

**PENGATURAN ULANG RELE ARUS LEBIH
SEBAGAI PENGAMAN UTAMA *COMPRESSOR*
PADA *FEEDER* 2F PT. AJINOMOTO MOJOKERTO**

**SKRIPSI
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO**

Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh:
BAGUS IBNU PRATAMA
NIM. 0810630036 - 63

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2013**

LEMBAR PERSETUJUAN

**PENGATURAN ULANG RELE ARUS LEBIH
SEBAGAI PENGAMAN UTAMA *COMPRESSOR*
PADA *FEEDER* 2F PT. AJINOMOTO MOJOKERTO**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

BAGUS IBNU PRATAMA

NIM. 0810630036 - 63

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Drs. Ir. Moch. Dhofir, MT.

NIP. 1960701 199002 1 001

Ir. Hery Purnomo, MT.

NIP. 19550708 198212 1

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb.

Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT karena hanya dengan berkat rahmat, barokah dan hidayah-Nyapenulis dapat menyelesaikan penelitian ini dengan judul "Pengaturan Ulang Rele Arus Lebih sebagai Pengaman Utama *Compressor* pada *Feeder* 2F PT. Ajinomoto Mojokerto". Penelitian disusun untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik, di Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

Skripsi ini membahas mengenai penyetelan ulang rele arus lebih sebagai pengaman utama. Meliputi perhitungan impedansi dan analisis komponen simetri, perhitungan dan analisis gangguan hubung singkat pada motor dan simulasi kerja rele arus lebih pada ETAP. Dengan setelan setelah analisis dan perhitungan diharapkan tidak terjadi kembali kesalahan lokalisasi gangguan.

Banyak kendala yang dihadapi penulis dalam penyelesaian skripsi ini, seperti terkendalanya literatur mengenai permasalahan serta metode yang digunakan untuk menganalisis permasalahan. Namun, semua itu dapat diatasi berkat bantuan dari pihak-pihak yang telah meluangkan waktu untuk membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak tersebut diantaranya :

1. Bapak Dr. Ir. Soleh Hadi Pramono M.S., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro.
2. Bapak M. Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro.
3. Bapak Mochammad Rif'an S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro.
4. Bapak Drs. Ir. Moch. Dhofir, MT. Dan Bapak Ir. Hery Purnomo, MT. selaku dosen pembimbing skripsi.
5. Ibu dan Bapak atas segala bentuk cinta kasihnya kepadaku yang terwujud dalam bentuk materil, doa dan perjuangannya yang tidak terkira nilainya.
6. Rekan-rekan Teknik Energi Elektrik 2008 yang tidak dapat disebutkan satu-satu namanya.
7. Rekan-rekan mahasiswa Teknik Elektro Universitas Brawijaya, khususnya rekan-rekan mahasiswa Concorde 2008.



8. Kandar, Memi, Bebe, Aho, Uping, Raga, Surya, Aho, Yuda dkk. Yang telah memotivasi saya untuk menyelesaikan penelitian ini.
9. Bapak Nurbuana, Bapak Anton, beserta semua anggota Utility PT. Ajinomoto
10. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.

Di dalam penulisan skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan, baik itu dalam materi yang ditulis serta sistematika penulisannya. Oleh karena itu, saran dan kritik masih sangat diharapkan agar skripsi ini dapat menjadi karya tulis yang mendekati sempurna. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Malang, April 2013

Penulis



DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI	iii
ABSTRAK	x
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Hipotesis.....	2
1.4 Ruang Lingkup.....	2
1.5 Tujuan.....	3
1.6 Manfaat.....	3
1.7 Sistematika Penulisan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Sistem Proteksi pada Sistem Tenaga Listrik.....	4
2.2 Gangguan-gangguan pada Sistem Tenaga Listrik.....	4
2.3 Sebab-sebab Timbulnya Gangguan pada Sistem Tenaga Listrik	6
2.3.1 Gangguan Beban Lebih.....	6
2.3.2 Gangguan Tegangan Lebih	6
2.3.3 Gangguan Hubung Singkat	6



2.4 Rele Sebagai Peralatan Pengaman	8
2.5 Rele Arus Lebih dan Aplikasinya	9
2.5.1 Rele Arus Lebih Waktu Instan.....	10
2.5.2 Rele Arus Lebih Waktu Tertentu.....	10
2.5.3 Rele Arus Lebih Waktu Invers.....	11
2.6 Penyetelan Rele Arus Lebih	12
2.7 Rele Arus Lebih Tipe COC4-A02D1	12
2.8 Koordinasi Arus dan Waktu pada Rele Arus Lebih	15
2.9 Sistem Per Unit (pu)	15
2.10 Arus Gangguan Hubung Singkat	17
2.10.1 Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah.....	17
2.10.2 Hubung Singkat Antar Fasa.....	19
2.10.3 Hubung Singkat Tiga Fasa.....	21
2.10.4 Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah.....	22
2.11 Komponen Simetris	22
2.12 Metode Perhitungan Impedansi	25
2.12.1 Perhitungan Impedansi Transformator.....	25
2.13 Pengenalan ETAP.....	26
BAB III METODE PENELITIAN	28
3.1 Studi Literatur	28

3.2 Pengambilan Data	29
3.3 Prosedur Perhitungan	29
3.4 Pemodelan dan Simulasi.....	29
3.5 Diagram Alir Perhitungan	30
3.6 Pengambilan Kesimpulan dan Saran.....	30
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....	31
4.1 Sistem Pembangkit.....	31
4.2 Sistem Distribusi <i>Feeder</i> 2F	32
4.2.1 Data Motor	33
4.2.2 Data Kabel	33
4.2.3 Data Rele Arus Lebih.....	34
4.3 Pengolahan data	34
4.3.1 Perhitungan Impedansi Transformator	34
4.3.2 Perhitungan Impedansi Motor.....	34
4.3.3 Perhitungan Impedansi Kabel	35
4.4 Perhitungan Nilai Impedansi Urutan pada Titik Gangguan.....	36
4.4.1 Analisis Nilai Impedansi Urutan Positif pada Titik Gangguan	36
4.4.2 Analisis Nilai Impedansi Urutan Negatif pada Titik Gangguan.....	36
4.4.3 Analisis Nilai Impedansi Urutan Nol pada Titik Gangguan.....	37
4.4.4 Analisis Nilai Impedansi Urutan pada Titik Gangguan.....	37
4.5 Analisis Gangguan Hubung Singkat	38
4.5.1 Analisis Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa	38
4.5.2 Analisis Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa	39
4.5.3 Analisis Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah.....	39
4.5.4 Analisis Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah	40
4.6 Setelan Rele Arus Lebih Sebagai Pengaman Utama Motor	41
4.6.1 Setelan Arus	41
4.6.2 Setelan Waktu	42
4.7 Simulasi Kerja Rele Menggunakan ETAP 7.0	44
4.7.1 Setelan Rele Arus Lebih sebagai Pengaman Utama	45
4.7.2 Koordinasi Rele Pengaman Utama dengan Pengaman Cadangan.....	48

BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN	53
5.1	Kesimpulan	53
5.2	Saran	53
	DAFTAR PUSTAKA	54
	LAMPIRAN.....	55



DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Instan.....	10
Gambar 2.2 Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Tertentu	10
Gambar 2.3 Karakteristik <i>Standard Inverse</i> , <i>Very Inverse</i> dan <i>Extremely Inverse</i>	11
Gambar 2.4 Grafik Karakteristik Waktu Kerja Rele Arus Lebih Tipe COC4-A02D1... 13	13
Gambar 2.5 Grafik Karakteristik Waktu Operasi Rele Arus Lebih Tipe COC4-A02D114	14
Gambar 2.6 Koordinasi setelan arus dan waktu	15
Gambar 2.7 Gelombang Arus Hubung Singkat.....	17
Gambar 2.8 Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah	18
Gambar 2.9 Hubungan Jala-Jala Urutan Gangguan Satu Fasa ke Tanah	19
Gambar 2.10 Gangguan hubung singkat antar fasa	20
Gambar 2.11 Rangkaian Ekvivalen Urutan Gangguan Antar Fasa	21
Gambar 2.12 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa	21
Gambar 2.13 Gangguan Hubung Singkat 2 Fasa ke Tanah.....	22
Gambar 2.14 Tiga Himpunan Phasor-phasor Seimbang yang merupakan Komponen- Komponen Simetris dari Phasor-phasor tidak Seimbang.....	24
Gambar 2.15 Penjumlahan secara Grafis Komponen-komponen pada Gambar 2.14 untuk Mendapatkan Phasor-phasor tak Seimbang.....	24
Gambar 2.16 Tampilan <i>software</i> ETAP	26
Gambar 3.1 Diagram Alir Metode Pengerjaan Penelitian	28
Gambar 3.2 Diagram Alir Proses Perhitungan	30
Gambar 4.1 <i>Single Line Diagram</i> sistem PT. Ajinomoto.....	31
Gambar 4.2 Jaringan Impedansi Urutan Positif.....	36
Gambar 4.3 Jaringan Impedansi urutan Negatif	36
Gambar 4.4 Jaringan Impedansi Urutan Nol	37
Gambar 4.5 Jaringan Impedansi Urutan Positif dan Penyederhanaanya	37
Gambar 4.6 Single Line Diagram PT. Ajinomoto	44
Gambar 4.7 Tampilan setelan OCR pada ETAP 7.0	45
Gambar 4.8 Tampilan Setelan GFR pada ETAP 7.0	46
Gambar 4.9 Kurva OCR sebagai pelindung utama motor pada <i>feeder</i> 2F	46
Gambar 4.10 Kurva OCR Saat Diberikan Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa	47

Gambar 4.11 Kurva GFR Saat Diberikan Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke 48

Gambar 4.12 Setelan *Relay2* pada ETAP 49

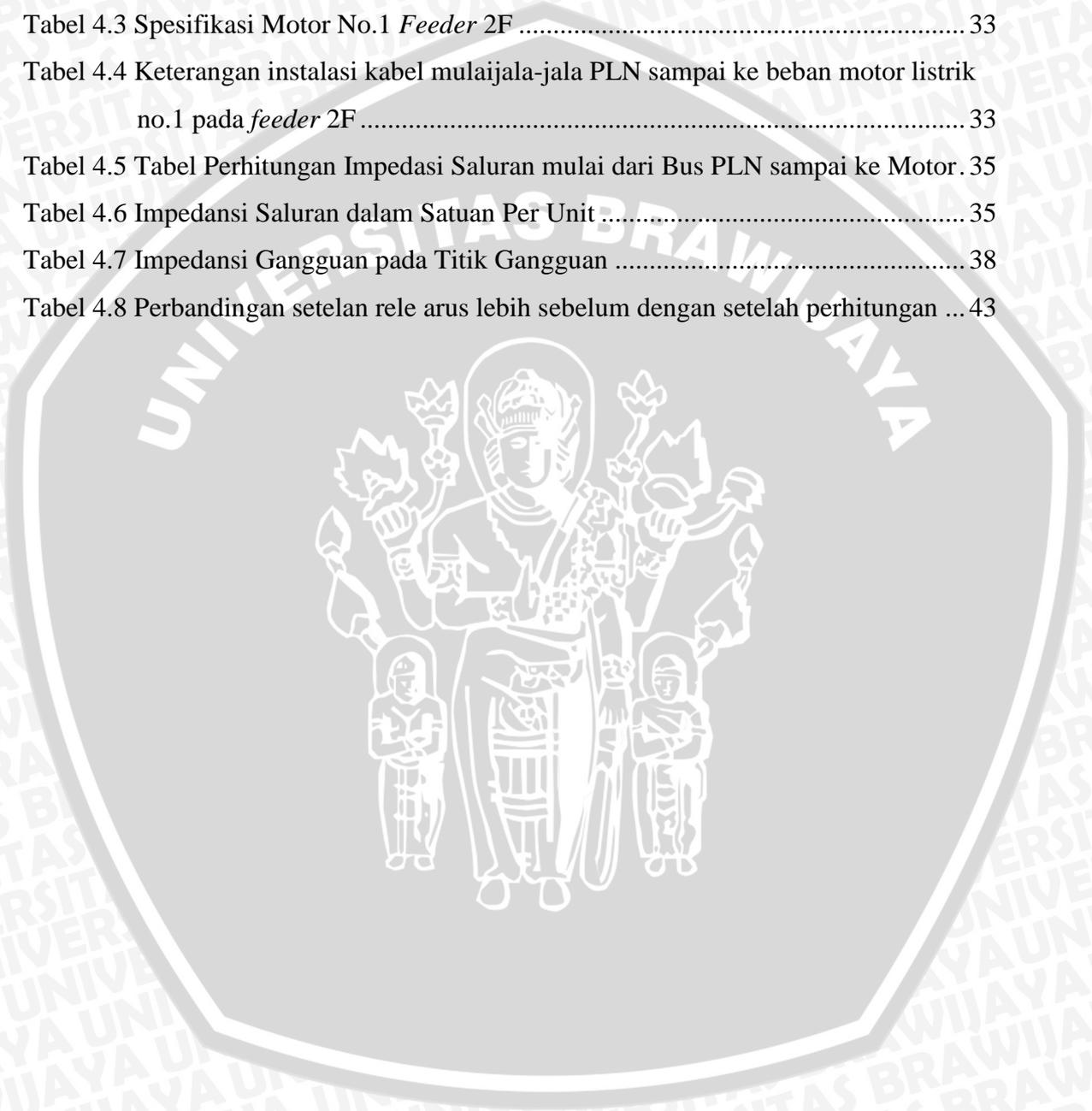
Gambar 4.13 Kurva Kerja Koordinasi Rele Arus Lebih Sebagai Pengaman 50

Gambar 4.14 Simulasi Kerja Koordinasi Rele sebagai Pengaman Utama dan cadangan 51



DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 4.1 Spesifikasi Transformator <i>Step-Down</i>	32
Tabel 4.2 Data Pembebanan <i>Feeder</i> 2F.....	32
Tabel 4.3 Spesifikasi Motor No.1 <i>Feeder</i> 2F	33
Tabel 4.4 Keterangan instalasi kabel mulaijala-jala PLN sampai ke beban motor listrik no.1 pada <i>feeder</i> 2F	33
Tabel 4.5 Tabel Perhitungan Impedansi Saluran mulai dari Bus PLN sampai ke Motor. 35	35
Tabel 4.6 Impedansi Saluran dalam Satuan Per Unit	35
Tabel 4.7 Impedansi Gangguan pada Titik Gangguan	38
Tabel 4.8 Perbandingan setelan rele arus lebih sebelum dengan setelah perhitungan ...	43



ABSTRAK

Bagus Ibnu Pratama, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya,
April 2013, **Pengaturan ulang Rele Arus Lebih sebagai Pengaman Utama
Compressor pada Feeder 2F PT. Ajinomoto**,

Dosen Pembimbing : Drs. Ir. Moch.Dhofir, MT. dan Ir.Hery Purnomo, MT.

