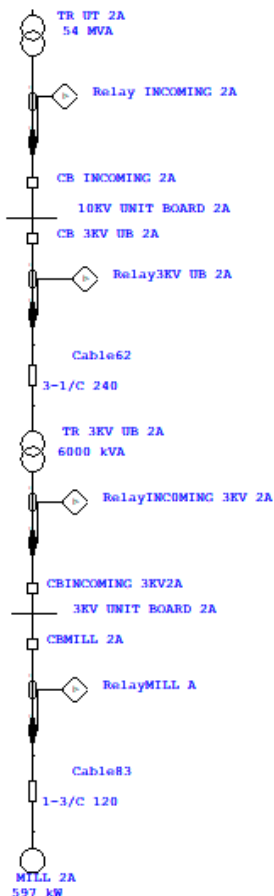


Gambar 4.12 Plot TCC Tipikal 4A dan 4B Pengaturan ulang (*resetting*)

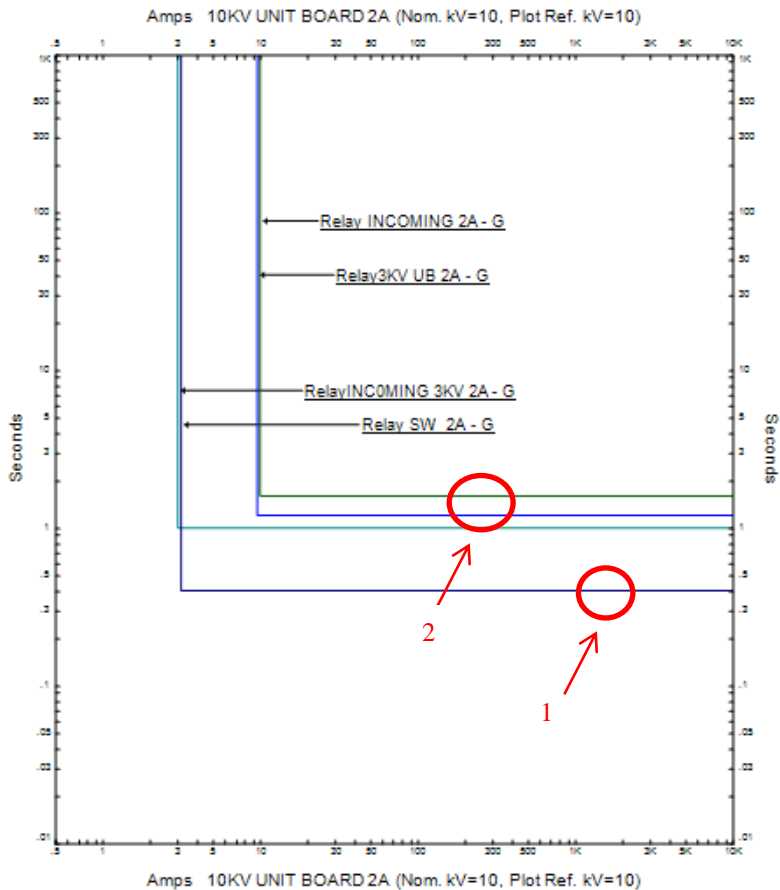
4.5 Koordinasi Rele Gangguan Fasa Ke Tanah

Koordinasi rele arus lebih gangguan ke tanah perlu dilakukan untuk mengatasi ketika mengalami hubungan singkat ke tanah baik itu satu fasa maupun dua fasa. Dalam melakukannya pengaturan (*setting*) rele gangguan ke tanah ini berhubungan dengan nilai NGR (*Neutral Grounding Resistor*) pada suatu peralatan, biasanya terdapat pada trafo dan generator. Jika pentanahan suatu peralatan menggunakan *low resistant grounding* biasanya gangguan cukup mudah atau sensitive untuk dideteksi, arus gangguan dapat dibatasi untuk tidak merusak

peralatan, pertimbangan *arc-flash*, pengaturan (*setting*) arus 10-40%, digunakan rele *instantaneous* (rele 50), dan waktu *digrading*. Berikut adalah tipikal untuk pengaturan (*setting*) NGR dari rele INCOMING 2A hingga ke rele MILL 2A



Gambar 4.13 Diagram satu garis Tipikal *Ground Fault*
Berikut merupakan hasil dari plot TCC.



Gambar 4.14 Plot TCC Gangguan Tanah Pengaturan awal (*existing*)

Dari hasil plot kurva koordinasi rele pengaturan awal (*existing*) terdapat kesalahan yang akan menyebabkan koordinasi proteksi tidak bekerja dengan baik. Pada gambar 1 rele SW 2A memiliki waktu tunda (*time delay*) yang terlalu lama yaitu 0,4 detik dan perbedaan waktu (Δt) dengan rele backup sebesar 0,6 detik, yang mana pengaturan (*setting*) tersebut terlalu besar, selain itu pada gambar 2 rele 3KV UB 2A

memiliki waktu tunda (waktu tunda (*time delay*)) yang terlalu lama yaitu 1,2 detik.

Berikut merupakan perhitungan parameter pengaturan ulang (*resetting*) dari masing-masing rele.

a. Rele SW-2A

Manufaktur : TOSHIBA
Model : MCR 24
Kurva : *Instaneous*
Rasio CT : 50/5
Isc LG : 400

Batas *Instaneous*

$$10\% \times \text{Isc LG} < I_{\text{set}} < 50\% \times \text{Isc LG}$$

$$10\% \times 400 < I_{\text{set}} < 50\% \times 400$$

$$40 < I_{\text{set}} < 200$$

$$\text{Dipilih Iset} = 50 \text{ A}$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{\text{set}}}{\text{CT Primary}} = \frac{50}{50/5} = 5 \text{ A}$$

Waktu tunda (*time delay*)

$$\text{Dipilih waktu tunda (*time delay*)} = 0,1 \text{ detik}$$

b. Rele INCOMING 3KV 2A

Manufaktur : TOSHIBA
Model : MCR 24
Kurva : *Instaneous*
Rasio CT : 500/5
Isc LG : 400

Batas *Instaneous*

$$10\% \times \text{Isc LG} < I_{\text{set}} < 50\% \times \text{Isc LG}$$

$$10\% \times 400 < I_{\text{set}} < 50\% \times 400$$

$$40 < I_{\text{set}} < 200$$

$$\text{Dipilih Iset} = 50 \text{ A}$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{\text{set}}}{\text{CT Primary}} = \frac{50}{500/5} = 0,5 \text{ A}$$

Waktu tunda (*time delay*)

$$\text{Dipilih waktu tunda (*time delay*)} = 0,3 \text{ detik}$$

c. Rele 3KV UB 2A

Manufaktur : TOSHIBA

Model : MCR 24
Kurva : *Instantaneous*
Rasio CT : 80/5
Isc LG : 400A

Batas *Instantaneous*

$$10\% \times \text{Isc LG} < I_{\text{set}} < 50\% \times \text{Isc LG}$$

$$10\% \times 400 < I_{\text{set}} < 50\% \times 400$$

$$40 < I_{\text{set}} < 200$$

$$\text{Dipilih Iset} = 50 \text{ A}$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{\text{set}}}{\text{CT Primary}} = \frac{50}{80/5} = 3,13 \text{ A}$$

Waktu tunda (*time delay*)

Dipilih waktu tunda (*time delay*) = 0,1 detik

d. Rele INCOMING 2A

Manufaktur : TOSHIBA
Model : MCR 24
Kurva : *Instantaneous*
Rasio CT : 500/5
Isc LG : 400

Batas *Instantaneous*

$$10\% \times \text{Isc LG} < I_{\text{set}} < 50\% \times \text{Isc LG}$$

$$10\% \times 400 < I_{\text{set}} < 50\% \times 400$$

$$40 < I_{\text{set}} < 200$$

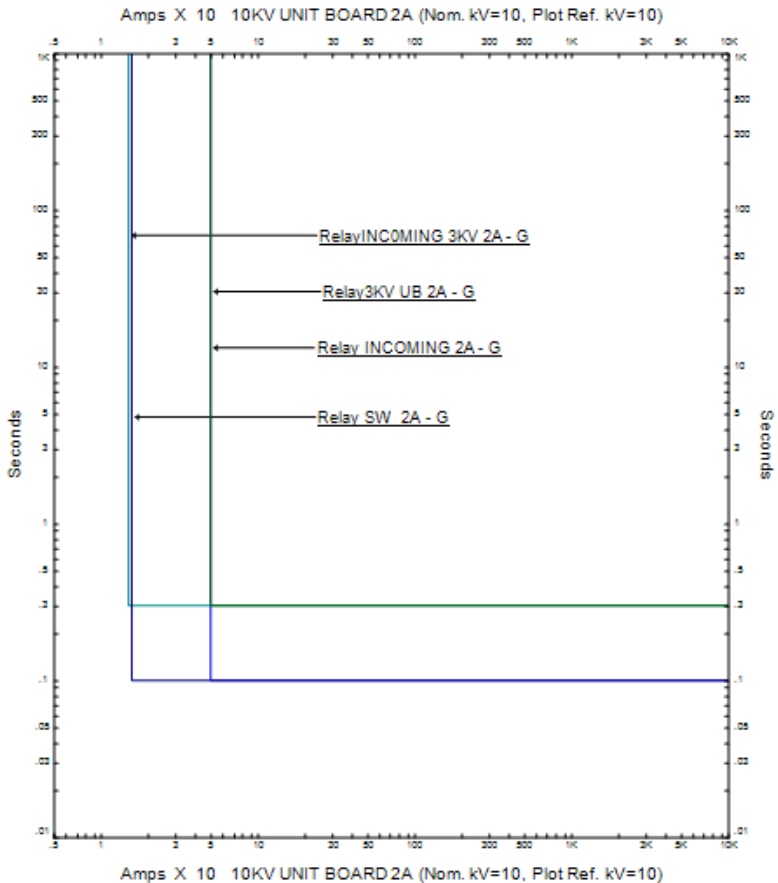
$$\text{Dipilih Iset} = 50 \text{ A}$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{\text{set}}}{\text{CT Primary}} = \frac{50}{500/5} = 0,5 \text{ A}$$

Waktu tunda (*time delay*)

Dipilih waktu tunda (*time delay*) = 0,3 detik

Hasil pengaturan ulang (*resetting*) rele arus lebih gangguan ke tanah dapat dilihat pada gambar 4.15.