Mengacu pada laporan kejadian tanggal 7 Agustus 2012 terjadi gangguan terhadap proses produksi di PT. Ajinomoto. Proses produksi berhenti total selama dua setengah jam. Setelah dilakukan penelusuran, ternyata awal gangguan terjadi akibat adanya hubung singkat pada motor yang berfungsi sebagai penggerak *compressor* dengan daya 1000 kW. Motor tersebut terletak pada *feeder* 2F yang dicatu oleh tegangan jala-jala PLN sebesar 3.3 kV. *Relay3* sebagai pengaman utama tidak bekerja pada saat terjadi gangguan. *Relay1* pada sisi *upstream* bekerja terlebih dahulu sehingga terjadi kesalahan lokalisir gangguan. Akibatnya seluruh sistem mengalami *blackout* total. Oleh sebab itu untuk meningkatkan performa sistem proteksi perlu dilakukan penyetelan ulang rele arus lebih (*Relay3*).

Tahapan perhitungan dimulai dari perhitungan impedansi masing-masing komponen dalam satuan per unit (pu). Kemudian dilakukan analisis komponen simetri pada impedansi berdasarkan *single line diagram*. Berikutnya menghitung besar arus gangguan hubung singkat sehingga didapat setelan rele yang baru dan untuk mendapatkan grafik kerja rele dilakukan simulasi pada ETAP.

Dengan setelan rele arus lebih yang baru yaitu $I_{set\ prim} = 262\ A$, $I_{set\ sek} = 3.28\ A$ dan untuk setelan OCR $M=0.75$, $t=0.25\ s$, setelan GFR $M=1$, $t=0.25\ s$ diharapkan dapat meningkatkan selektifitas sistem proteksi. Hasil simulasi pada ETAP menjelaskan bahwa koordinasi antara rele pengaman utama (setelan baru) dengan rele pengaman cadangan sudah tepat. Sehingga perlu dilakukan pengecekan kembali terhadap kondisi komponen dalam rele, dan kemampuan isolasi kabel pada sisi *upstream* dalam mengamankan sistem dari arus bocor.

Kata kunci: Gangguan hubung singkat, kesalahan lokalisir gangguan, penyetelan ulang rele arus lebih.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PT. Ajinomoto merupakan industri besar yang terletak di daerah Kota Mojokerto. Hasil produksi utama PT. Ajinomoto adalah *monosodium glutamate* atau *sodium glutamat (MSG)*. Seperti industri-industri pada umumnya, PT. Ajinomoto memerlukan keandalan sistem kelistrikan serta kontinuitas penyediaan tenaga listrik untuk mendukung proses produksinya. Salah satu faktor yang mempengaruhi hal tersebut adalah performa sistem proteksi dengan koordinasi rele-rele pengamannya.

Mengacu pada laporan kejadian tanggal 7 Agustus 2012 terjadi gangguan terhadap proses produksi di PT. Ajinomoto. Proses produksi berhenti total selama dua setengah jam. Setelah dilakukan penelusuran, ternyata awal gangguan terjadi akibat adanya hubung singkat pada motor induksi tiga fasayang berfungsi sebagai penggerak *compressor* dengan daya 1000 kW. Motor tersebut terletak pada *feeder* 2F yang dicatu oleh tegangan jala-jala PLN sebesar 3.3 kV. Sistem pengaman motor tersebut meliputi rele, *circuit breaker*, dan *current transformer*.

Koordinasi dari peralatan pengaman tersebut bertujuan untuk melokalisir gangguan dengan cepat. Peralatan tersebut harus dikoordinasikan untuk memastikan bahwa peralatan yang berada di titik terdekat dengan gangguan harus dioperasikan terlebih dahulu (proteksi utama). Kegagalan pada proteksi utama harus dapat diatasi yaitu dengan proteksi cadangan. Proteksi cadangan ini umumnya mempunyai perlambatan waktu (*time delay*), hal ini untuk memberikan kesempatan kepada proteksi utama beroperasi terlebih dahulu, dan jika proteksi utama gagal baru proteksi cadangan yang akan beroperasi. Dengan demikian hanya bagian yang mengalami gangguan saja yang diisolir dari sistem tersebut.

Tetapi yang terjadi adalah tidak bekerjanya proteksi utama terhadap gangguan pada motor. Sehingga proteksi cadangan bekerja lebih dahulu, dan menyebabkan sistem lain yang harusnya bekerja normal menjadi terganggu. Kesalahan seperti itu disebut dengan kesalahan lokalisir gangguan.

Gagalnya pengamanan disebabkan tidak selektifnya rele arus lebih sebagai proteksi utama motor. Ada dua kemungkinan penyebab tidak selektifnya rele tersebut. Yang pertama adalah gangguan tersebut merupakan arus bocor bukan arus hubung

singkat. Sehingga besar arus gangguan tidak mencapai rating minimal rele arus lebih untuk bekerja. Sedangkan yang kedua adalah, adanya salah setelan terhadap rele arus lebih sebagai proteksi utama, sehingga rele tidak mendeteksi adanya gangguan pada motor tersebut. Kemungkinan pertama dapat ditangkal karena telah digunakan *High Voltage Insulation Tape* sebagai tindakan preventif munculnya arus bocor. Oleh sebab itu untuk meningkatkan performa sistem proteksi perlu dilakukan analisis terhadap setelan rele arus lebih dan dilakukan penyetelan ulang rele arus lebih.

1.2 Rumusan Masalah

Mengacu pada permasalahan yang telah diuraikan pada latar belakang di atas, dirumuskan masalah yaitu:

1. Berapa Besar arus gangguan hubung singkat pada *compressorfeeder* 2F PT. Ajinomoto.
2. Bagaimana penyetelan ulang rele arus lebih sebagai pengaman utama *compressor feeder* 2F PT. Ajinomoto.
3. Bagaimana simulasi rele arus lebih sebagai pengaman utama *compressor* pada *feeder* 2F PT. Ajinomoto dengan menggunakan software ETAP 7.0

1.3 Hipotesis

Penyetelan ulang rele arus lebih yang tepat dapat meningkatkan performa keandalan sistem proteksi (selektif) dan koordinasi yang benar antara proteksi utama dan proteksi cadangan pada *feeder* 2F.

1.4 Ruang Lingkup

Permasalahan di atas akan dibatasi dengan beberap hal sebagai berikut:

- a. Tidak membahas sistem pada *feeder* lain yang bekerja normal.
- b. Perhitungan arus hubung singkat meliputi analisis gangguan hubung singkat tiga fasa, antar fasa, satu fasa ke tanah, dan dua fasa ke tanah.
- c. Sistem pentanahan yang digunakan adalah pentanahan langsung (tanpa impedansi).
- d. Rele arus lebih yang dibahas adalah rele tipe COC4-A02D1 dari Mitsubishi Electric.
- e. Simulasi untuk mendapatkan kurva kerja rele setelah hasil analisis dan perhitungan setelan menggunakan software ETAP 7.0

1.5 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah mengatur ulang rele arus lebih (OCR) pada *feeder 2F* PT. Ajinomoto untuk mencegah terjadinya kembali kesalahan lokalisir terhadap gangguan arus hubung singkat.

1.6 Manfaat

Hasil yang diperoleh dari skripsi ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Dapat menjadi referensi bagi PT. Ajinomoto ketika melakukan perbaikan pada proteksi sistem kelistrikannya, khususnya setelan rele pengamannya.
2. Dapat menjadi referensi bagi orang lain yang hendak mempelajari masalah yang serupa.

1.7 Sistematika Pembahasan

Sistematika pembahasan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

BAB I : PENDAHULUAN

Memuat latar belakang, rumusan masalah, ruang lingkup, tujuan, dan sistematika penulisan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Berisi tinjauan pustaka atau dasar teori yang digunakan untuk dasar penelitian yang dilakukan dan untuk mendukung permasalahan yang diungkapkan.

BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Memberikan penjelasan tentang metode yang digunakan dalam penelitian ini, meliputi pengambilan data, prosedur perhitungan data.

BAB IV : ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Berisi perhitungan dan pengolahan data, analisis hasil perhitungan, dan pemodelan sistem dengan menggunakan ETAP 7.0.

BAB V : PENUTUP

Berisi kesimpulan dari penelitian serta saran dari penulis untuk penelitian selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dipaparkan referensi pustaka yang digunakan dalam penulisan penelitian. Referensi pustaka yang akan dijelaskan antara lain mengenai rele sebagai sistem proteksi, perhitungan besar arus gangguan hubung singkat, penyetelan arus dan waktu rele arus lebih.

2.1 Sistem Proteksi pada Sistem Tenaga Listrik

Sistem proteksi adalah sistem pengaman peralatan listrik seperti generator, transformator, motor dll. terhadap kondisi-kondisi abnormal. Kondisi abnormal tersebut bisa disebabkan oleh beberapa keadaan seperti adanya arus hubung singkat, kenaikan tegangan atau penurunan tegangan, keadaan beban berlebih, dan naik turun frekuensi.

Sedangkan sistem tenaga listrik sendiri adalah untuk menghasilkan dan menyalurkan energi listrik ke beban. Sistem tersebut harus dirancang dan dikendalikan untuk pengiriman energinya ke pengguna secara handal dan ekonomis. Keperluan akan sistem tenaga listrik yang handal dan ekonomis tidak dapat dielakkan. Banyak peralatan sistem tenaga listrik yang harganya sangat mahal dan sistem yang begitu rumit menggambarkan betapa banyaknya modal yang harus dikeluarkan. Biaya akan cepat kembali jika sistem tersebut dalam penggunaannya memungkinkan pengaman dan keandalan sistem yang terjamin. Adanya kerusakan akibat adanya gangguan tentu saja akan menambah biaya perawatan dan perbaikan.

Fungsi utama dari sistem proteksi adalah (Hutauruk, 1991):

1. Menghindari atau mengurangi kerusakan peralatan listrik. Semakin cepat sistem proteksi bekerja maka pengaruh gangguan akan semakin kecil.
2. Mempercepat melokalisir daerah yang terganggu, sehingga daerah yang terganggu menjadi sekecil mungkin.
3. Memberikan pelayanan listrik dengan keandalan yang tinggi.
4. Mengamankan manusia dari bahaya listrik.

2.2 Gangguan-gangguan pada Sistem Tenaga Listrik

Gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik sangat beragam besar dan jenisnya. Gangguan dalam sistem tenaga listrik adalah keadaan tidak normal dimana keadaan ini dapat mengakibatkan terganggunya kontinuitas pelayanan tenaga listrik. Berdasarkan ANSI/IEEE Std. 100-1992 gangguan didefinisikan sebagai suatu kondisi

fisis yang disebabkan kegagalan suatu perangkat, komponen atau suatu elemen untuk bekerja sesuai dengan fungsinya. Gangguan hampir selalu ditimbulkan oleh hubung singkat antar fase atau hubung singkat fase ke tanah. Suatu gangguan hampir selalu berupa hubung langsung atau melalui impedansi. Secara umum klasifikasi gangguan pada sistem tenaga listrik disebabkan oleh 2 faktor, yaitu:

1. Gangguan yang berasal dari sistem
2. Gangguan yang berasal dari luar sistem

Penyebab gangguan yang berasal dari dalam sistem antara lain:

1. Tegangan dan arus abnormal
2. Pemasangan yang kurang baik
3. Kesalahan mekanis karena proses penuaan
4. Beban lebih
5. Kerusakan material seperti isolator pecah, kawat putus, atau kabel cacat isolasinya.

Sedangkan untuk gangguan yang berasal dari luar sistem antara lain:

1. Gangguan-gangguan mekanis karena pekerjaan galian saluran lain. Gangguan ini terjadi terutama pada sistem kelistrikan bawah tanah.
2. Pengaruh cuaca seperti hujan, angin, serta surja petir. Pada gangguan surja petir dapat mengakibatkan gangguan tegangan lebih dan dapat menyebabkan gangguan hubung singkat karena tembus isolasi peralatan (*breakdown*).
3. Pengaruh lingkungan seperti pohon, binatang dan benda-benda asing serta akibat kecerobohan manusia.

Bila ditinjau dari segi lamanya waktu gangguan, maka dapat dikelompokkan menjadi (Hutauruk, 1987):

1. Gangguan yang bersifat temporer, yang dapat hilang dengan sendirinya atau dengan memutuskan sesaat bagian yang terganggu dari sumber tegangannya. Gangguan sementara jika tidak dapat hilang dengan segera, baik hilang dengan sendirinya maupun karena bekerjanya alat pengaman dapat berubah menjadi gangguan permanen.
2. Gangguan yang bersifat permanen, dimana untuk membebaskannya diperlukan tindakan perbaikan dan/atau menyingkirkan penyebab gangguan tersebut.

Untuk gangguan yang bersifat sementara setelah arus gangguannya terputus misalnya karena terbukanya *circuit breaker* oleh rele pengamannya, peralatan atau saluran yang terganggu tersebut siap dioperasikan kembali. Sedangkan pada gangguan permanen terjadi kerusakan yang bersifat permanen sehingga baru bisa dioperasikan kembali setelah bagian yang rusak diperbaiki atau diganti.

Pada saat terjadi gangguan akan mengalir arus yang sangat besar pada fasa yang terganggu menuju titik gangguan, dimana arus gangguan tersebut mempunyai harga yang jauh lebih besar dari rating arus maksimum yang diijinkan, sehingga terjadi kenaikan temperatur yang dapat mengakibatkan kerusakan pada peralatan listrik yang digunakan.

2.3 Sebab-sebab Timbulnya Gangguan pada Sistem Tenaga Listrik

Dalam sistem tenaga listrik tiga fasa, gangguan-gangguan yang dapat menyebabkan adanya arus lebih yang mungkin terjadi diantaranya adalah gangguan beban lebih, gangguan hubung singkat, dan gangguan tegangan lebih.

2.3.1 Gangguan Beban Lebih

Gangguan ini sebenarnya bukan gangguan murni, tetapi bila dibiarkan terus menerus berlangsung dapat merusak peralatan listrik yang dialiri arus tersebut. Beban lebih adalah sejumlah arus yang mengalir yang lebih besar dari arus nominal. Hal ini terjadi karena penggunaan daya listrik oleh konsumen melampaui kapasitas nominal mesin. Hal tersebut tidak secara langsung merusak perlengkapan listrik tetapi mengurangi umur peralatan listrik.

2.3.2 Gangguan Tegangan Lebih

Gangguan tegangan lebih diakibatkan karena adanya kelainan pada sistem. Gangguan tegangan lebih dapat terjadi antara lain karena gangguan petir, dan gangguan surja hubung. Gangguan surja hubung diantaranya adalah penutupan saluran tak serempak pada pemutus tiga fasa, penutupan kembali saluran dengan cepat, pelepasan beban akibat gangguan, penutupan saluran yang semula tidak masuk sistem menjadi masuk sistem, dan sebagainya.

2.3.3 Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat dapat terjadi dua fasa, tiga fasa, satu fasa ke tanah, dua fasa ke tanah, atau 3 fasa ke tanah. Gangguan hubung singkat ini sendiri dapat

digolongkan menjadi dua kelompok yaitu gangguan hubung singkat simetris dan gangguan hubung singkat tak simetris (asimetris). Gangguan yang termasuk dalam hubung singkat simetris yaitu gangguan hubung singkat tiga fasa, sedangkan gangguan yang lainnya merupakan gangguan hubung singkat tak simetris. Gangguan ini akan mengakibatkan arus lebih pada fasa yang terganggu dan juga akan dapat mengakibatkan kenaikan tegangan pada fasa yang tidak terganggu.

Hampir semua gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik adalah gangguan tidak simetris. Gangguan tak simetris ini terjadi sebagai akibat gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, gangguan hubung singkat dua fasa, atau gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah.

Gangguan-gangguan tak simetris akan menyebabkan mengalirnya arus tak seimbang dalam sistem sehingga untuk analisis gangguan digunakan metode komponen simetris untuk menentukan arus maupun tegangan di semua bagian sistem setelah terjadi gangguan. Gangguan ini akan mengakibatkan arus lebih pada fasa yang terganggu dan juga akan dapat mengakibatkan kenaikan tegangan pada fasa yang tidak terganggu.

Gangguan yang mengakibatkan hubung singkat dapat menimbulkan arus yang jauh lebih besar dari pada arus normal. Bila gangguan hubung singkat dibiarkan berlangsung dengan lama pada suatu sistem daya, banyak pengaruh-pengaruh yang tidak diinginkan yang dapat terjadi. (Stevenson, 1982) :

- a. Berkurangnya batas-batas kestabilan untuk sistem daya.
- b. Rusaknya perlengkapan yang berada dekat dengan gangguan yang disebabkan oleh arus tak seimbang, atau tegangan rendah yang ditimbulkan oleh hubung singkat.
- c. Ledakan-ledakan yang mungkin terjadi pada peralatan yang mengandung minyak isolasi sewaktu terjadinya suatu hubung singkat, dan yang mungkin menimbulkan kebakaran sehingga dapat membahayakan orang yang menanganinyadan merusak peralatan-peralatan yang lain.
- d. Terpecah-pecahnya keseluruhan daerah pelayanan sistem daya itu oleh suatu rentetan tindakan pengamanan yang diambil oleh sitem-sistem pengamanan yang berbeda – beda. Kejadian ini dikenal sebagai “*cascading*”.

2.4 Rele Sebagai Peralatan Pengaman

Rele merupakan bagian dari peralatan sistem tenaga listrik yang digunakan untuk memberikan sinyal kepada *circuit breaker* supaya dapat memutuskan atau menghubungkan pelayanan penyaluran pada elemen sistem tenaga listrik. Rele ini akan memberikan sinyal kepada *circuit breaker* untuk memutuskan sistem tenaga listrik jika terjadi gangguan.

Pada dasarnya rele proteksi terdiri dari sebuah elemen operasi dan seperangkat kontak. Elemen operasi menerima masukan arus dari transformator arus ataupun tegangan dari transformator tegangan atau kombinasi dari keduanya. Dalam beberapa kasus rele melakukan pengukuran atau perbandingan operasi dasar input dan mengubahnya dalam bentuk gerakan kontak. Keadaan keluaran dari rele adalah menutup dan menahan. Jika keadaan tertutup maka rele akan memberikan sinyal untuk melakukan proses pembukaan dari *circuit breaker* dimana pada gilirannya akan mengisolasi gangguan dari bagian sistem tenaga listrik lain yang sehat.

Di dalam penyetelan sebuah rele harus dilakukan dengan benar agar tidak terjadi kesalahan operasi pada saat terjadi gangguan. Oleh karena itu hal-hal yang mempengaruhi dalam penyetelan rele harus benar-benar diperhatikan.

Sebagai peralatan pengaman rele harus memenuhi syarat sebagai berikut (Turan Gonen, 1986):

a. Kecepatan bereaksi

Rele harus cepat bereaksi / bekerja bila sistem mengalami gangguan atau kerja abnormal. Waktu kerja rele dimulai dari pertama kali merasakan gangguan sampai dengan memerintahkan PMT untuk *trip*. Rumus waktu kerja total relay:

$$t_{op} = t_p + t_{cb} \quad (2-1)$$

Keterangan:

t_{op} : total waktu yang dipergunakan untuk memutuskan hubungan

t_p : waktu bereaksinya rele

t_{cb} : waktu yang dipergunakan untuk pelepasan *Circuit Breaker*

b. Selektif

Yang dimaksud selektif adalah kecermatan pemilihan dalam mengadakan pengamanan, dalam hal ini menyangkut kordinasi pengamanan dari sistem

keseluruhan. Dengan demikian segala tindakannya akan tepat, sehingga gangguan dapat dieliminir sekecil mungkin.

c. Kepekaan

Rele harus dapat bekerja dengan kepekaan tinggi, artinya rele akan tetap memberikan respon terhadap gangguan yang terjadi di daerahnya meskipun gangguan tersebut itu kecil.

d. Keandalan

Keandalan adalah kemampuan rele untuk bekerja dengan baik setiap saat dan menghindari operasi yang tidak diperlukan atau salah kerja. Salah kerja bisa mengakibatkan kerusakan yang lebih luas. Keandalan rele yang diperbolehkan sekitar 90 % - 99 % .

e. Sederhana

Semakin sederhana konstruksi rele makan semakin baik. Karena setiap komponen rele memungkinkan untuk mengalami kerusakan.

f. Murah

Relay sebaiknya murah dengan tanpa meninggalkan persyaratan-persyaratan di atas.

2.5 Rele Arus Lebih dan Aplikasinya

Rele arus lebih adalah rele yang beroperasi atau mendeteksi adanya gangguan ketika arus yang mengalir melebihi batas yang diijinkan. (Anderson, 1998).

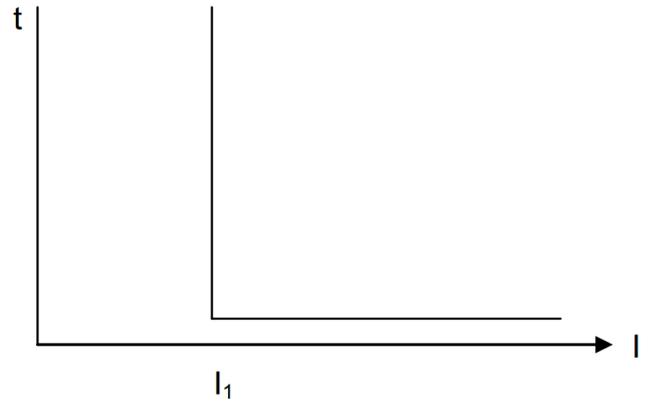
Penggunaan rele arus lebih ini sangatlah luas, tidak hanya pada sistem kelistrikan dengan skala kecil saja, tetapi juga digunakan pada sistem kelistrikan skala besar sekalipun. Rele arus lebih dapat digunakan untuk melindungi hampir semua bagian pada sistem tenaga listrik misalnya jaringan transmisi, trafo, generator, atau motor.

Ada tiga jenis rele arus lebih yaitu :

1. Rele arus lebih waktu instan (*moment-instantaneous*)
2. Rele arus lebih waktu tertentu (*definite time*)
3. Rele arus lebih berbanding terbalik (*inverse time*) :
 - a. Rele berbanding terbalik biasa (*normal inverse*)
 - b. Rele sangat berbanding terbalik (*very inverse*)
 - c. Rele sangat berbanding terbalik sekali (*extremely inverse*)

2.5.1 Rele Arus Lebih Waktu Instan

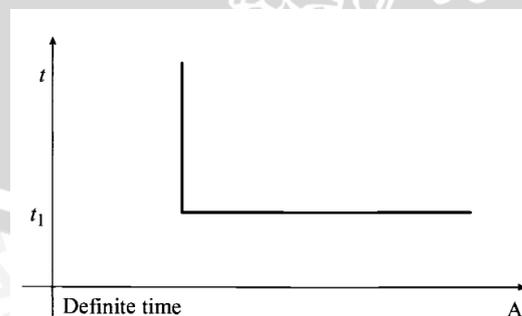
Rele arus lebih seketika adalah jenis relay arus lebih yang paling sederhana dimana jangka waktu kerja relay yaitu mulai saat relay mengalami pick-up sampai selesainya kerja relay sangat singkat yakni sekitar 20-100 mili detik tanpa adanya penundaan waktu. (Taqiyyuddin, 2006)



Gambar 2.1 Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Instan
Sumber: (Taqiyyuddin, 2006)

2.5.2 Rele Arus Lebih Waktu Tertentu

Rele arus lebih waktu tertentu memungkinkan pengaturan waktu operasi yang bervariasi berdasarkan level arus yang berbeda. Setelan rele ini dapat disesuaikan sedemikian rupa sehingga pemutus yang paling dekat dengan sumber gangguan akan trip lebih cepat daripada yang lain, dan pengaman sisanya akan trip jika setelah waktu tunda yang diberikan gangguan masih berlanjut. Pada rele arus lebih waktu tertentu, semua level arus yang melebihi pickup setpoint-nya akan diputuskan dalam waktu yang sama (*definite*). Gambar 2.2 menunjukkan karakteristik dari rele arus lebih waktu tertentu. (Sleva, 2009)



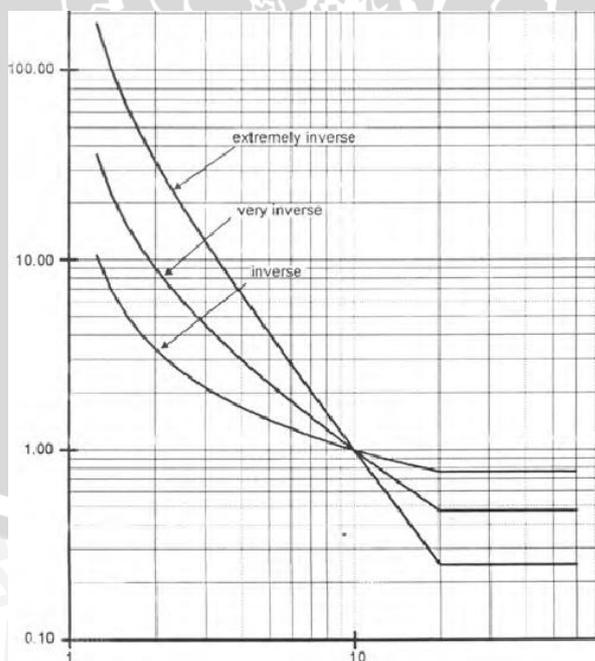
Gambar 2.2 Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Tertentu
Sumber: (Taqiyyuddin, 2006)

2.5.3 Rele Arus Lebih Waktu Invers

Rele arus lebih waktu invers memiliki waktu operasi yang berbanding terbalik dengan besarnya arus gangguan. Dengan kata lain, semakin besar arus gangguan maka rele akan beroperasi dalam waktu yang semakin cepat, dan juga sebaliknya jika arus gangguan kecil maka waktu tunda operasi rele akan lebih lama. Karakteristik kerja rele arus lebih waktu invers digambarkan dalam kurva arus-waktu atau yang biasa disebut *time-current characteristic* (TCC). TCC adalah kurva dengan skala dalam *time dial*. Semakin besar *time dial*, maka semakin lama waktu operasi dari rele tersebut.

Karakteristik invers ini dijelaskan dalam standar IEC 60255-3 dan BS 142. Standar-standar ini mendefinisikan beberapa jenis perlindungan waktu invers yang dibedakan oleh gradien kurvanya, yaitu *standard inverse*, *very inverse* dan *extremely inverse*. Standar lain, misalnya standar IEEE juga memberikan karakteristik kurva yang lain, seperti *moderately inverse*, *long time inverse*, dan *short time inverse*.