Gambar 4.15 Plot TCC *Ground Fault* Pengaturan ulang (*resetting*)

4.6 Perbandingan Pengaturan (*setting*) Rele

Perbandingan pengaturan (*setting*) untuk mengetahui perubahan dari pengaturan (*setting*) rele kondisi pengaturan awal (*existing*) dengan pengaturan (*setting*) rele kondisi pengaturan ulang (*resetting*).

Tabel 4. 3 Perbandingan Pengaturan (*setting*) Rele Arus Lebih

<i>Low Set</i>						
ID Bus	Existing			Pengaturan ulang (<i>resetting</i>)		
	Tipe Kurva	Pick up	TD	Tipe Kurva	Pick up	TD
Rele INCOMING 2A	<i>Extremely Inversee</i>	5	0,35	<i>Extremely Inversee</i>	4,67	0,25
Rele 3KV UB 2A	<i>Very Inversee</i>	5,5	0,8	<i>Very Inversee</i>	3,18	0,53
Rele INCOMING 3KV 2A	<i>Very Inversee</i>	5	0,4	<i>Very Inversee</i>	3,03	0,42
Rele MILL 2A	Standar <i>Inversee</i>	4	2	Rele MILL 2A	2,2	2,38
Rele TIE 2A	<i>Extremely Inversee</i>	5	0,2	<i>Extremely Inversee</i>	2,27	0,5
Rele FGD A	<i>Very Inversee</i>	5,5	0,7	<i>Very Inversee</i>	3,97	0,43
Rele CE FAN 2A	Standar <i>Inversee</i>	4	1	Standar <i>Inversee</i>	2,94	0,3
Rele 380V UB 2A	<i>Extremely Inversee</i>	7	1,5	<i>Extremely Inversee</i>	3,97	0,41
<i>High Set</i>						
Rele INCOMING 2A	Instantaneous	-	-	Instantaneous	19,1	0,3
Rele 3KV UB 2A	Instantaneous	80	0,05	Instantaneous	66,3	0,1
Rele INCOMING 3KV 2A	Instantaneous	-	-	Instantaneous	-	-
Rele MILL 2A	Instantaneous	50	0,05	Instantaneous	19,5	0,1
Rele TIE 2A	Instantaneous	-	-	Instantaneous	20,7	0,1
Rele FGD A	Instantaneous	100	0,05	Instantaneous	45,91	0,1
Rele CE FAN 2A	Instantaneous	50	0,05	Instantaneous	22,67	0,1
Rele 380V UB 2A	Instantaneous	100	0,05	Instantaneous	58,07	0,1

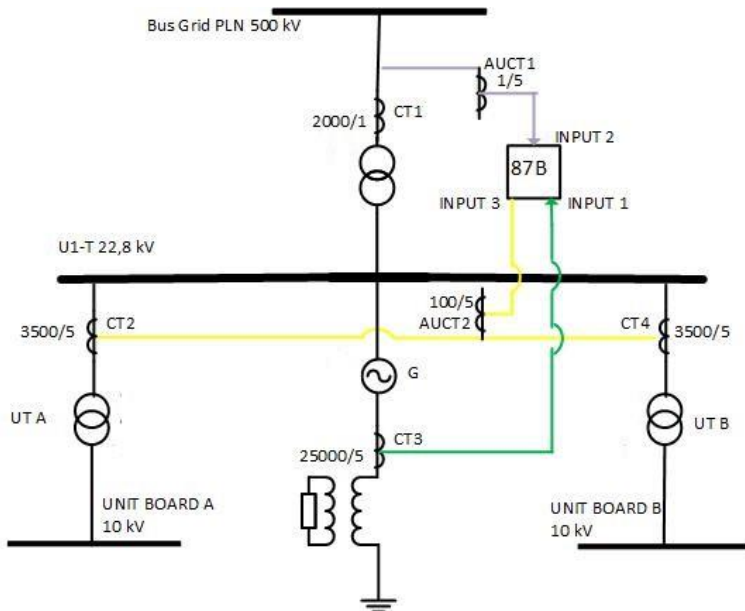
4.7 Pengaturan (*Setting*) Rele Diferensial

Untuk menentukan pengaturan (*setting*) rele digunakan hubungan singkat 0,5 cycle untuk mengetahui berapa arus maksimal yang terjadi apakah melebihi arus operasi minimal pada *setting* rele diferensial. Pengaturan (*setting*) rele differensial ditentukan berdasarkan I_{diff} , I_{res} , dan *slope* saat keadaan normal ataupun keadaan gangguan didalam dan diluar daerah pengamanan.

Spesifikasi rele:

Manufacturer	= Toshiba
Tipe Relay	= BE1-87
Input A CT Tap	= 2-8,9A step 0,1
Input B CT Tap	= 2-8,9A step 0,1
Input C CT Tap	= 2-8,9A step 0,1
Slope	= 15-60% step 0,1

4.7.1 Kondisi Pengaturan Awal (*Exsisting*)



Gambar 4.16 Konfigurasi Rele Diferensial

Bagian Primer Rele Differential

CT-1

Tegangan = 525 kV
Kapasitas = 786 MVA
Rasio CT = 2000/5
CT Class = 5P20
AUCT1 = 1/5
 $I_1 = \frac{MVA \text{ peralatan}}{\sqrt{3} \times kV} = \frac{786000}{\sqrt{3} \times 525} = 864.4 \text{ A}$

Bagian Sekunder Rele Differential

CT-2

Tegangan = 10,5
Kapasitas = 54 MVA
Rasio CT = 3500/5
CT Class = 5P20
AUCT2 = 100/5
 $I_2 = \frac{MVA \text{ peralatan}}{\sqrt{3} \times kV} = \frac{54000}{\sqrt{3} \times 10,5} = 2969 \text{ A}$

Bagian Sekunder Rele Differential

CT-3

Tegangan = 22.8
Kapasitas = 802 MVA
Rasio CT = 25000/5
CT Class = 5P20
 $I_3 = \frac{MVA \text{ peralatan}}{\sqrt{3} \times kV} = \frac{802000}{\sqrt{3} \times 22.8} = 20309 \text{ A}$

Bagian Sekunder Rele Differential

CT-4

Tegangan = 10,5
Kapasitas = 54 MVA
Rasio CT = 3500/1
CT Class = 5P20
AUCT2 = 100/5
 $I_4 = \frac{MVA \text{ peralatan}}{\sqrt{3} \times kV} = \frac{54000}{\sqrt{3} \times 10,5} = 2969 \text{ A}$

Pemilihan Tap

Input 1 CT Tap = 4,1 A

Input 2 CT Tap	= 2,2 A
Input 3 CT Tap	= 3,2,9A
Slope	= 40%

$$\begin{aligned}
 I_p &= I_s \\
 I_1 &= I_3 - (I_2 + I_4) \\
 2,2 &= 4,1 - (3,2) \\
 2,2 &= 0,911
 \end{aligned}$$

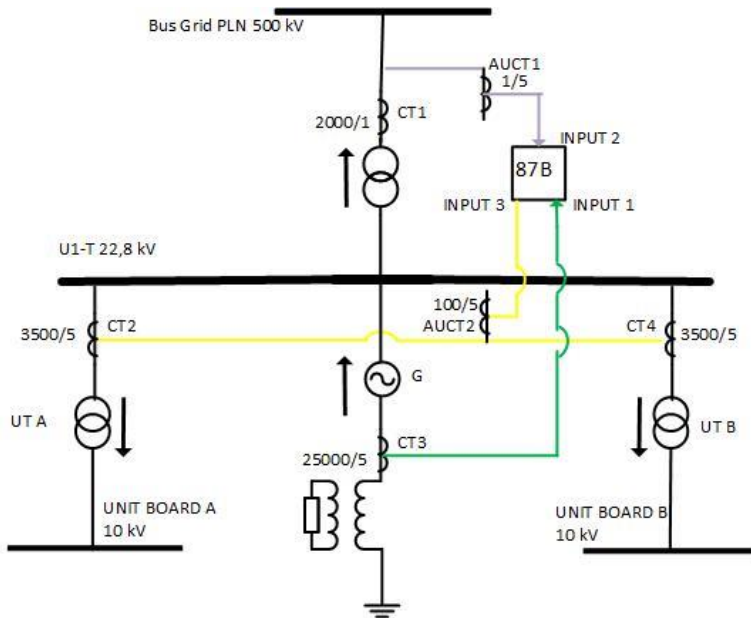
$$\begin{aligned}
 I_{Restrain} &= MAX (|I_p| + |I_s|) \\
 &= MAX (|2,2|, |0,911|) \\
 &= 2,2 A
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{Diff} &= |I_p - I_s| \\
 &= |2,2 - 0,911| \\
 &= 1,3 A
 \end{aligned}$$

Rekomendasi Slope = 40%

Kondisi Normal

Kondisi normal merupakan kondisi tanpa adanya gangguan sehingga daya yang dibangkitkan oleh generator mengalir melalui transformator UT A, UT B, atau GT menuju ke beban. Pemodelan sistem dan rele diferensial pada kondisi normal dapat dilihat pada gambar 4.17.