Adapun contoh kurva untuk karakteristik *standard inverse*, *very inverse* dan *extremely inverse* berdasarkan standar IEC 60255-3 dan BS 142 diberikan pada Gambar 2.3. Karakteristik invers ini banyak dikenal dengan sebutan *inverse definite minimum time* (IDMT). Karena seiring dengan arus yang bertambah besar, waktu operasi turun semakin cepat seolah mendekati waktu *definite minimumnya*. (Slewa, 2009)



Gambar 2.3 Karakteristik *Standard Inverse*, *Very Inverse* dan *Extremely Inverse*
Sumber: (Davies, 2006)

2.6 Penyetelan Rele Arus Lebih

Hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat, dipergunakan untuk menentukan nilai setelan rele arus lebih terutama nilai setelan TMS (*Time Multiple Setting*) dari rele arus lebih jenis *inverse*.

Besarnya arus beban adalah (Taqiyyuddin, 2006) :

$$I_{\text{beban}} = \frac{P}{\sqrt{3}V_{L-L}} \text{ [A]} \quad (2-2)$$

Keterangan:

P : daya 3 fasa [VA]

V_{L-L} : tegangan saluran [V]

Harus diperhatikan pula bahwa rele arus lebih tidak boleh bekerja pada saat terjadi beban maksimum, sehingga:

$$I_s = \frac{K_{fk}}{K_d} \cdot I_{\text{beban}} \quad (2-3)$$

Keterangan:

I_s : penyetelan arus

K_{fk} : faktor keamanan, untuk *define relay* = 1.1, sedangkan *inverse relay*=1.2

K_d : faktor arus kembali

I_{beban} : arus nominal yang mengalir pada beban

Nilai tersebut merupakan arus *setting* primer, sedangkan untuk mendapatkan nilai setelan sekunder yang diatur pada rele arus lebih, maka harus dihitung dengan menggunakan data ratio transformator arus yang terpasang, yaitu:

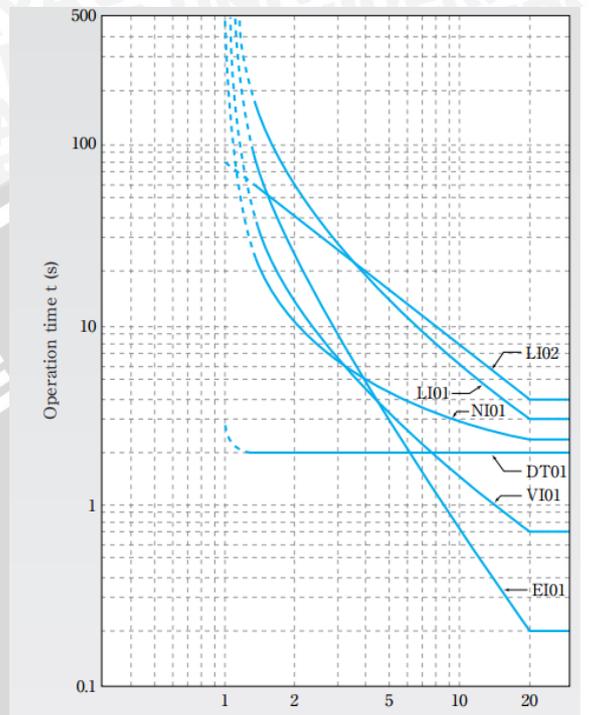
$$I_{\text{set.sek}} = I_{\text{set.pri}} \times (1 / \text{Ratio CT}) \quad (2-4)$$

2.7 Rele Arus Lebih Tipe COC4-A02D1

Rele arus lebih tipe COC4-A02D1 adalah kombinasi dari rele arus lebih dan rele gangguan tanah yang dapat digunakan untuk pengamanan terhadap gangguan hubung singkat fasa dan gangguan hubung singkat. Dalam pengoperasiannya rele ini memiliki karakteristik waktu sebagai berikut:

- a. waktu tertentu (*definite time*)
- b. waktuberbanding (*inverse time*). Yang terdiri dari:
 - Berbanding terbalik biasa (*normal inverse*)
 - Sangat berbanding terbalik (*very inverse*)
 - Sangat berbanding terbalik sekali (*extremely inverse*)
 - Berbanding terbalik lama (*long-time inverse*)

Karakteristik pengoperasian rele arus lebih tipe COC4-A02D1 ditampilkan dalam grafik kerja pada Gambar 2.4 dan Gambar 2.5. Terdapat 12 jenis waktu kerja sesuai *time-delayed*.



Gambar 2.4 Grafik Karakteristik Waktu Kerja Rele Arus Lebih Tipe COC4-A02D1
Sumber: Manual Book of Mitsubishi Numerical Protection Relay Melpro D series

Karakteristik waktu kerja rele sesuai dengan grafik pada Gambar 2.4 adalah sebagai berikut:

- NI01 : *Normal Inverse time-delayed characteristic*

$$t = \frac{0.14}{I^{0.02-1}} \times \frac{M}{10} \text{ (s)} \quad (2-5)$$

- VI01 : *Very Inverse time-delayed characteristic*

$$t = \frac{13.5}{I-1} \times \frac{M}{10} \text{ (s)} \quad (2-6)$$

- EI01 : *Extremely Inverse time-delayed characteristic*

$$t = \frac{80}{I^2-1} \times \frac{M}{10} \text{ (s)} \quad (2-7)$$

- LI01 : *Long Inverse time-delayed characteristic*

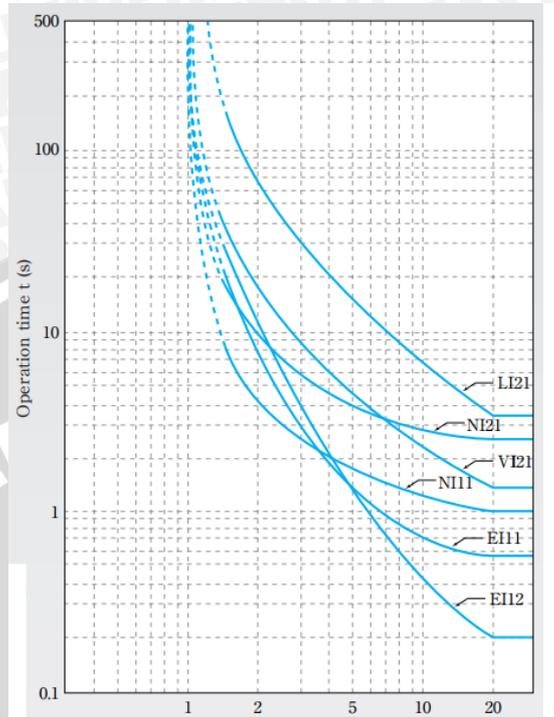
$$t = \frac{54}{I-1} \times \frac{M}{10} \text{ (s)} \quad (2-8)$$

- LI02 : *Long Inverse time-delayed characteristic*

$$t = \frac{80}{I} \times \frac{M}{10} \text{ (s)} \quad (2-9)$$

- DI01 : *Definite Inverse time-delayed characteristic*

$$t = 2 \times \frac{M}{10} \text{ (s)} \quad (2-10)$$



Gambar 2.5 Grafik Karakteristik Waktu Operasi Rele Arus Lebih Tipe COC4-A02D1
Sumber: Manual Book of Mitsubishi Numerical Protection Relay Melpro D series

Sedangkan karakteristik waktu kerja rele sesuai dengan grafik pada Gambar 2.5 adalah sebagai berikut:

- NI11 : *Normal Inverse time-delayed characteristic*

$$t = \left(\frac{0.0515}{I^{0.02-1}} + 0.114 \right) \times \frac{M}{10} \text{ (s)} \quad (2-11)$$

- EI11 : *Extremely Inverse time-delayed characteristic*

$$t = \left(\frac{0.0515}{I^{0.02-1}} + 0.114 \right) \times \frac{M}{10} \text{ (s)} \quad (2-12)$$

- EI12 : *Extremely Inverse time-delayed characteristic*

$$t = \left(\frac{0.0515}{I^{0.02-1}} + 0.114 \right) \times \frac{M}{10} \text{ (s)} \quad (2-13)$$

- NI21 : *Normal Inverse time-delayed characteristic*

$$t = \left(\frac{0.0515}{I^{0.02-1}} + 0.114 \right) \times \frac{M}{10} \text{ (s)} \quad (2-14)$$

- VI21 : *Very Inverse time-delayed characteristic*

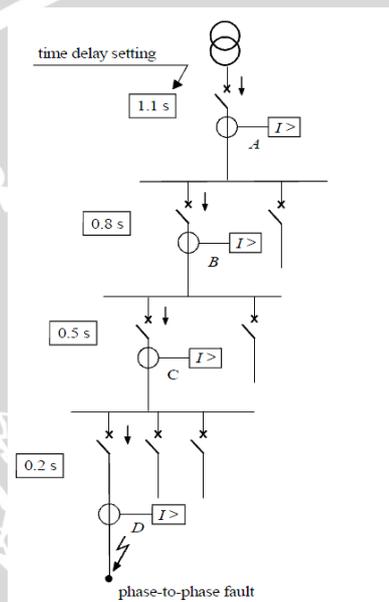
$$t = \left(\frac{0.0515}{I^{0.02-1}} + 0.114 \right) \times \frac{M}{10} \text{ (s)} \quad (2-15)$$

- LI21 : *Long Inverse time-delayed characteristic*

$$t = \left(\frac{0.0515}{I^{0.02-1}} + 0.114 \right) \times \frac{M}{10} \text{ (s)} \quad (2-16)$$

2.8 Koordinasi Arus dan Waktu pada Rele Arus Lebih

Dalam suatu sistem kelistrikan terdapat susunan rele pengaman yang terdiri dari rele pengaman utama dan rele pengaman *backup*. Antara rele pengaman utama dengan rele pengaman *backup* ini harus dikoordinasikan agar menghasilkan sistem proteksi yang sempurna. Adapun koordinasi ini dilakukan pada setelan *pickup* dan *time delay* dari rele tersebut. Salah satu contoh koordinasi rele pengaman dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Koordinasi setelan arus dan waktu
Sumber : (Prévé, 2006)

Untuk memberikan koordinasi yang baik, setelan *pickup* rele-rele tersebut harus memenuhi syarat berikut :

$$I_{\text{set A}} > I_{\text{set B}} > I_{\text{set C}} > I_{\text{set D}}$$

Pada aplikasi praktis, sering digunakan batas 125% dari nilai *pickup* rele di bawahnya. Sedangkan pada setelan waktu, dikenal adanya *setting* kelambatan waktu (Δt) atau *grading time*. Perbedaan waktu kerja minimal antara rele utama dan rele *backup* adalah 0.2 – 1 detik (IEEE std, 2001).

2.9 Sistem Per Unit (pu)

Tegangan, arus, kilovoltampere, dan impedansi mempunyai hubungan sedemikian rupa sehingga pemilihan nilai dasar untuk dua saja dari kuantitas-kuantitas tersebut sudah dengan sendirinya menentukan nilai dasar untuk kedua kuantitas yang lainnya. Jika nilai dasar dari arus dan tegangan sudah diketahui maka nilai dasar dari impedansi, dan daya dapat ditentukan. Pengertian dari impedansi dasar adalah

impedansi yang akan menimbulkan jatuh tegangan (*voltage drop*) padanya sendiri sebesar tegangan dasar jika arus yang mengalir merupakan arus dasar. Daya dasar pada sistem fasa tunggal adalah hasil perkalian dari tegangan dasar dalam kilovolt dan arus dasar dalam ampere.

Definisi nilai perunit untuk suatu kuantitas ialah perbandingan kuantitas tersebut terhadap nilai dasarnya yang dinyatakan dalam desimal. *Perbandingan (ratio) dalam persentase adalah 100 kali nilai dalam perunit.* Kedua metode perhitungan tersebut, baik dengan persentase maupun dengan per unit, lebih sederhana daripada menggunakan langsung nilai-nilai ampere, ohm, dan volt yang sebenarnya. Metode perunit mempunyai sedikit kelebihan dari metode persentase, karena hasil perkalian dari dua kuantitas yang dinyatakan dalam per unit sudah langsung diperoleh dalam perunit juga, sedangkan hasil perkalian dari dua kuantitas yang dinyatakan dalam persentase masih harus dibagi dengan 100 untuk mendapatkan hasil dalam persentase.