Gambar 4.17 Permodelan Kondisi Normal

Arus yang mengalir pada sekunder CT

$$I_p = I_s$$

$$I_1 = I_3 - (I_2 + I_4)$$

$$\frac{864.4}{(2000/1)(1/5)} = \frac{20309}{25000/5} - \left(\frac{2969}{(3500/5)(100/5)} + \frac{2969}{(3500/5)(100/5)} \right)$$

$$2.16 = 4.06 - 0.42$$

$$2.16 \neq 3.64$$

$$I_{Res} = \text{MAX} (|I_p|, |I_s|)$$

$$I_{Res} = \text{MAX} (|2.16|, |3.64|)$$

$$I_{Res} = 3.64 \text{ A}$$

$$I_{Diff} = |I_p - I_s|$$

$$I_{Diff} = |2.16 - 3.64|$$

$$I_{Diff} = 1.48 \text{ A}$$

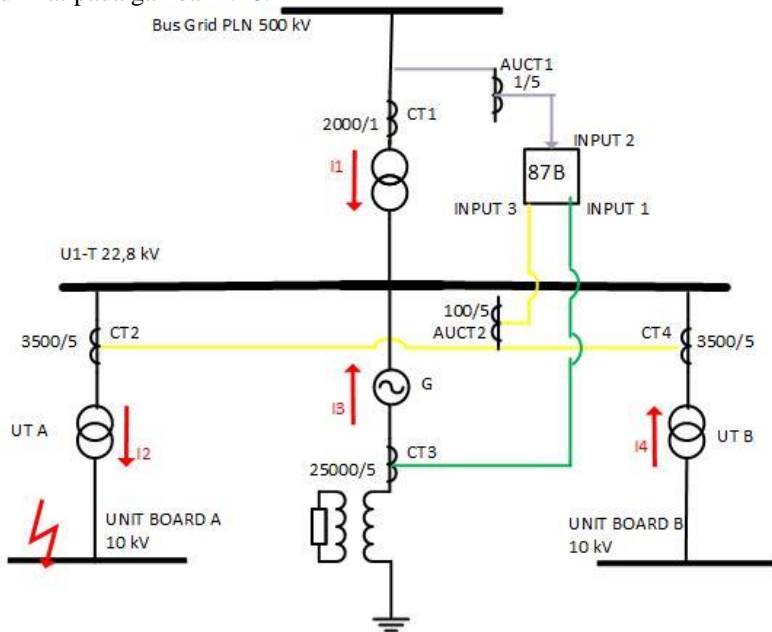
$$\text{slope}(\%) = \frac{I_{Diff}}{I_{Restrained}} \times 100\%$$

$$\text{slope}(\%) = \frac{1.48}{3.64} \times 100\%$$

$$\text{slope}(\%) = 40.53\%$$

Kondisi Gangguan Eksternal di Bus UNIT BOARD A 3 Fasa

Ketika terjadi gangguan hubungan singkat di bus UNIT BOARD A maka seluruh arah arus akan menuju bus UNIT BOARD A sehingga persamaannya menjadi $-I_1 = I_3 - (I_2 - I_4)$. Permodelan sistem rele diferensial saat hubungan singkat 3 fasa di bus UNIT BOARD A dapat dilihat pada gambar 4.18.



Gambar 4.18 Permodelan Hubungan Singkat 3 Fasa di Bus UNIT BOARD A

Arus yang mengalir pada sekunder CT

$$I_p = I_s$$

$$-I_1 = I_3 - (I_2 - I_4)$$

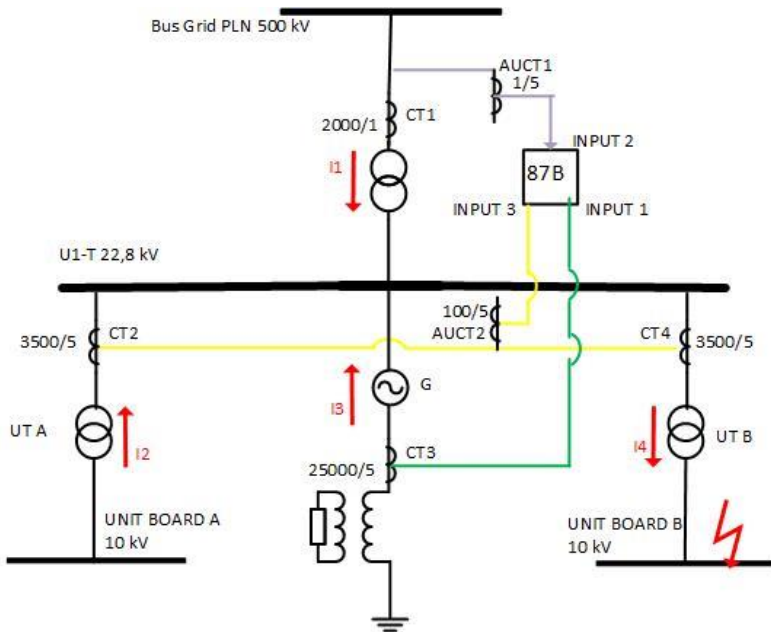
$$-\frac{243}{(2000/1) \times (1/5)} = \frac{4230}{25000/5} - \left(\frac{21680}{(3500/5) \times (100/5)} - \frac{349}{(3500/5) \times (100/5)} \right)$$

$$-0,61 = 0,85 - (1,55 - 0,02)$$

$$\begin{aligned}
-0,61 &= -0,68 \\
I_{Res} &= \text{MAX} (|I_p|, |I_s|) \\
I_{Res} &= \text{MAX} (|-0,61|, |-0,68|) \\
I_{Res} &= 0,68 \text{ A} \\
I_{Diff} &= |I_p - I_s| \\
&= |-0,61 + 0,68| \\
&= 0,07 \text{ A} \\
\text{Slope} &= \frac{I_{Diff}}{I_{Res}} \times 100\% \\
&= \frac{0,07}{0,68} \times 100 \% \\
&= 10,35 \%
\end{aligned}$$

Kondisi Gangguan Eksternal di Bus UNIT BOARD B 3 Phasa

Saat terjadi hubungan 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 UT A dan GT. Perubahan arah arus ditandai dengan tanda negatif pada I_1 dan I_4 pada sehingga persamaannya menjadi $-I_1 = I_3 - (-I_2 + I_4)$. Pemodelan sistem dan rele diferensial saat hubungan singkat 3 phasa di Unit Board B dapat dilihat pada gambar 4.19.



Gambar 4.19 Permodelan Hubungan Singkat 3 Fasa di Bus UNIT BOARD B

Arus yang mengalir pada sekunder CT

$$I_p = I_s$$

$$-I_1 = I_3 - (-I_2 + I_4)$$

$$-\frac{244}{(2000/1) \times (1/5)} = \frac{4230}{25000/5} - \left(-\frac{311}{(3500/5) \times (100/5)} + \frac{21680}{(3500/5) \times (100/5)} \right)$$

$$-0,61 = 0,85 - (0,02 - 1,55)$$

$$-0,61 = -0,68$$

$$I_{Res} = \text{MAX} (|I_p|, |I_s|)$$

$$I_{Res} = \text{MAX} (|-0,61|, |-0,68|)$$

$$I_{Res} = 0,68 \text{ A}$$

$$I_{Diff} = |I_p - I_s|$$

$$= |-0,61 + 0,68|$$

$$= 0,07 \text{ A}$$

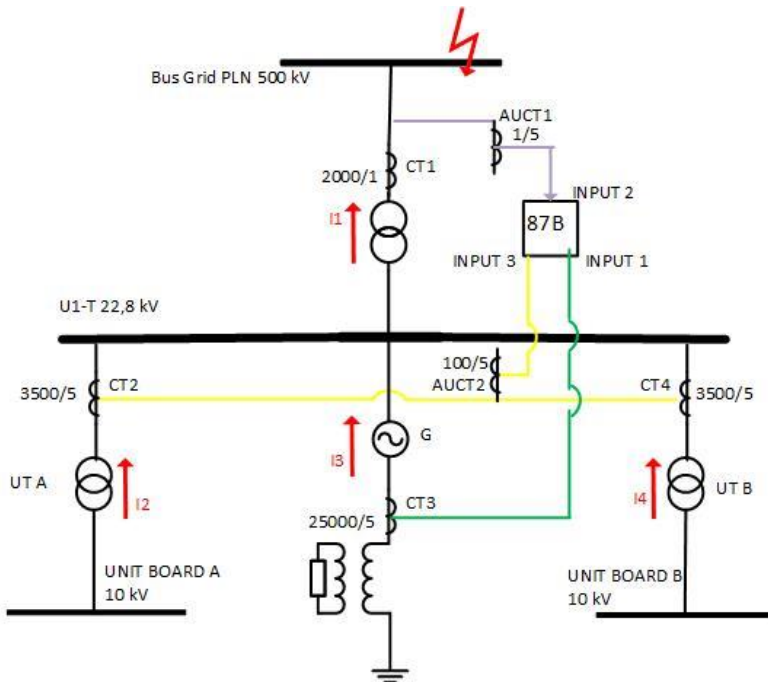
$$\text{Slope} = \frac{I_{Diff}}{I_{Res}} \times 100\%$$

$$= \frac{0,07}{0,68} \times 100 \%$$

$$= 10,35 \%$$

Kondisi Gangguan Eksternal di Bus 500 kV 3 Phasa

Saat terjadi hubungan singkat 3 phasa di Bus 500kV, maka seluruh arus akan menuju titik gangguan yaitu Bus 500 kV. Hal tersebut menyebabkan perubahan arah arus pada UT A dan UT B. Perubahan arah arus ditandai dengan tanda negatif pada I_1 dan I_4 pada sehingga persamaannya menjadi $I_1 = I_3 - (-I_2 - I_4)$. Permodelan sistem dan rele diferensial saat hubungan singkat 3 phasa di bus 500kV dapat dilihat pada gambar 4.20.