Tegangan, arus, kilovolt ampere dan impedansi mempunyai hubungan sedemikian rupa sehingga pemilihan nilai dasar untuk dua saja dari kuantitas-kuantitas tersebut sudah dengan sendirinya menentukan nilai dasar untuk kedua kuantitas yang lainnya. Jika nilai dasar dari arus dan tegangan sudah dipilih, maka nilai dasar dari impedansi dan kilovoltampere dapat ditentukan. Impedansi dasar adalah impedansi yang akan menimbulkan jatuh-tegangan (*voltage drop*) padanya sendiri sebesar tegangan dasar jika arus yang mengalirinya sama dengan arus dasar. Kilovoltampere dasar pada sistem fasa-tunggal adalah hasil perkalian dari tegangan dasar dalam kilovolt dan arus dasar dalam ampere. Biasanya megavoltampere dasar dan tegangan dasar dalam kilovolt adalah kuantitas yang dipilih untuk menentukan dasar atau referensi. Jadi untuk sistem fasa tunggal atau sistem tiga-fasa di mana istilah arus berarti arus saluran, istilah tegangan berarti tegangan ke netral, dan istilah kilovoltampere berarti kilovoltampere per fasa, berlaku rumus-rumus berikut ini untuk hubungan bermacam-macam kuantitas (Stevenson, 1994):

$$\text{Arus dasar} = \frac{\text{dasar } kVA_{1\theta}}{\text{tegangan dasar, } kV_{LN}} \quad (2-17)$$

$$\text{Impedansi dasar} = \frac{\text{tegangan dasar, } kV^2}{\text{daya dasar, } MVA} \quad (2-18)$$

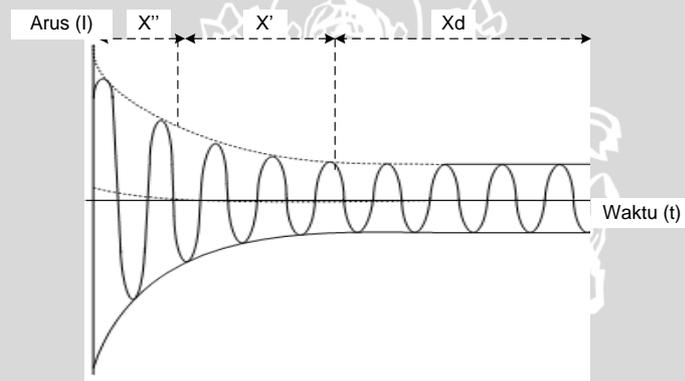
$$\text{Impedansi per-unit} = \frac{\text{Impedansi sebenarnya, } \Omega}{\text{impedansi dasar } \Omega} \quad (2-19)$$

Untuk mengubah dari impedansi per-unit (pu) menurut suatu dasar yang lama menjadi impedansi per-unit menurut dasar yang baru, dipakai persamaan berikut :

$$Z_{\text{baru}} (\text{pu}) = Z_{\text{lama}} (\text{pu}) \left[\frac{kV \text{ lama dasar}^2}{kV \text{ baru dasar}^2} \right] \times \left[\frac{kVA \text{ baru dasar}}{kVA \text{ lama dasar}} \right] \quad (2-20)$$

2.10 Arus Gangguan Hubung Singkat

Pada saat terjadi gangguan hubung singkat, akan mengalir arus yang sangat tinggi dengan tiba-tiba dari sumber ke titik gangguan. Besarnya arus yang mengalir ini dipengaruhi oleh nilai reaktansi sumber dan reaktansi pada rangkaian yang dilalui arus hubung singkat. Gambar 2.7 merupakan visualisasi dari bentuk gelombang arus hubung singkat. Reaktansi pada beberapa *cycle* pertama sangat kecil dan arus hubung singkatnya tinggi. Reaktansi pada saat ini disebut reaktansi subtransien atau *subtransient reactance* (X''_d). Beberapa *cycle* kemudian arus hubung singkat cenderung menurun dan reaktansi pada saat ini disebut reaktansi transien atau *transient reactance* (X'_d), dan akhirnya kondisi mencapai *steady state* dan pada saat ini reaktansinya disebut reaktansi sinkron atau *synchronous reactance* (X_d).

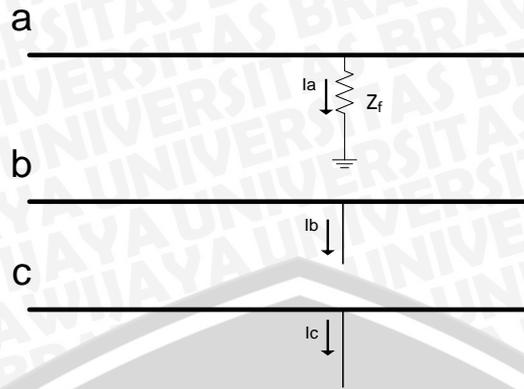


Gambar 2.7 Gelombang Arus Hubung Singkat
Sumber: (Lazar, 1980)

Perhitungan praktis untuk menghitung besar arus hubung singkat dalam sistem distribusi dapat dilakukan sebagai berikut:

2.10.1 Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Untuk gangguan ini dianggap fasa *a* mengalami gangguan. Gangguan ini dapat dilihat pada Gambar 2.7 di bawah:



Gambar 2.8 Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah
 Sumber : (Stevenson, 1994)

Kondisi terminalnya sebagai berikut:

Dengan $I_b = 0$; $I_c = 0$; $V_a = 0$,

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-21)$$

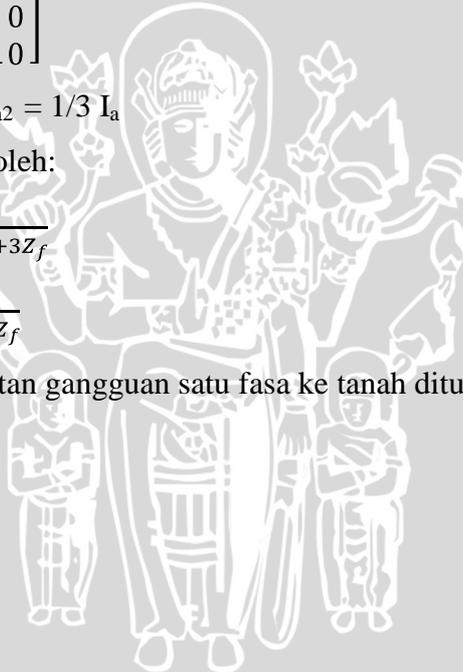
$$\text{Diperoleh : } I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = 1/3 I_a \quad (2-22)$$

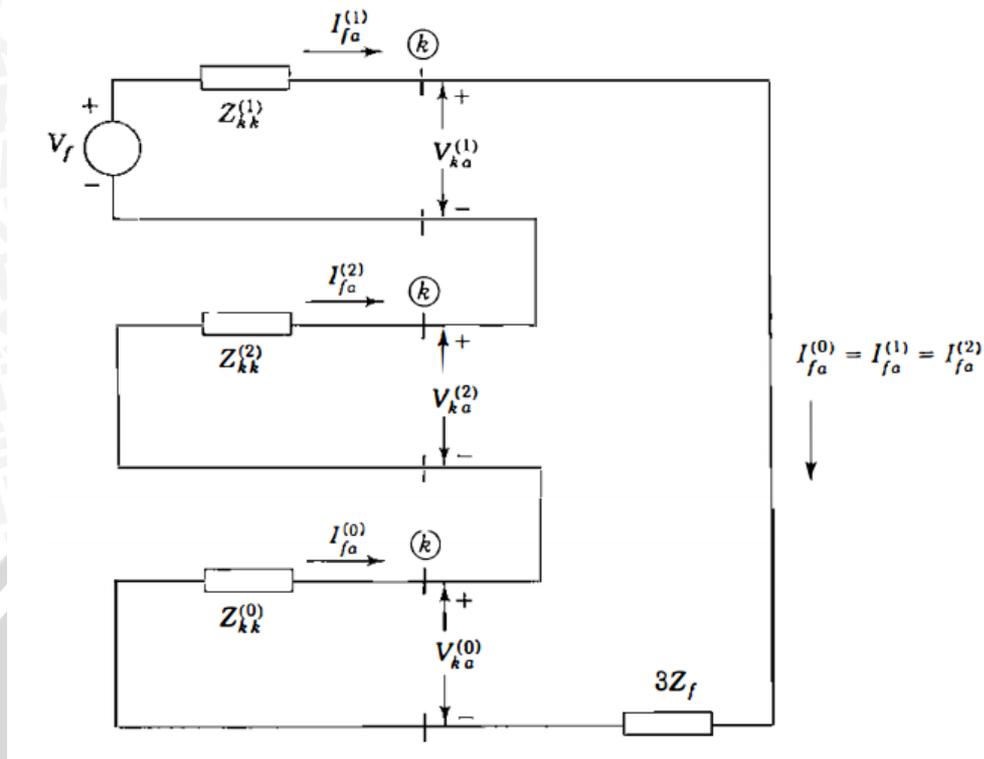
Dari Gambar 2.7 diperoleh:

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \quad (2-23)$$

$$I_a = 3I_{a1} = 3 \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \quad (2-24)$$

Hubungan jala-jala urutan gangguan satu fasa ke tanah ditunjukkan oleh Gambar 2.8 di bawah ini :





Gambar 2.9 Hubungan Jala-Jala Urutan Gangguan Satu Fasa ke Tanah
Sumber : (Stevenson, 1996)

Arus hubung singkat satu fasa ke tanah adalah (Gonen, 1987) :

$$I_{hs} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \text{ [A]} \quad (2-25)$$

Keterangan :

I_{hs} = Arus hubung singkat (A)

V_f = Tegangan sebelum gangguan (V)

Z_1 = impedansi urutan positif (Ω)

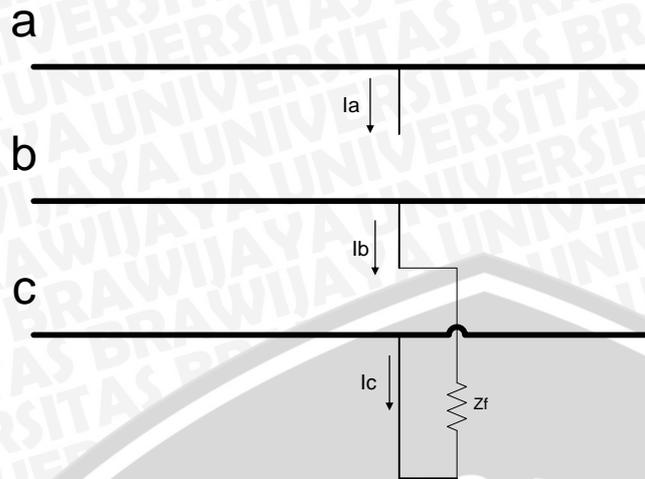
Z_2 = impedansi urutan negatif (Ω)

Z_0 = impedansi urutan nol (Ω)

Z_f = impedansi gangguan (Ω)

2.10.2 Hubung Singkat Antar Fasa

Gangguan terjadi pada fasa *b* dan *c* seperti terlihat pada Gambar 2.9 di bawah :



Gambar 2.10 Gangguan hubung singkat antar fasa
 Sumber : (Stevenson, 1994)

Dengan $V_b = V_c; I_c = -I_b; I_a = 0$

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2-26)$$

Diperoleh $V_{a1} = V_{a2}$, maka :

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix} \quad (2-27)$$

Dari persamaan diatas, didapatkan bahwa :

$$I_{a0} = 0 \quad (2-28)$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3}(a-a^2)I_b \quad (2-29)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3}(a^2-a)I_b \quad (2-30)$$

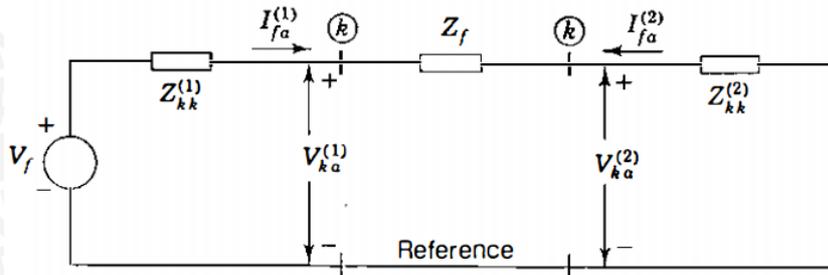
Sehingga

$$I_{a1} = -I_{a2}$$

Kemudian

Hubungan jala-jala urutan gangguan antar fasa ditunjukkan oleh Gambar 2.10 di bawah ini :





Gambar 2.11 Rangkaian Ekuivalen Urutan Gangguan Antar Fasa
 Sumber : (Stevenson, 1996)

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_f}$$

$$I_b = -I_c = a^2 I_{a1} + a I_{a2} + I_{a0}$$

$$I_b = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_f}$$

Arus hubung singkat antar fasa adalah (Gonen, 1987) :

$$I_{hs} = \left| \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \right| \quad (2-31)$$

2.10.3 Hubung Singkat Tiga Fasa

Dengan memperhatikan gambar 2.11 di bawah, maka dapat diketahui kondisi sebagai berikut :

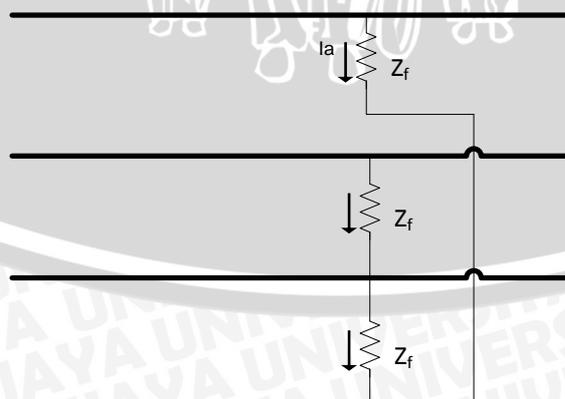
$$I_a + I_b + I_c = 0 ; I_a = 0 ; E = E_b = E_c$$

$$I_{a0} = 0 ;$$

$$I_{a2} = 0 ;$$

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_f}$$

$$I_a = I_{a1} ; I_b = a^2 I_{a1} ; I_c = a I_{a1}$$



Gambar 2.12 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa
 Sumber : Stevenson (1994)



Arus hubung singkat tiga fasa adalah (Gonen, 1967) :

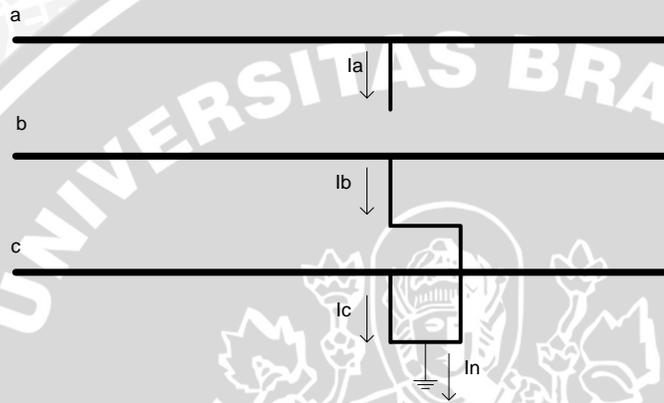
$$I_{hs} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_f} [A] \quad (2-32)$$

2.10.4 Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah

Sesuai dengan Gambar 2.12 diasumsikan bahwa fasa yang mengalami hubung singkat adalah fasa b dan c, sehingga terdapat hubungan-hubungan berikut ini :

$$V_b = V_c = 0$$

$$I_a = 0$$



Gambar 2.13 Gangguan Hubung Singkat 2 Fasa ke Tanah
Sumber : (Stevenson, 1994)

Sedangkan besar arus urutan positif, urutan negatif, dan urutan nol nya adalah sebagai berikut : (Gonen, 1987)

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + \frac{Z_2 Z_0}{Z_2 + Z_0}} \quad (2-33)$$

$$I_{a2} = -I_{a1} \frac{Z_0}{Z_2 + Z_0} \quad (2-34)$$

$$I_{a0} = -I_{a1} \frac{Z_2}{Z_2 + Z_0} \quad (2-35)$$

Dan untuk arus pada masing-masing fasa yang terkena gangguan yaitu fasa b dan c adalah :

$$I_b = I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2} \quad (2-36)$$

$$I_c = I_{a0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2} \quad (2-37)$$

2.11 Komponen Simetris

Karya Fortescue membuktikan bahwa suatu sistem tak seimbang yang terdiri dari n fasor yang berhubungan dapat diuraikan menjadi n buah sistem dengan fasor seimbang yang dinamakan komponen-komponen simetris dari fasor aslinya. n buah

faktor pada setiap himpunan komponennya sama panjang, dan sudut diantara faktor yang bersebelahan dalam himpunan itu sama besarnya. Menurut teorema Fortescue, tiga fasa tidak seimbang pada suatu sistem tiga fasa dapat diturunkan menjadi tiga faktor yang seimbang yaitu (Stevenson, 1994) :

- a. Komponen-komponen urutan positif yang terdiri dari tiga faktor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lainnya dalam fasa sebesar 120° , dan mempunyai urutan fasa yang sama seperti faktor aslinya.
- b. Komponen-komponen urutan negatif yang terdiri dari tiga faktor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lainnya dalam fasa sebesar 120° , dan mempunyai urutan fasa yang berlawanan dengan faktor aslinya.
- c. Komponen-komponen urutan nol yang terdiri dari tiga faktor yang sama besarnya dan dengan pergeseran fasa nol antara yang satu dengan yang lainnya.

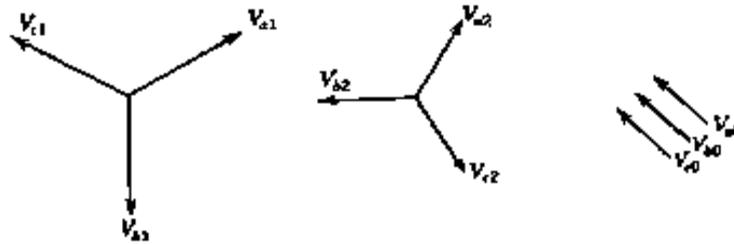
Dalam penyelesaian suatu persoalan dengan menggunakan komponen-komponen simetris bahwa ketiga fasa dari sistem dinyatakan sebagai a, b, c sehingga urutan fasa arus dan tegangan dalam sistem adalah abc. Maka urutan fasa dari komponen-komponen urutan positif dari phasor-phasor tak seimbang itu adalah abc, sedangkan untuk komponen-komponen urutan negatif adalah acb. Jika phasor aslinya adalah tegangan, tegangan tersebut dapat dinyatakan dengan V_a, V_b, V_c . Ketiga himpunan komponen-komponen simetris dinyatakan dengan subskrip tambahan 1 untuk komponen-komponen urutan-positif, 2 untuk komponen-komponen urutan-negatif, dan 0 untuk komponen-komponen urutan-nol. Komponen-komponen urutan positif dari V_a, V_b, V_c adalah V_{a1}, V_{b1}, V_{c1} . Demikian pula, komponen-komponen urutan negatif adalah V_{a2}, V_{b2}, V_{c2} , sedangkan komponen-komponen urutan nol adalah V_{a0}, V_{b0}, V_{c0} . Gambar 2.12 menunjukkan tiga himpunan komponen-komponen simetris tersebut. Phasor-phasor arus akan dinyatakan dengan I dengan subskrip-subskrip sama seperti untuk tegangan.

Karena setiap faktor yang tidak seimbang merupakan jumlah komponen-komponen, maka faktor-faktor aslinya dapat dituliskan sebagai berikut (Stevenson, 1994):

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (2-38)$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{a0} \quad (2-39)$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \quad (2-40)$$



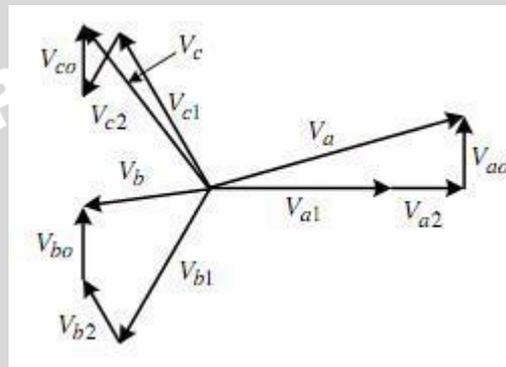
a. urutan positif

b. urutan negatif

c. urutan nol

Gambar 2.14 Tiga Himpunan Phasor-phasor Seimbang yang merupakan Komponen-Komponen Simetris dari Phasor-phasor tidak Seimbang

Sumber: (Stevenson, 1994)



Gambar 2.15 Penjumlahan secara Grafis Komponen-komponen pada Gambar 2.14 untuk Mendapatkan Phasor-phasor tak Seimbang

Sumber: (Stevenson, 1994)

Sintesa suatu himpunan tiga phasor tak seimbang dari ketiga himpunan komponen-komponen simetris dalam Gambar 2.14 diperlihatkan dalam Gambar 2.15.

Huruf *a* biasanya digunakan untuk menunjukkan operator yang menyebabkan perputaran sebesar 120° dalam arah yang berlawanan dengan arah jarum jam. Operator semacam ini adalah bilangan kompleks yang besarnya satu dan sudutnya 120° dan didefinisikan sebagai berikut (Stevenson, 1994) :

$$a = 1 \angle 120^\circ = -0.5 + j0.866$$

$$b = 1 \angle 240^\circ = -0.5 - j0.866$$

$$c = 1 \angle 320^\circ = 1$$

dengan berpedoman pada Gambar 2.12 didapat hubungan:

$$V_{b1} = a^2 V_{a1}$$

$$V_{c1} = a V_{a1}$$

$$V_{b2} = a V_{a1}$$

$$V_{c2} = a^2 V_{a1}$$

(2-41)

$$V_{b0} = V_{a0}$$

$$V_{c0} = V_{a0}$$

Dengan melihat persamaan (2-27) sampai dengan persamaan (2-29) didapatkan hasil:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (2-42)$$

$$V_b = a^2 V_{a1} + a V_{a2} + V_{a0} \quad (2-43)$$

$$V_c = a V_{a1} + a^2 V_{a2} + V_{a0} \quad (2-44)$$

Atau dalam bentuk matrik dapat ditulis :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (2-45)$$

Untuk memudahkan dimisalkan :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \text{ dan invers dari matriks A adalah :}$$

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2-46)$$

Sehingga dapat ditulis dalam bentuk persamaan sebagai berikut :

$$V_{a0} = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c) \quad (2-47)$$

$$V_{a1} = \frac{1}{3} (V_a + a V_b + a^2 V_c) \quad (2-48)$$

$$V_{a2} = \frac{1}{3} (V_a + a^2 V_b + a V_c) \quad (2-49)$$

Karena beberapa persamaan di atas sangat mendasar, di bawah ini dituliskan ringkasan untuk arus-arus :

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (2-50)$$

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2-51)$$

2.12 Metode Perhitungan Impedansi

2.12.1 Perhitungan Impedansi Transformator

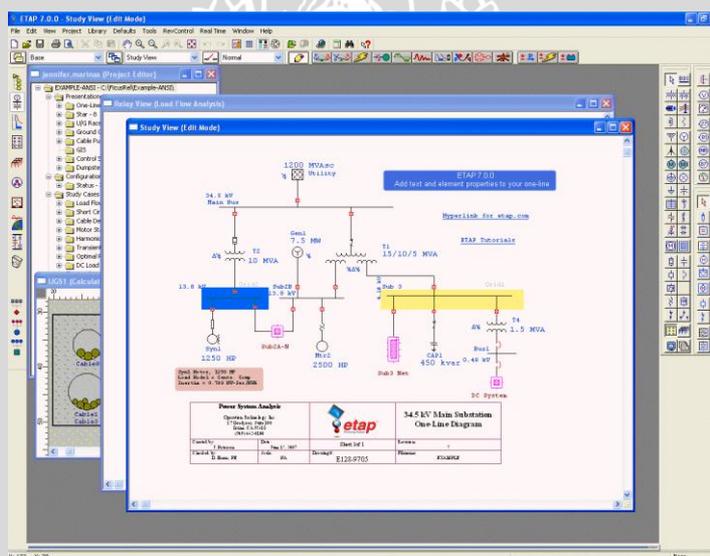
Data impedansi transformator yang didapat dari *nameplate* transformator dinyatakan dalam satuan persen. Sehingga perlu diubah menjadi satuan per unit dengan

dasar yang sesuai dengan sistem untuk mempermudah dalam penggunaannya dalam perhitungan. Persamaan impedansi transformator dinyatakan sebagai:

$$Z_{Tbaru} (\text{pu}) = Z_T (\text{pu}) \left[\frac{kV \text{ lama dasar}^2}{kV \text{ baru dasar}^2} \right] \times \left[\frac{kVA \text{ baru dasar}}{kVA t} \right] \Omega \quad (2-52)$$

2.13 Pengenalan ETAP

ETAP adalah *software* analisis yang sangat komprehensif untuk desain, simulasi, operasi, dan otomatisasi generasi, distribusi dalam suatu sistem kelistrikan industri. ETAP telah didesain oleh para ahli bidang kelistrikan untuk menangani berbagai macam permasalahan dalam industri secara luas. Semua fitur tersebut diintegrasikan dalam satu paket program yang memiliki banyak antarmuka dan *mode* analisis, seperti simulasi aliran daya, studi hubung singkat, hamonisa, *motor starting*, kestabilan transien, dan koordinasi proteksi. Adapun bentuk tampilan *software* ETAP dapat dijelaskan dengan Gambar 2.16



Gambar 2.16 Tampilan *software* ETAP
Sumber : (ETAP Powerstation, 1998)

ETAP mendukung kita bekerja secara langsung dengan *single line diagram* dan sistem penjaluran kabel bawah tanah karena telah didesain dengan menggunakan tiga konsep berikut :

- *Virtual reality operation*

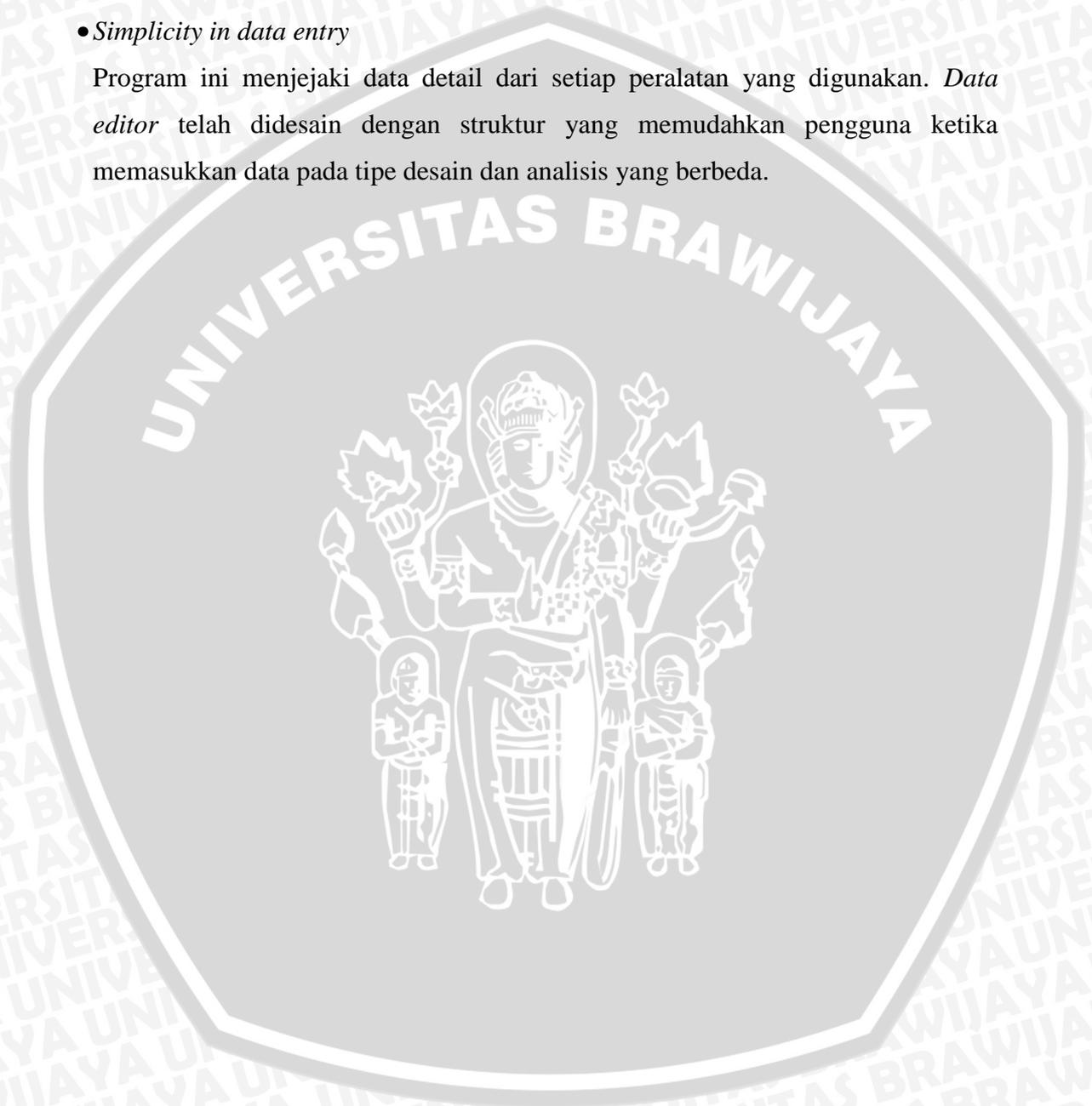
Program ini merepresentasikan sistem kelistrikan semirip mungkin. Sebagai contoh, ketika membuka atau menutup CB, Menghentikan operasi peralatan, atau mengubah status operasi motor, dan lain-lain.