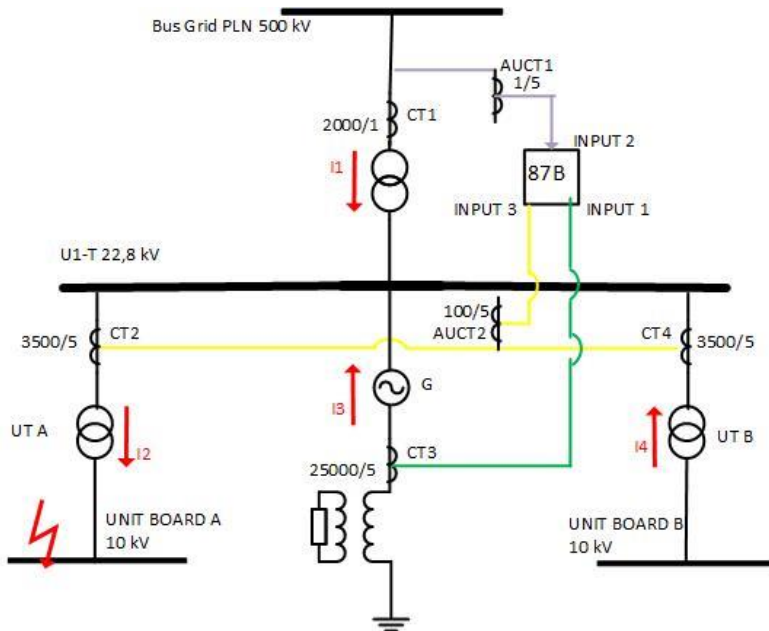
Gambar 4.20 Permodelan Hubungan Singkat 3 Phasa di Bus Grid

Arus yang mengalir pada sekunder CT

$$\begin{aligned}
I_p &= I_s \\
I_1 &= I_3 - (-I_2 - I_4) \\
\frac{2750}{(2000/1) \times (1/5)} &= \frac{59160}{25000/5} - \left(-\frac{4340}{(3500/5) \times (100/5)} - \frac{4880}{(3500/5) \times (100/5)} \right) \\
6,88 &= 11,83 - (-0,31 - 0,35) \\
6,88 &= 12,49 \\
I_{Res} &= \text{MAX}(|I_p|, |I_s|) \\
I_{Res} &= \text{MAX}(|6,88|, |12,49|) \\
I_{Res} &= 12,49 \text{ A} \\
I_{Diff} &= |I_p - I_s| \\
&= |6,88 - 12,49| \\
&= 5,61 \text{ A} \\
\text{Slope} &= \frac{I_{Diff}}{I_{Res}} \times 100\% \\
&= \frac{5,61}{12,49} \times 100\% \\
&= 44,96\%
\end{aligned}$$

Kondisi Gangguan Eksternal di Bus UNIT BOARD A 2 Phasa

Saat terjadi hubungan 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 UT B dan GT. Perubahan arah arus ditandai dengan tanda negatif pada I_1 dan I_4 pada sehingga persamaannya menjadi $-I_1 = I_3 - (I_2 - I_4)$. Pemodelan sistem dan rele diferensial saat hubungan singkat 3 phasa di Unit Board A dapat dilihat pada gambar 4.21.



Gambar 4.21 Permodelan Hubungan Singkat 2 Fasa di Bus UNIT BOARD A

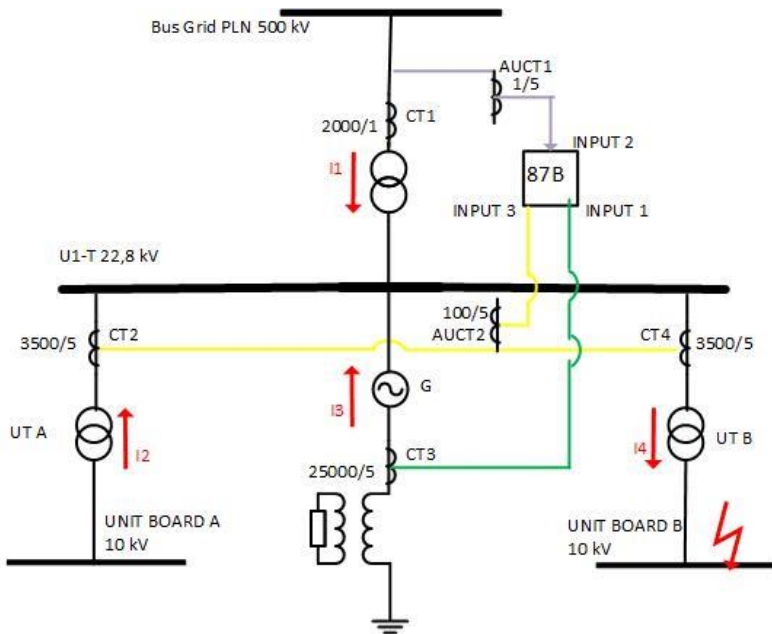
Arus yang mengalir pada sekunder CT

$$\begin{aligned}
 I_p &= I_s \\
 -I_1 &= I_3 - (I_2 - I_4) \\
 -\frac{210}{(2000/1) \times (1/5)} &= \frac{370}{25000/5} - \left(\frac{9}{(3500/5) \times (100/5)} - \frac{9}{(3500/5) \times (100/5)} \right) \\
 -0,53 &= 0,42 - (0,03 - 0,00064) \\
 -0,53 &= 0,39 \\
 I_{Res} &= \text{MAX} (|I_p|, |I_s|) \\
 I_{Res} &= \text{MAX} (|-0,53|, |0,39|) \\
 I_{Res} &= 0,53 \text{ A} \\
 I_{Diff} &= |I_p - I_s| \\
 &= |-0,53 - 0,39| \\
 &= 0,92 \text{ A} \\
 \text{Slope} &= \frac{I_{Diff}}{I_{Res}} \times 100\%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{0,92}{0,53} \times 100 \% \\
 &= 174,33 \%
 \end{aligned}$$

Kondisi Gangguan Eksternal di Bus UNIT BOARD B 2 Fasa

Saat terjadi hubungan singkat 2 fasa di Unit Board B, maka seluruh arus akan menuju titik gangguan yaitu Unit Board B. Hal tersebut menyebabkan perubahan arah arus pada UT A dan GT. Perubahan arah arus ditandai dengan tanda negatif pada I_1 dan I_4 pada sehingga persamaannya menjadi $-I_1 = I_3 - (-I_2 + I_4)$. Permodelan sistem dan rele diferensial saat hubungan singkat 2 fasa di Unit Board B dapat dilihat pada gambar 4.22.



Gambar 4.22 Permodelan Hubungan Singkat 2 Fasa di Bus UNIT BOARD B

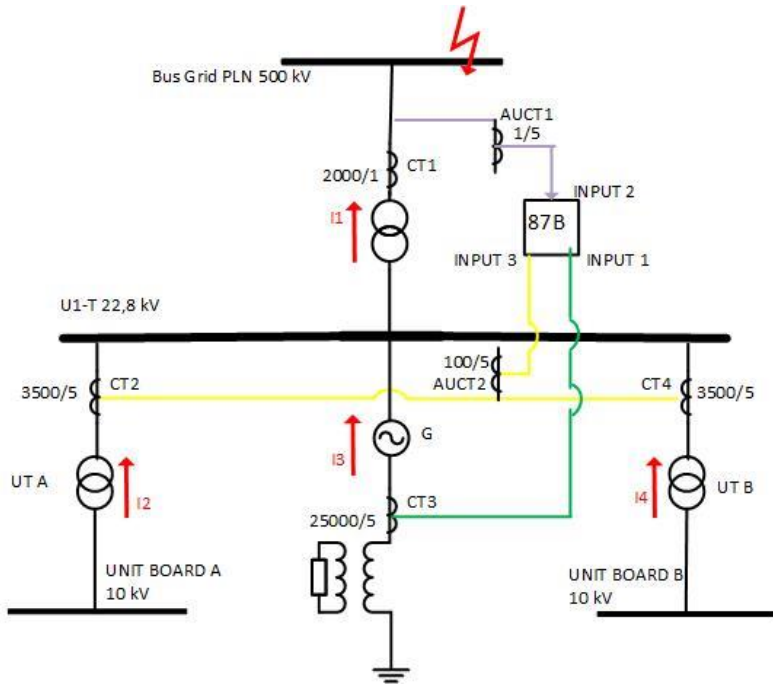
Arus yang mengalir pada sekunder CT

$$I_p = I_s$$

$$\begin{aligned}
-I_1 &= I_3 - (-I_2 + I_4) \\
-\frac{211}{(2000/1) \times (1/5)} &= \frac{2090}{25000/5} - \left(-\frac{6}{(3500/5) \times (100/5)} + \frac{671}{(3500/5) \times (100/5)} \right) \\
-0,53 &= 0,418 - (0,0004 - 0,048) \\
-0,53 &= 0,37 \\
I_{Res} &= \text{MAX} (|I_p|, |I_s|) \\
I_{Res} &= \text{MAX} (|-0,53|, |0,37|) \\
I_{Res} &= 0,53 \text{ A} \\
I_{Diff} &= |I_p - I_s| \\
&= |-0,52 - 0,37| \\
&= 0,89 \text{ A} \\
\text{Slope} &= \frac{I_{Diff}}{I_{Res}} \times 100\% \\
&= \frac{0,89}{0,53} \times 100\% \\
&= 170,24\%
\end{aligned}$$

Kondisi Gangguan Eksternal di Bus 500 kV 2 Phasa

Saat terjadi hubungan singkat 2 phasa di Bus 500kV, maka seluruh arus akan menuju titik gangguan yaitu Bus 500 kV. Hal tersebut menyebabkan perubahan arah arus pada UT A dan UT B. Perubahan arah arus ditandai dengan tanda negatif pada I_1 dan I_4 pada sehingga persamaannya menjadi $I_1 = I_3 - (-I_2 - I_4)$. Pemodelan sistem dan rele diferensial saat hubungan singkat 2 phasa di bus 500kV dapat dilihat pada gambar 4.23.