- *Total integration of data*

Program ini mengkombinasikan segala aspek sistem termasuk sifat elektrik, logika, mekanik, dan juga sifat fisik peralatan ke dalam satu *database*. Misalnya *database* kabel tidak hanya berisi sifat elektrik dari kabel saja, tetapi juga terdapat aspek fisik seperti ukuran kabel, dan juga informasi mengenai penjalurannya di bawah tanah.

- *Simplicity in data entry*

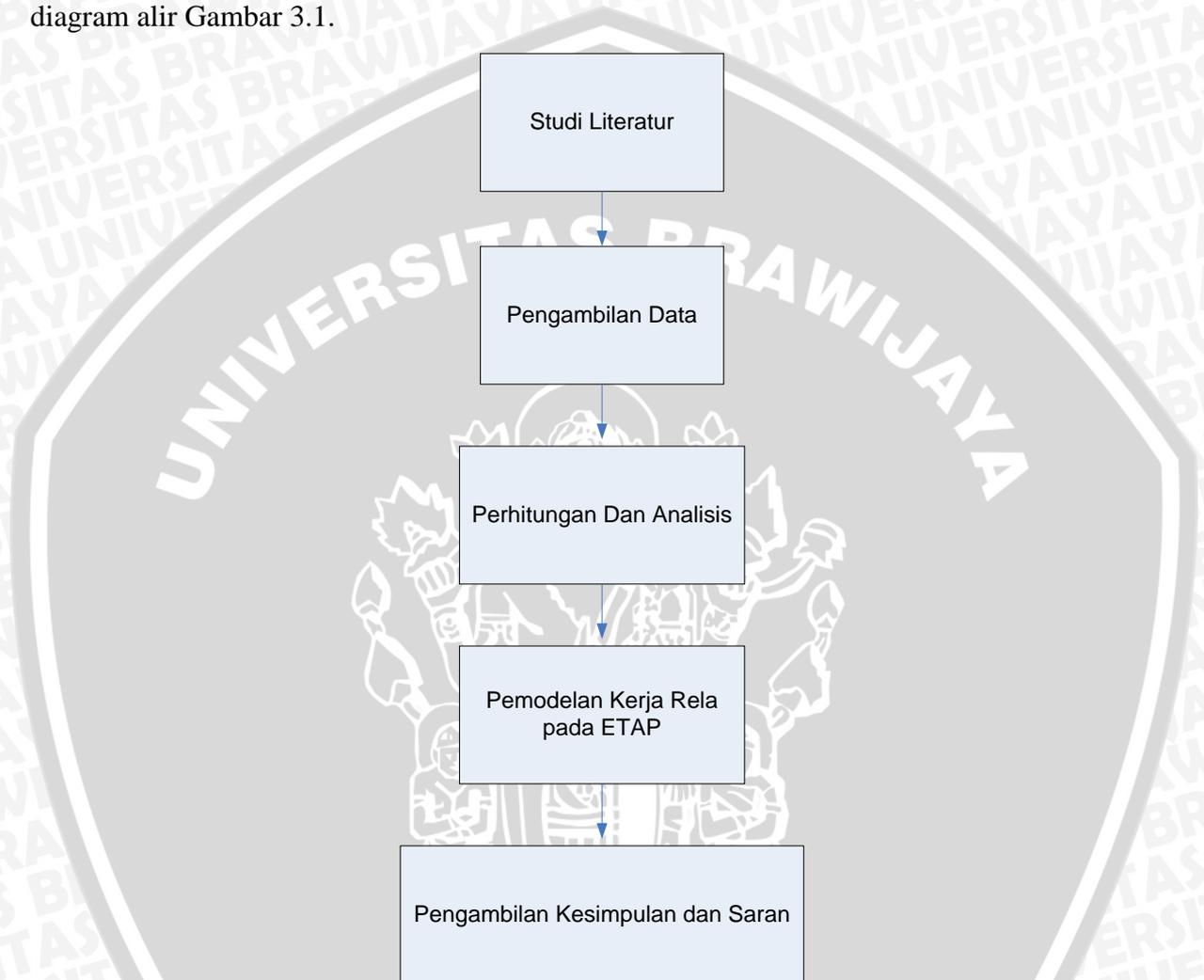
Program ini menjejaki data detail dari setiap peralatan yang digunakan. *Data editor* telah didesain dengan struktur yang memudahkan pengguna ketika memasukkan data pada tipe desain dan analisis yang berbeda.



BAB III

METODE PENELITIAN

Untuk menyelesaikan rumusan masalah dan merealisasikan tujuan penelitian, maka diperlukan metodologi untuk menyelesaikan masalah tersebut sesuai dengan diagram alir Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Metode Pengerjaan Penelitian

3.1 Studi Literatur

Studi literatur yang dilakukan adalah untuk mempelajari dan memahami konsep yang terkait dengan masalah analisis impedansi urutan sistem, perhitungan arus hubung singkat, dan pengaturan rele arus lebih. Besar perhitungan arus hubung singkat tiga fasa, satu fasa ke tanah, antar fasa, dan dua fasa ke tanah berpengaruh terhadap setelan rele arus lebih.

3.2 Pengambilan Data

Pengambilan data penelitian ini dilakukan di pabrik PT. Ajinomoto Mojokerto. Sesuai dengan laporan kejadian pada tanggal 7 Agustus 2012, bahwa terjadi gangguan hubung singkat pada *compressor* di *feeder* II F. Pengambilan data berupa diagram satu garis, data motor, data rele arus lebih, dan peralatan lain yang berhubungan dengan penyetelan ulang rele arus lebih.

3.3 Prosedur Perhitungan

Langkah-langkah perhitungan dan analisis untuk memperoleh hasil akhir dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

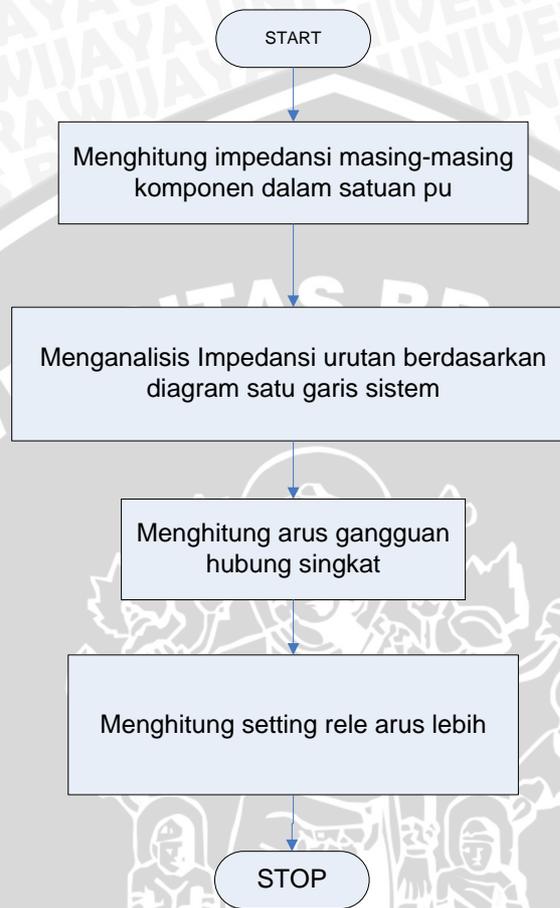
1. Menghitung impedansi masing-masing komponen yaitu transformator, motor, dan kabel dalam satuan per-unit (pu). Perhitungan satuan per-unit menggunakan persamaan 2.20.
2. Menganalisis impedansi urutan berdasarkan diagram satu garis *feeder* II F PT. Ajinomoto. Impedansi urutan yang dianalisis adalah impedansi urutan negatif, dan impedansi urutan nol. Analisis dilakukan dengan acuan titik gangguan yang sesuai dengan penempatan rele arus lebih yang akan di-*setting*.
3. Menganalisis arus gangguan hubung singkat.
Dengan menggunakan persamaan 2.25, 2.31, 2.32, 2.34 maka dapat dihitung arus gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, hubung singkat antar fasa, dua fasa ke tanah, dan tiga fasa.
4. Menghitung *setting* rele arus lebih.
Setting rele arus lebih yang dianalisis adalah *setting* arus dan *setting* waktu. *Setting* arus didapat dengan menghitung besaran arus terbesar yang terjadi pada saat gangguan hubung singkat. Dan untuk *setting* waktunya berdasarkan karakteristik waktu kerja rele arus lebih tipe COC4-A02D.

3.4 Pemodelan dan Simulasi

Setelah mendapatkan data-data dan setelan rele arus lebih maka dilakukan pemodelan dalam bentuk simulasi menggunakan *software* ETAP 7.0. Dalam penelitian ini dilakukan permodelan sistem kelistikan *feeder* II F PT. Ajinomoto dalam bentuk *single line diagram*. Tujuan dari simulasi ini adalah mengetahui grafik kerja rele arus lebih pada saat terjadi gangguan.

3.5 Diagram Alir Perhitungan

Urutan proses perhitungan dalam analisis dan pembahasan dapat dilihat pada Gambar 3.2 sebagai berikut :



Gambar 3.2 Diagram Alir Proses Perhitungan

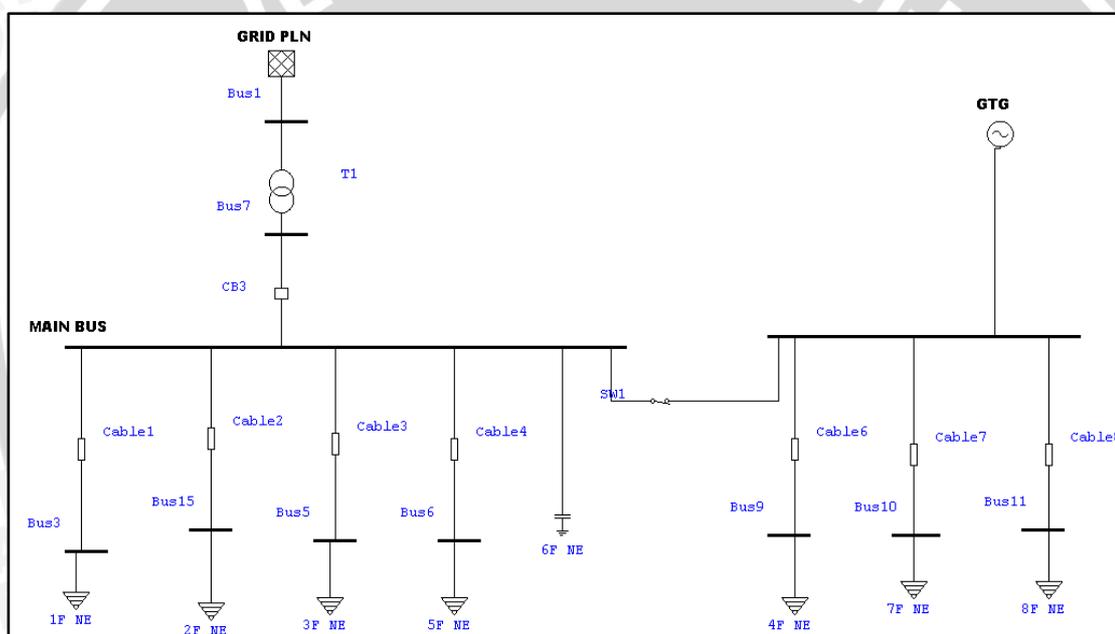
3.6 Pengambilan Kesimpulan dan Saran

Membuat kesimpulan dari hasil analisa data untuk memperoleh besar arus gangguan hubung singkat, dan pengaturan ulang rele arus lebih pada sistem kelistrikan *feeder* II F PT. Ajinomoto.

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Sistem Pembangkit

Pembangkit listrik PT. Ajinomoto berasal dari dua sumber daya yaitu tegangan jala-jala PLN dan GTG (*Gas Turbine Generator*) dengan kapasitas daya 8,5 MVA. Tegangan keluaran dari GTG adalah 3.3 kV dengan frekuensi 50 Hz, sedangkan tegangan jala-jala PLN adalah 70 kV dengan frekuensi 50 Hz. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 tegangan jala-jala PLN mencatu *feeder* 1F, 2F, 5F, dan 6F. Sedangkan *feeder* 4F, 7F, dan 8F dicatu GTG.



Gambar 4.1 Single Line Diagram sistem PT. Ajinomoto
Sumber: Data PT. Ajinomoto

Dari Gambar 4.1 ditunjukkan bahwa sebelum memasuki bus utama tegangan jala-jala PLN 70 kV diturunkan melalui transformator *step-down* menjadi 3.3 kV. Tegangan 3.3 kV merupakan tegangan yang didistribusikan ke beban-beban mulai *feeder* 1F sampai 6F. untuk rincian pembagian beban lebih lengkap disajikan pada Lampiran 3.