Gambar 4.23 Permodelan Hubungan Singkat 3 Phasa di Bus 500KV

Arus yang mengalir pada sekunder CT

$$I_p = I_s$$

$$I_1 = I_3 - (-I_2 - I_4)$$

$$\frac{54}{(2000/1) \times (1/5)} = \frac{30830}{25000/5} - \left(-\frac{3810}{(3500/5) \times (100/5)} - \frac{4350}{(3500/5) \times (100/5)} \right)$$

$$0,135 = 6,17 - (-0,27 - 0,31)$$

$$0,135 = 6,75$$

$$I_{Res} = \text{MAX} (|I_p|, |I_s|)$$

$$I_{Res} = \text{MAX} (|0,135|, |6,75|)$$

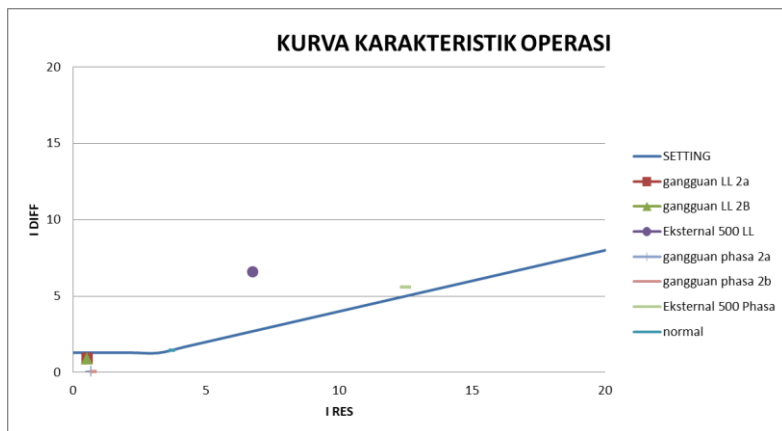
$$I_{Res} = 6,75 \text{ A}$$

$$I_{Diff} = |I_p - I_s|$$

$$= |0,135 - 6,75|$$

$$= 6,615 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \text{Slope} &= \frac{I_{Diff}}{I_{Res}} \times 100\% \\ &= \frac{6,615}{6,75} \times 100\% \\ &= 98\% \end{aligned}$$



Gambar 4.24 Kurva Karakteristik Operasi Kondisi Awal

Pada gambar diatas gangguan eksternal *Line to Line* dan 3 fasa 500KV berada diatas kuva karakteristik operasi sehingga rele akan memberikan perintah pada CB untuk *trip*, sehingga dapat dikatakan terdapat kesalahan pada penentuan *input tapping* rele. Untuk memperbaiki masalah tersebut diperlukan pengaturan ulang (*resetting*) *input tapping* rele sehingga pada gangguan eksternal tidak mengalami *trip* dan hanya gangguan internal saja yang mengalami *trip*.

4.7.2 Kondisi Pengaturan Ulang (*Resetting*)

Pemilihan Tap

Input 1 CT Tap	= 4,1 A
Input 2 CT Tap	= 7,3 A
Input 3 CT Tap	= 5 A
Slope	= 60%

$$\begin{aligned} I_P &= I_S \\ I_1 &= I_3 - (I_2 + I_4) \\ 7,3 &= 4,1 - (5) \end{aligned}$$

$$7,3 = -0,9$$

$$I_{Res} = MAX(|I_p|, |I_s|)$$

$$I_{Res} = MAX(|7,5|, |-0,9|)$$

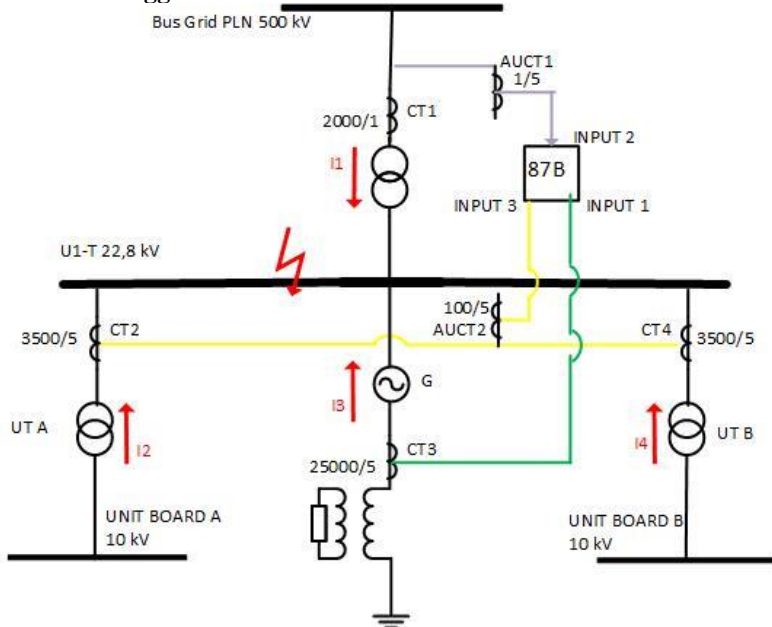
$$I_{Res} = 7,3 \text{ A}$$

$$I_{Diff} = |I_p - I_s|$$

$$= |7,5 + 0,9|$$

$$= 8,2 \text{ A}$$

Kondisi Gangguan Internal di Bus U1-AT 3 Fase



Gambar 4.25 Permodelan Hubungan Singkat 3 Fasa di Bus U1-AT

Arus yang mengalir pada sekunder CT

$$I_p = I_s$$

$$-I_1 = I_3 - (-I_2 - I_4)$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{6140}{(2000/1)X(1/5)} = \frac{106700}{25000/5} - \left(-\frac{7830}{\left(\frac{3500}{1}\right)X\left(\frac{100}{5}\right)} - \frac{88810}{(3500/1)X(100/5)} \right) \\
-30,7 & = 21,34 - (-0,56 - 0,64) \\
-30,7 & = 22,53 \\
I_{Res} & = MAX(|I_p|, |I_s|) \\
I_{Res} & = MAX(|-30,7|, |22,53|) \\
I_{Res} & = 22,53 \text{ A} \\
I_{Diff} & = |I_p - I_s| \\
& = |-30,7 - 22,53| \\
& = 53,23 \text{ A} \\
\text{Slope} & = \frac{53,23}{I_{Restrained}} \times 100\% \\
& = \frac{37,88}{22,53} \times 100\% \\
& = 173,38\%
\end{aligned}$$

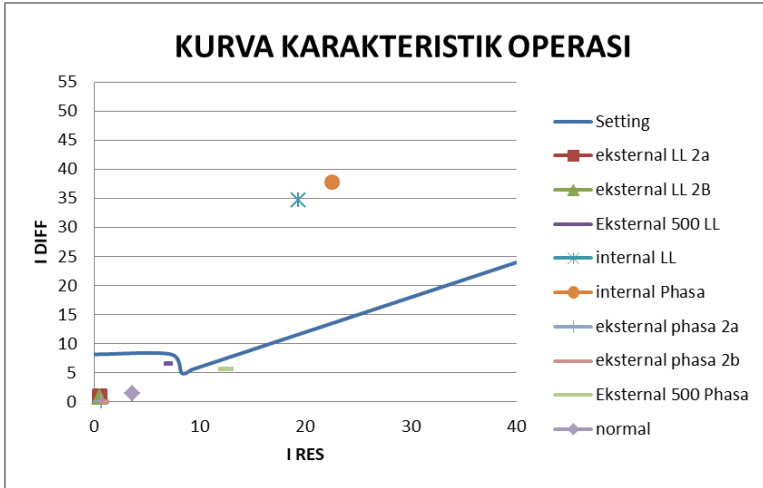
Kondisi Gangguan Internal di Bus U1-AT 2 Phasa

Untuk Permodelan Hubungan Singkat 3 Phasa dapat ditunjukkan pada gambar 4.25

Arus yang mengalir pada sekunder CT

$$\begin{aligned}
I_P & = I_S \\
-I_1 & = I_3 - (-I_2 - I_4) \\
-\frac{6140}{(2000/1)X(1/5)} & = \frac{93850}{25000/5} - \left(-\frac{4150}{(3500/5)X(100/5)} - \frac{4750}{(3500/5)X(100/5)} \right) \\
-30,7 & = 18,77 - (-0,3 - 0,34) \\
-30,7 & = 19,41 \\
I_{Res} & = MAX(|I_p|, |I_s|) \\
I_{Res} & = MAX(|-30,7|, |19,41|) \\
I_{Res} & = 15,7 \text{ A} \\
I_{Diff} & = |I_p - I_s| \\
& = |-30,7 - 19,41| \\
& = 50,11 \text{ A} \\
\text{Slope} & = \frac{I_{Diff}}{I_{Restrained}} \times 100\% \\
& = \frac{50,11}{15,7} \times 100\% \\
& = 163,21\%
\end{aligned}$$

Berikut merupakan kurva operasi rele:



Gambar 4.26 Kurva Karakteristik Operasi Kondisi Pengaturan ulang (*resetting*)

Dari gambar kurva karakteristik operasi hasil dari pengaturan (*setting*) diferensial rele saat terjadi gangguan eksternal, titik gangguan berada dibawah kurva operasi rele atau berada di zona zona *non-trip* sehingga rele tidak akan memerintahkan CB untuk *trip*. Sedangkan gangguan internal berada diatas kurva operasi atau berada di zona *trip* sehingga rele akan memerintahkan CB untuk *trip*.

4.8 Analisis Busur api (*arc flash*)

Analisis busur api (*arc flash*) berguna untuk mengetahui nilai insiden energi dengan menggunakan standar IEEE 1584-2002 pada kondisi sistem pengaturan awal (*existing*) dan pengaturan ulang (*resetting*).

4.8.1 Hasil Simulasi Insiden Energi Busur api (*arc flash*) Dan Flash Protection Boundary Existing

Untuk dapat mengetahui nilai energi busur api (*arc flash*) di PT. PLTU TANJUNG JATI B JEPARA dapat menggunakan ETAP. 12.6.0 menggunakan standar IEEE 1584-2002. Pada sub bab ini, akan ditampilkan data hasil simulasi besarnya insiden energi busur api (*arc flash*) pada bus-bus sistem serta besarnya arus *bolted fault*, arus *arcng*, FCT (*Fault Clearing Time*), dan kategori bahaya. Hasil simulasi insiden

energi busur api (*arc flash*) pada masing-masing bus dapat dilihat pada tabel 4.4 berikut.

Tabel 4. 3 Simulasi Insiden Energi Busur api (*arc flash*) Pengaturan awal (*existing*)

ID Bus	<i>Bolted Fault Current (kA)</i>	<i>Arching Fault (kA)</i>	<i>Insiden energi (cal/cm²)</i>	<i>Fault Clearing Time (s)</i>	<i>Energy Level</i>	<i>FPB (ft)</i>
10KvUnit Board 1A	29,26	27,88	43,64	0,877	4	120,47
10KvUnit Board 1B	32,14	30,58	48,38	0,88	4	133,94
10KvUnit Board 2A	32,77	31,17	48,83	0,87	4	135,21
10KvUnit Board 2B	35	33,25	52,49	0,872	4	145,64
Station Board A	32,77	31,17	16,44	0,293	2	44,18
Station Board B	35	33,25	15,11	0,251	2	40,5
3KvUnit Board 1A	16,66	16,03	28,51	1,176	3	77,76
3KvUnit Board 1B	15,99	15,39	25,57	1,102	3	69,55
3KvUnit Board 2A	17,35	16,68	27,86	1,101	3	75,96
3KvUnit Board 2B	18,15	17,43	25,91	0,976	3	70,5

Dari hasil simulasi insiden energi busur api (*arc flash*) pada sistem *existing*, semua bus masih terdapat pada level energy yang dapat didefinisikan dan direpresentasikan alat pelindung dirinya berdasarkan standar NFPA 70E 2015. Sehingga dalam kasus ini, pengaturan ulang (*resetting*) pada sistem koordinasi proteksi diperlukan untuk mendapatkan nilai insiden energi busur api (*arc flash*) yang lebih rendah.

4.8.2 Nilai Insiden Energi Busur api (*arc flash*) Dan Flash Protection Boundary Pengaturan ulang (*resetting*)

Perhitungan energi busur api untuk bus menggunakan metode standar IEEE 1584-2002.

Bus 10KvUnit Board 1A

Perhitungan Arus busur (arcing current)

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

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \lg(29,26)$$

$$\lg I_a = 1,45$$

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

$$I_a = 10^{1,44}$$

$$I_a = 27,88 \text{ kA}$$

Perhitungan Insiden energi

$$\lg E_n = 0,555 - 0,133 + (1,081 \times \lg I_a) + (0,0011 + \text{gap})$$

$$\lg E_n = 0,555 - 0,133 + (1,081 \times 1,45) + (0,0011 + 247,7)$$

$$\lg E_n = 1,17$$

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

$$E_n = 10^{1,17}$$

$$E_n = 14,67$$

$$I_E = E_n X \left(\frac{t}{0,2} \right) X \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}} \right)$$

$$I_E = 14,67 X \left(\frac{0,34}{0,2} \right) X \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}} \right)$$

$$I_E = 16,91$$

Perhitungan Flash Protection Boundary

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

$$D_B = \left[4,184 \times 1 \times 14,67 \left(\frac{0,34}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 13865,69 \text{ mm}$$

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

$$D_B = 45,49 \text{ ft}$$

Bus 10KvUnit Board 1B

Perhitungan Arus busur (arcing current)

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

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \lg(32,14)$$

$$\lg I_a = 1,485$$

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

$$I_a = 10^{1,49}$$

$$I_a = 30,58 \text{ kA}$$

Perhitungan Insiden energi

$$lg E_n = 0,555 - 0,133 + (1,081 \times lg I_a) + (0,0011 + \text{gap})$$

$$lg E_n = 0,555 - 0,133 + (1,081 \times 1,49) + (0,0011 + 247,7)$$

$$lg E_n = 1,21$$

$$E_n = 10^{lg E_n}$$

$$E_n = 10^{1,21}$$

$$E_n = 16,23$$

$$I_E = E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$I_E = 16,23 \times \left(\frac{0,34}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$I_E = 18,69$$

Perhitungan Flash Protection Boundary

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

$$D_B = \left[4,184 \times 1 \times 16,23 \left(\frac{0,34}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 15362,73 \text{ mm}$$

(1 mm = 0,00328084 ft)

$$D_B = 50,4 \text{ ft}$$

Bus 10Kv Unit Board 2A

Perhitungan Arus busur (arcing current)

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

$$lg I_a = 0,00402 + 0,983 lg(32,77)$$

$$lg I_a = 1,493$$

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

$$I_a = 10^{1,49}$$

$$I_a = 31,17 \text{ kA}$$

Perhitungan Insiden energi

$$lg E_n = 0,555 - 0,133 + (1,081 \times lg I_a) + (0,0011 + \text{gap})$$

$$lg E_n = 0,555 - 0,133 + (1,081 \times 1,493) + (0,0011 + 247,7)$$

$$lg E_n = 1,22$$

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

$$E_n = 10^{1,22}$$

$$E_n = 16,57$$

$$I_E = E_n X \left(\frac{t}{0,2} \right) X \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}} \right)$$

$$I_E = 16,23 X \left(\frac{0,34}{0,2} \right) X \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}} \right)$$

$$I_E = 19,08$$

Perhitungan Flash Protection Boundary

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

$$D_B = \left[4,184 \times 1 \times 16,57 \left(\frac{0,34}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 15691,9 \text{ mm}$$

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

$$D_B = 51,48 \text{ ft}$$

Bus 10Kv Unit Board 2B

Perhitungan Arus busur (arcing current)

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

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \lg(35)$$

$$\lg I_a = 1,52$$

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

$$I_a = 10^{1,52}$$

$$I_a = 33,25 \text{ kA}$$

Perhitungan Insiden energi

$$\lg E_n = 0,555 - 0,133 + (1,081 \times \lg I_a) + (0,0011 + \text{gap})$$

$$\lg E_n = 0,555 - 0,133 + (1,081 \times 1,52) + (0,0011 + 247,7)$$

$$\lg E_n = 1,23$$

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

$$E_n = 10^{1,23}$$

$$E_n = 17,77$$

$$I_E = E_n X \left(\frac{t}{0,2} \right) X \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}} \right)$$

$$I_E = 17,77 X \left(\frac{0,34}{0,2} \right) X \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}} \right)$$

$$I_E = 20,46$$

Perhitungan Flash Protection Boundary

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

$$D_B = \left[4,184 \times 1 \times 17,77 \left(\frac{0,34}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 16861,67 \text{ mm}$$

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

$$D_B = 55,3 \text{ ft}$$

Bus 10Kv Station Board A

Perhitungan Arus busur (arcing current)

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

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \lg(32,77)$$

$$\lg I_a = 1,49$$

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

$$I_a = 10^{1,49}$$

$$I_a = 31,17 \text{ kA}$$

Perhitungan Insiden energi

$$\lg E_n = 0,555 - 0,133 + (1,081 \times \lg I_a) + (0,0011 + \text{gap})$$

$$\lg E_n = 0,555 - 0,133 + (1,081 \times 1,49) + (0,0011 + 247,7)$$

$$\lg E_n = 1,22$$

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

$$E_n = 10^{1,22}$$

$$E_n = 16,57$$

$$I_E = E_n X \left(\frac{t}{0,2} \right) X \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}} \right)$$

$$I_E = 16,57 X \left(\frac{0,14}{0,2} \right) X \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}} \right)$$

$$I_E = 7,86$$

Perhitungan Flash Protection Boundary

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

$$D_B = \left[4,184 \times 1 \times 16,57 \left(\frac{0,14}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 6304,22 \text{ mm}$$

(1 mm=0,00328084 ft)

$D_B=20,68$ ft

Bus 10Kv Station Board B

Perhitungan Arus busur (arcing current)

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

$$\lg I_a=0,00402+0,983 \lg(35)$$

$$\lg I_a=1,52$$

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

$$I_a=10^{1,52}$$

$$I_a=33,25 \text{ kA}$$

Perhitungan Insiden energi

$$\lg E_n=0,555-0,133+(1,081 \times \lg I_a)+(0,0011+\text{gap})$$

$$\lg E_n=0,555-0,133+(1,081 \times 1,52)+(0,0011+247,7)$$

$$\lg E_n=1,25$$

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

$$E_n=10^{1,25}$$

$$E_n=17,77$$

$$I_E=E_n X \left(\frac{t}{0,2} \right) X \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}} \right)$$

$$I_E=17,77 \left(\frac{0,14}{0,2} \right) X \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}} \right)$$

$$I_E=8,43$$

Perhitungan Flash Protection Boundary

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

$$D_B=\left[4,184 \times 1 \times 17,77 \left(\frac{0,14}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B=6774,18 \text{ mm}$$

(1 mm=0,00328084 ft)

$$D_B=22,22 \text{ ft}$$

Bus 3Kv Unit Board 1A

Perhitungan Arus busur (arcing current)

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

$$\lg I_a=0,00402+0,983 \lg(16,66)$$

$$\lg I_a=1,2$$

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

$$I_a = 10^{1,2}$$

$$I_a = 16,03 \text{ kA}$$

Perhitungan Insiden energi

$$lg E_n = 0,555 - 0,133 + (1,081 \times lg I_a) + (0,0011 + \text{gap})$$

$$lg E_n = 0,555 - 0,133 + (1,081 \times 1,2) + (0,0011 + 200)$$

$$lg E_n = 0,85$$

$$E_n = 10^{lg E_n}$$

$$E_n = 10^{0,85}$$

$$E_n = 7,15$$

$$I_E = E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$I_E = 7,15 \times \left(\frac{0,676}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$I_E = 16,38$$

Perhitungan Flash Protection Boundary

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

$$D_B = \left[4,184 \times 1 \times 7,15 \left(\frac{0,676}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 13416,4 \text{ mm}$$

(1 mm = 0,00328084 ft)

$$D_B = 44,02 \text{ ft}$$

Bus 3Kv Unit Board 1B

Perhitungan Arus busur (arcing current)

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

$$lg I_a = 0,00402 + 0,983 lg(15,99)$$

$$lg I_a = 1,19$$

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

$$I_a = 10^{1,19}$$

$$I_a = 15,39 \text{ kA}$$

Perhitungan Insiden energi

$$lg E_n = 0,555 - 0,133 + (1,081 \times lg I_a) + (0,0011 + \text{gap})$$

$$lg E_n = 0,555 - 0,133 + (1,081 \times 1,19) + (0,0011 + 200)$$

$$lg E_n = 0,84$$

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

$$E_n = 10^{0,84}$$

$$E_n = 6,85$$

$$I_E = E_n X \left(\frac{t}{0,2} \right) x \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}} \right)$$

$$I_E = 6,85 X \left(\frac{0,562}{0,2} \right) x \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}} \right)$$

$$I_E = 13,04$$

Perhitungan Flash Protection Boundary

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

$$D_B = \left[4,184 \times 1 \times 6,85 \left(\frac{0,562}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 10610,39 \text{ mm}$$

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

$$D_B = 34,81 \text{ ft}$$

Bus 3Kv Unit Board 2A

Perhitungan Arus busur (arcing current)

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

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \lg(17,35)$$

$$\lg I_a = 1,22$$

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

$$I_a = 10^{1,22}$$

$$I_a = 16,68 \text{ kA}$$

Perhitungan Insiden energi

$$\lg E_n = 0,555 - 0,133 + (1,081 \times \lg I_a) + (0,0011 + \text{gap})$$

$$\lg E_n = 0,555 - 0,133 + (1,081 \times 1,22) + (0,0011 + 200)$$

$$\lg E_n = 0,87$$

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

$$E_n = 10^{0,87}$$

$$E_n = 7,47$$

$$I_E = E_n X \left(\frac{t}{0,2} \right) x \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}} \right)$$

$$I_E = 7,47 X \left(\frac{0,637}{0,2} \right) x \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}} \right)$$

$$I_E = 16,12$$

Perhitungan Flash Protection Boundary

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

$$D_B = \left[4,184 \times 1 \times 7,47 \left(\frac{0,637}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 13193,52 \text{ mm}$$

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

$$D_B = 43,28 \text{ ft}$$

Bus 3Kv Unit Board 2B

Perhitungan Arus busur (arcing current)

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

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \lg(18,15)$$

$$\lg I_a = 1,24$$

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

$$I_a = 10^{1,24}$$

$$I_a = 17,44 \text{ Ka}$$

Perhitungan Insiden energi

$$\lg E_n = 0,555 - 0,133 + (1,081 \times \lg I_a) + (0,0011 + \text{gap})$$

$$\lg E_n = 0,555 - 0,133 + (1,081 \times 1,24) + (0,0011 + 200)$$

$$\lg E_n = 0,89$$

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

$$E_n = 10^{0,89}$$

$$E_n = 7,84$$

$$I_E = E_n X \left(\frac{t}{0,2} \right) X \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}} \right)$$

$$I_E = 7,84 X \left(\frac{0,504}{0,2} \right) X \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}} \right)$$

$$I_E = 13,38$$

Perhitungan Flash Protection Boundary

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

$$D_B = \left[4,184 \times 1 \times 7,84 \left(\frac{0,504}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 10894,56 \text{ mm}$$

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

$$D_B=35,74 \text{ ft}$$

4.9 Nilai *Exsisting* Dibanding Pengaturan ulang (*resetting*) Dengan Standar IEEE 1584-2002.

Setelah dilakukan perhitungan dengan menggunakan standar IEEE 1584-2002 pada sistem pengaturan ulang (*resetting*), perbedaan insiden energi busur api (*arc flash*) dapat dilihat pada tabel 4.5 berikut.

Tabel 4.4 Perbandingan Insiden Energi Simulasi Pengaturan awal (*exsisting*) Dengan Perhitungan Pengaturan ulang (*resetting*) Menggunakan Standar IEEE 1584-2002

ID Bus	Simulasi Insiden energi (cal/cm^2) pengaturan awal (<i>exsisting</i>)	Kategori Energi	Perhitung an Insiden energi (cal/cm^2) Pengatura n ulang (<i>resetting</i>)	Kategori Energi
10KvUnit Board 1A	43,64	4	16,92	2
10KvUnit Board 1B	48,38	4	18,69	2
10KvUnit Board 2A	48,83	4	19,1	2
10KvUnit Board 2B	52,49	4	20,46	2
Station Board A	16,44	2	7,8	1
Station Board B	15,11	2	8,43	2
3KvUnit Board 1A	28,51	3	16,38	2
3KvUnit Board 1B	25,57	3	13,04	2
3KvUnit Board 2A	27,86	3	16,12	2
3KvUnit Board 2B	25,91	3	13,38	2

Dari tabel tersebut, ditampilkan data nilai insiden energi busur api (*arc flash*) pengaturan awal (*existing*) untuk simulasi dengan standard IEEE 1584-2002 dibandingkan dengan perhitungan dengan pengaturan ulang (*resetting*) untuk perhitungan dengan standar IEEE1584-2002. Tabel tersebut menunjukkan bahwa pada bus pada setiap bus mengalami penurunan insiden energidan penurunan kategori energi kecuali pada bus Station Board B hanya mengalami penurunan insiden energitetapi tetap pada kategori energi 2.

4.10 Perbandingan FPB dan Personal Protective Equipment

Hasil perhitungan FPB (*flash protection boundary*) dari pengaturan ulang (*resetting*) lebih kecil dibandingkan dengan hasil pengaturan awal (*existing*). sehingga, jarak aman pekerja dari titik bahaya busur api (*arc flash*) lebih dekat. Perbandingan FPB perhitungan standar IEEE 1584-2002 dengan pengaturan awal (*existing*) dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Perbandingan FPB (*flash protection boundary*) Simulasi Pengaturan awal (*existing*) Dengan Perhitungan Pengaturan ulang (*resetting*) Menggunakan Standar IEEE 1584-2002

ID Bus	FPB Pengaturan awal (<i>existing</i>) Simulasi (ft)	FPB Pengaturan ulang (<i>resetting</i>) Standar (ft)
10KvUnit Board 1A	120,47	45,49
10KvUnit Board 1B	133,94	50,4
10KvUnit Board 2A	135,21	51,48
10KvUnit Board 2B	145,64	55,3
Station Board A	44,18	25,1
Station Board B	40,49	23,53
3KvUnit Board 1A	77,76	44,02
3KvUnit Board 1B	64,55	34,81
3KvUnit Board 2A	75,96	43,29
3KvUnit Board 2B	70,5	35,74

4.10.1 Perbandingan PPE Pengaturan ulang (*resetting*) Dengan Pengaturan awal (*existing*).

Perlengkapan keselamatan kerja atau *personal protective equipment*(PPE) adalah alat pelindung diri (APD) bagi pekerja yang wajib digunakan saat bekerja pada daerah yang bertegangan dan beresiko timbul busur api. Berdasarkan standar NFPA 70E dengan memperhatikan kategori bahaya atau resiko busur api, maka Perlengkapan keselamatan kerja atau *personal protective equipment*(PPE) dikategorikan berdasarkan besar insiden energi pada busur api.

Setelah mengetahui besar insiden energi busur api di daerah kerja bertegangan, maka pekerja wajib untuk menggunakan PPE yang sesuai saat bekerja di daerah bertegangan tersebut. Hal ini dilakukan untuk mengurangi dampak dari busur api yang mungkin timbul. Jenis PPE yang harus digunakan berdasarkan kategori energi busur api (*arc flash*) berdasarkan perhitungan standar IEEE 1584-2002 pada kondisi pengaturan ulang (*resetting*) dapat dilihat pada tabel 4.7 berikut.

Tabel 4.7 Jenis PPE Berdasarkan Kategori Energi Busur api (*arc flash*) Kondisi pengaturan awal (*existing*)

ID Bus	Insiden Energi (cal/cm^2)	Kategori Energi	Jenis PPE	
			Pakaian	Perlatan pelindung
10KvUnit Board 1A	43,64	4	Kemeja lengan panjang dan celana dengan arc rating Hood suit atau pelindung wajah, dengan arc rating dan balaclava,	Topi, Kacamata pengaman atau kacamata keselamatan (SR), Pelindung pendengaran (sisipan saluran saluran telinga), Sarung tangan kulit, Alas kaki
10KvUnit Board 1B	48,38	4	Jaket, jaket, jas hujan dengan arc rating	

Tabel 4.7 (Lanjutan) Jenis PPE Berdasarkan Kategori Energi Busur api (*arc flash*) Kondisi pengaturan awal (*exsisting*)

ID Bus	Insiden Energi (cal/cm^2)	Kategori Energi	Jenis PPE	
			Pakaian	Perlatan pelindung
10KvUnit Board 2A	48,83	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 saluran telinga), Sarung tangan kulit, Alas kaki kulit.
10KvUnit Board 2B	52,49	4		
Station Board A	16,44	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
Station Board B	15,11	2		

Tabel 4.7 (Lanjutan) Jenis PPE Berdasarkan Kategori Energi Busur api (*arc flash*) Kondisi pengaturan awal (*existing*)

ID Bus	Insiden Energi (cal/cm^2)	Kategori Energi	Jenis PPE	
			Pakaian	Perlengkapan pelindung
3KvUnit Board 1A	28,51	3	Kemeja lengan panjang dan Celana dengan arc rating	Topi, Kacamata pengaman atau kacamata keselamatan (SR)
3KvUnit Board 1B	25,57	3	Jaket setelan arcflash dengan pengenalan busur	Pelindung pendengaran (sisipan saluran telinga)
3KvUnit Board 2A	27,86	3	Celana arc suit flash, Hood suit busur api (<i>arc flash</i>) dengan nilai arc rating	Sepatu kulit
3KvUnit Board 2B	25,91	3	Sarung tangan dengan arc raing, Jaket, jaket, jas hujan, atau topi	

Sedangkan jenis PPE yang harus digunakan berdasarkan kategori energi busur api (*arc flash*) pada kondisi pengaturan ulang (*resetting*) berdasarkan perhitungan standar IEEE 1584-2002 dapat dilihat pada tabel 4.10.

Tabel 4.8 Jenis PPE Berdasarkan Kategori Energi Busur api (*arc flash*) Kondisi Pengaturan ulang (*resetting*) Berdasarkan Perhitungan Standar IEEE 1584-2002

ID Bus	Insiden Energi (cal/cm^2)	Kategori Energi	Jenis PPE	
			Pakaian	Perlatan Pelindung
10KvUnit Board 1A	45,49	2	Kemeja lengan panjang dan Celana dengan arc rating Jaket setelan arcflash dengan pengenal busur Celana arc suit flash, Hood suit busur api (<i>arc flash</i>) 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
10KvUnit Board 1B	50,4	2		
10KvUnit Board 1A	51,48	2		
10KvUnit Board 2B	55,3	2		

Tabel 4.8(Lanjutan) Jenis PPE Berdasarkan Kategori Energi Busur api (*arc flash*) Kondisi Pengaturan ulang (*resetting*) Berdasarkan Perhitungan Metode Modifikasi

ID Bus	Insiden Energi (cal/cm^2)	Kategori Energi	Jenis PPE	
			Pakaian	Perlatan Pelindung
3KvUnit Board 1A	16,38	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
3KvUnit Board 1B	13,04	2		
3KvUnit Board 2A	16,12	2		
3KvUnit Board 2B	13,38	2		
Station Board B	8,43	2		
Station Board A	7,86	1	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.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan pada PT. PLTU TANJUNG JATI B JEPARA dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada rele arus lebih 1,2,3,4 terdapat kesalahan yaitu pengaturan (*setting*) waktu kerja (*time dial*) pada kurva TOC yang terlalu besar sehingga waktu rele untuk mengamankan peralatan terlalu lama.
2. Pada rele arus lebih 1,2,3,4 terdapat kesalahan yaitu pengaturan (*setting*) waktu kerja (*time dial*) pada kurva IOC yang terlalu singkat yaitu 0,05.
3. Pada rele gangguan tanah terdapat kesalahan pada waktu tunda (*time delay*) yang terlalu lama dan selisih waktu yang terlalu besar pada rele SW 2A dengan rele *backup* sebesar 0,6 s.
4. Setelah dilakukan pengaturan ulang (*resetting*) koordinasi pada rele pengamanan, terjadi penurunan level insiden energi busur api dari level maksimal menjadi level rendah dikarenakan waktu operasi rele dalam mengamankan gangguan (FCT) semakin cepat.
5. Pada rele diferensial terdapat kesalahan pemilihan *tap* yang menyebabkan rele bekerja saat terjadi gangguan eksternal 2 phase pada bus 500 kV. Rekomendasi pengaturan (*setting*) rele diferensial adalah Input 1 CT Tap = 4,1 A, Input 2 CT Tap = 7,3 A, Input 3 CT Tap = 5 A, Slope = 60%.

5.2 Saran

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

1. Dari pengaturan ulang (*resetting*) rele pengamanan dengan mempertimbangkan energi busur api pada tugas akhir ini dapat dijadikan pertimbangan dan referensi untuk melakukan pengaturan ulang (*resetting*) yang sebenarnya.
2. Setelah diketahui nilai energi pada setiap daerah kerja, maka diharapkan para pekerja dapat menggunakan PPE sesuai

dengan kategori level insiden energi pada daerah kerja tersebut pada saat melakukan pekerjaan di area tersebut.

3. Pemilihan spesifikasi rele didasarkan pada I_{Diff} dan slope saat terjadi gangguan eksternal 2 phasa dan 3 phasa.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. The Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc, "IEEE Recommended Practice for Calculating Short - Circuit Current in Industrial and Commercial Power System," USA, 2006
- [2]. Vassilis C. Nikolaidis, Member, IEEE, Evangelos Papanikolaou, and Anastasia S. Safigianni, Senior Member, IEEE, "A *Communication-Assisted Overcurrent Protection Scheme for Radial Distribution Systems With Distributed Generation*", IEEE, 2015
- [3]. 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
- [4]. Simms, J., Johnson, G., "*Protective Relaying Methods for Reducing Busur api (arc flash) Energy*", IEEE Transaction On Industry Applications, Vol. 49, No. 2, pp 803, April, 2013
- [5]. Juergen Schlabbach, Karl-Heinz Rofalski, "*Power System EGINEERING*", Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, Boschter., Germany, 2014
- [6]. Lazar, Irwin., "Electrical Systems Analysis and Design For Industrial Plants", McGraw-Hill Book Company, 1980.
- [7]. IEEE Std. 1584-2002., "IEEE Guide for Performing Busur api (*arc flash*) Hazard Calculation", Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc 2002.

Halaman ini sengaja dikosongkan

INDEX

D

damage, 27, 48
delay, v, vii, 10, 24, 27, 29, 31,
32, 37, 38, 39, 42, 44,
45, 48, 50, 51, 54, 55,
56, 97
diferensial , v, vii, 1, 2, 3, 12,
59, 80, 97

E

pengaturan awal (existing), 3,
25, 27, 28, 33, 35, 40,
42, 46, 48, 54, 57, 80,
90, 91, 92, 93, 94

F

FPB, xiii, 81, 91

G

ground, 97

I

I_{diff} , 59
instantaneous, 53
IOC, 27, 35, 42, 48, 97

I_{res} , 59

O

overcurrent, 8, 97

P

PPE, v, vii, xi, xiii, xv, 1, 16,
17, 18, 91, 92, 93, 94,
95, 96, 97

R

pengaturan ulang (resetting), 2,
25, 28, 32, 33, 35, 39,
40, 42, 45, 46, 48, 55,
56, 57, 72, 80, 81, 90,
91, 92, 94, 97

S

slope, 59, 97

T

tipikal, 23, 24, 25, 27, 28, 32,
33, 35, 39, 40, 42, 45,
46, 48, 53
TOC, 42, 97
trip, 8, 72, 80

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Firdaus Yusuf Kurniawan, dilahirkan di Kudus pada tanggal 12 November 1996. Merupakan anak tiga dari lima bersaudara dari pasangan Bapak Bambang Gunarjo dan Ibu Sri Sulasmi. Menempuh jenjang pendidikan SD Negeri 4Jatiwetan (2002 - 2008), SMP N 1 Jati Kudus (2008-20011), SMK Wisudha Karya Kudus (2011-2014). Setelah lulus dari SMA, penulis melanjutkan pendidikan di Diploma 3 Teknik Elektro Universitas Gadjah Mada dan mengambil bidang Power. Setelah lulus pada tahun 2017, penulis melanjutkan pendidikan program strata-1 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS Surabaya) pada tahun 2017 dengan mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga.

email : fyusuf3@gmail.com

[phone/\(wa\) :085641771617](tel:085641771617)