Spesifikasi transformator dapat tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.1 sebagai berikut :

Tabel 4.1 Spesifikasi Transformator *Step-Down*

<i>Rating Power</i>	18 MVA
<i>Rating tegangan</i>	70 kV / 3.3 kV
<i>Rating frekuensi</i>	50 Hz
Jumlah fasa	3
Impedansi	9.16 %

Sumber: Data PT. Ajinomoto

4.2 Sistem Distribusi *Feeder 2F*

Feeder 2F pada Gambar 2.1 mencatu beban-beban berupa motor dengan kapasitas daya mulai 150 kW hingga 1450 kW dengan *rating* tegangan 3.3 kV frekuensi 50 Hz. Motor-motor tersebut berperan sebagai penggerak *compressor*, *jet pump*, *fan*, *chiller*, dan *boiler* yang digunakan dalam proses industri seperti sterilisasi, fermentasi, kristalisasi dan netralisasi, pengeringan dan pengayakan. Data pembebanan pada *feeder 2F* diberikan pada Tabel 4.2 :

Tabel 4.2 Data Pembebanan *Feeder 2F*

NO	BEBAN	KAPASITAS
1	Motor Pompa C	150 kW
2	Motor Pompa D	150 kW
3	Motor Pompa E	150 kW
4	Motor Pompa F	150 kW
5	Motor Listrik	150 kW
6	Motor Listrik	1000 kW
7	Motor Listrik	1450 kW
8	Motor Listrik	410 kW
9	Motor Listrik	410 kW
10	Transformator	2000 kVA
11	Transformator	1500 kVA
12	Sub Trafo (SC)	2000 kVA

Sumber: Data PT. Ajinomoto

Studi kasus penelitian dilakukan pada motor listrik dengan daya 1000 kW sesuai dengan penjelasan latar belakang di Bab I.

Pengambilan data terkait penelitian ini berupa data motor induksi 3 fasa, data kabel yang menyalurkan tenaga listrik, dan data rele arus lebih sebagai pengaman utama motor.

4.2.1 Data Motor

Tabel 4.3 merupakan data spesifikasi motor listrik no. 1 yang terdapat pada sistem tenaga PT. Ajinomoto *feeder* 2F.

Tabel 4.3 Spesifikasi Motor No.1 *Feeder* 2F

Type	Mitsubishi F5KT-H1W
Pole	4
Rating Daya	1000 kW / 1250 kVA
Cos phi	0.8
Frekuensi	50 Hz
Tegangan	3.3 kV
Arus	210 A
x''d (pu)	0.20
Putaran	1500 rpm

Sumber : data PT. Ajinomoto

4.2.2 Data Kabel

Kabel yang digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik pada PT. Ajinomoto mulai dari jala-jala PLN sampai ke beban motor listrik no.1 pada *feeder* 2F adalah kabel tipe N2XSEY dengan luas penampang 240 mm², 300 mm², dan 400 mm². Keterangan instalasi kabel tersebut terdapat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Keterangan instalasi kabel mulai jala-jala PLN sampai ke beban motor listrik no.1 pada *feeder* 2F

Lokasi	Type Kabel	Diameter (mm ²)	jarak (m)
bus PLN - TR 01 (prim)	N2XSEY	400	50
TR 01(sek)-input feeder	N2XSEY	400	60
out feeder-incoming 2F	N2XSEY	300	600
incoming 2F- motor	N2XSEY	240	65

Sumber: Data PT. Ajinomoto

4.2.3 Data Rele Arus Lebih

Tipe rele arus lebih yang digunakan sebagai pengaman utama motor induksi 3 fasa adalah COC4-A02D1 dari Mitsubishi Electric. Untuk keterangan lebih lengkap mengenai jenis rele tersebut dapat dilihat pada lampiran 1.

4.3 Pengolahan data

Untuk mengubah semua nilai impedansi komponen-komponen dalam satuan pu (per-unit) harus ditentukan terlebih dahulu daya dasar (MVA_{dasar}), tegangan dasar (kV_{dasar}). Ditetapkan daya dasar 18 MVA dan tegangan dasar 3.3 kV. Nilai impedansi baru dalam satuan pu didapat dari perhitungan dengan menggunakan Persamaan 2.20

$$Z_{\text{baru}} (\text{pu}) = Z_{\text{lama}} (\text{pu}) \left[\frac{kV \text{ lama dasar}^2}{kV \text{ baru dasar}^2} \right] \times \left[\frac{kVA \text{ baru dasar}}{kVA \text{ lama dasar}} \right]$$

4.3.1 Perhitungan Impedansi Transformator

Nilai impedansi transformator dengan menggunakan dasar baru dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 2.38

$$Z_{\text{baru}} (\text{pu}) = Z_{\text{lama}} (\text{pu}) \left[\frac{kV \text{ lama dasar}^2}{kV \text{ baru dasar}^2} \right] \times \left[\frac{MVA \text{ baru dasar}}{MVA \text{ lama dasar}} \right]$$

Untuk transformator *step-down* pada sistem tenaga PT. Ajinomoto dengan impedansi 9.16 % :

$$\begin{aligned} Z_{\text{baru}} (\text{pu}) &= Z_{\text{lama}} (\text{pu}) \left[\frac{kV \text{ lama dasar}^2}{kV \text{ baru dasar}^2} \right] \times \left[\frac{MVA \text{ baru dasar}}{MVA \text{ lama dasar}} \right] \\ &= j0.0916 \left[\frac{3.3}{3.3} \right]^2 \left[\frac{18}{18} \right] \\ &= j0.0916 \text{ pu} \\ Z_1 = Z_2 = Z_3 &= j0.0916 \text{ pu} \end{aligned}$$

4.3.2 Perhitungan Impedansi Motor

Spesifikasi motor induksi 3 fasa pada *feeder* 2F ditunjukkan pada Tabel 2.3.

Untuk mendapatkan nilai impedansi urutan positif, negatif dan impedansi urutan nol digunakan Persamaan 2.20 :

$$\begin{aligned} Z_{\text{baru}} (\text{pu}) &= Z_{\text{lama}} (\text{pu}) \left[\frac{kV \text{ lama dasar}^2}{kV \text{ baru dasar}^2} \right] \times \left[\frac{MVA \text{ baru dasar}}{MVA \text{ lama dasar}} \right] \\ Z_1 = Z_2 &= j0.2 \times \left[\frac{3.3}{3.3} \right]^2 \left[\frac{18}{1.25} \right] \\ &= j2.448 \text{ pu} \\ Z_1 = Z_2 = Z_0 &= j2.448 \text{ pu} \end{aligned}$$

4.3.3 Perhitungan Impedansi Kabel

Sesuai dengan data pada Tabel 4.4 perhitungan impedansi kabel diberikan pada masing-masing ukuran diameter kabel, yaitu 240 mm², 300 mm², dan 400 mm². Data karakteristik dan data elektrik kabel yang diperlukan dalam perhitungan terdapat pada lampiran 2.

Selanjutnya besar impedansi dapat ditentukan berdasarkan data-data karakteristik dan mekanik kabel sebagai berikut:

Tabel 4.5 Tabel Perhitungan Impedansi Saluran mulai dari Bus PLN sampai ke Motor

Lokasi	L (km)	Tipe Kabel	A (mm ²)	Z ₁ =Z ₂ (Ω)	Z ₀ (Ω)
bus PLN - TR 01 (prim)	50 x 10 ⁻³	NAXSEY	400	0.0021 + j0.0124	0.0050 + j0.0110
TR 01(sek)-input feeder	60 x 10 ⁻³	NAXSEY	400	0.0025 + j0.0149	0.0060 + j0.0132
out feeder-incoming 2F	600 x 10 ⁻³	NAXSEY	300	0.0452 + j0.1560	0.0780 + j0.1320
incoming 2F- motor	65 x 10 ⁻³	NAXSEY	240	0.0049 + j0.0071	0.0104 + j0.0150

Sumber: Hasil Analisis

Dengan daya dasar baru yaitu 18 MVA dan tegangan dasar 3.3 kV maka didapat impedansi dasar sesuai Persamaan 2.18 yaitu :

$$Z_{\text{dasar}} = \frac{[kV_{\text{dasar}}]^2}{MVA_{\text{dasar}}} = \frac{3.3^2}{18} = 0.605 \Omega$$

Nilai dari Z_{dasar} digunakan untuk mendapatkan besar impedansi saluran dalam satuan per-unit dengan menggunakan persamaan:

$$\text{Impedansi per-unit} = \frac{\text{impedansi sebenarnya } \Omega}{\text{impedansi dasar } \Omega}$$

Maka impedansi saluran dalam satuan per unit dapat dilihat pada Tabel 4.6

Tabel 4.6 Impedansi Saluran dalam Satuan Per Unit

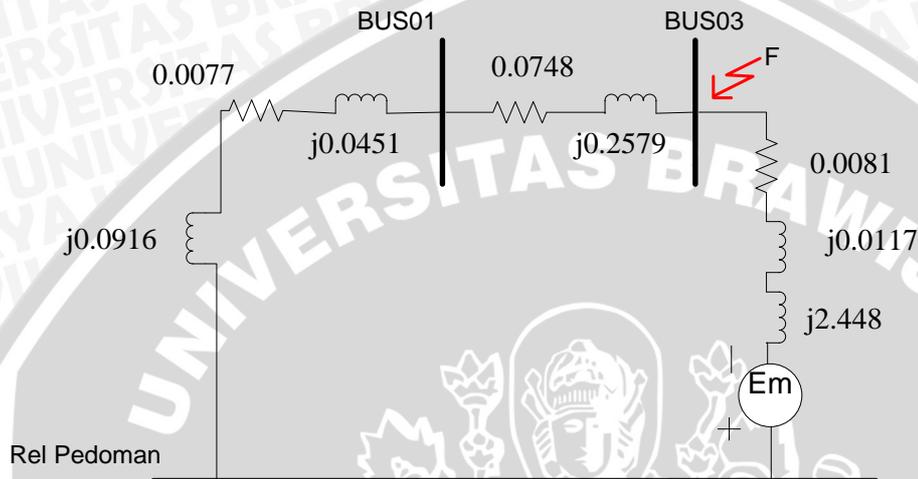
Lokasi	Z ₁ = Z ₂ (pu)	Z ₀ (pu)
bus PLN - TR 01 (prim)	0.0035 + j0.0205	0.0083 + j0.0182
TR 01(sek)-input feeder	0.0042 + j0.0246	0.0099 + j0.0218
out feeder-incoming 2F	0.0748 + j0.2579	0.1289 + j0.2182
incoming 2F- motor	0.0081 + j0.0117	0.0172 + j0.0247

Sumber: Hasil Analisis

4.4 Perhitungan Nilai Impedansi Urutan pada Titik Gangguan

4.4.1 Analisis Nilai Impedansi Urutan Positif pada Titik Gangguan

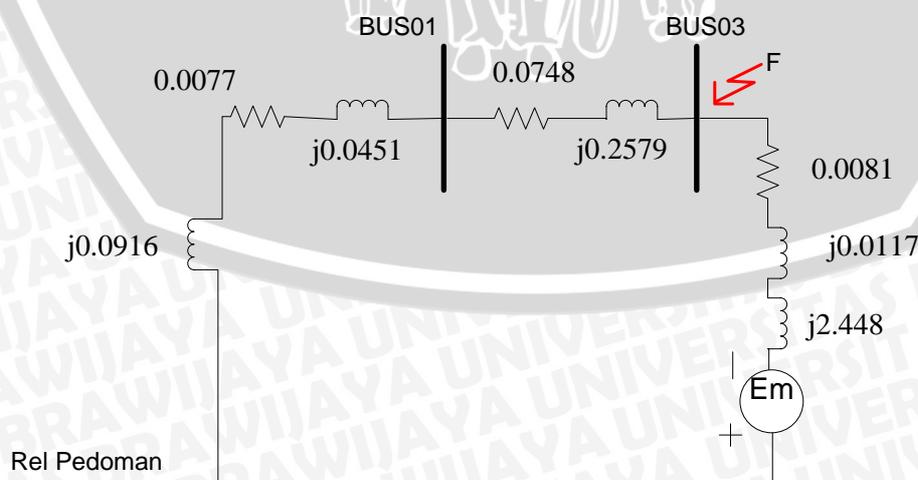
Dalam menganalisa nilai impedansi urutan positif pada titik-titik gangguan suatu sistem tenaga listrik dapat dilakukan dengan cara mengubah diagram satu garis sistem kelistrikan menjadi Gambar 4.2 di bawah ini yang terlebih dahulu telah didapat nilai impedansi urutan positif dari masing-masing komponennya.



Gambar 4.2 Jaringan Impedansi Urutan Positif
Sumber: Hasil Analisis

4.4.2 Analisis Nilai Impedansi Urutan Negatif pada Titik Gangguan

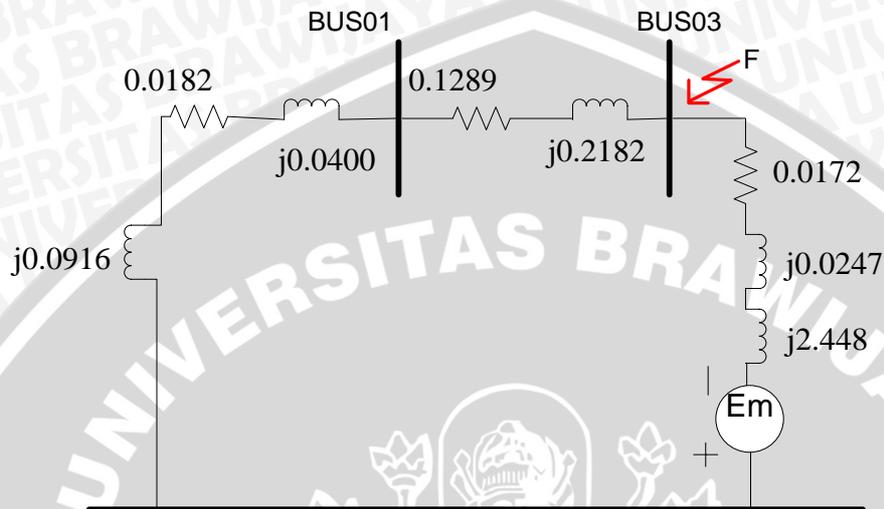
Dalam menganalisa nilai impedansi urutan negatif pada titik-titik gangguan suatu sistem tenaga listrik dapat dilakukan dengan cara mengubah diagram satu garis sistem kelistrikan menjadi Gambar 4.3 di bawah ini yang terlebih dahulu telah didapat nilai impedansi urutan negatif dari masing-masing komponennya:



Gambar 4.3 Jaringan Impedansi urutan Negatif
Sumber: Hasil Analisis

4.4.3 Analisis Nilai Impedansi Urutan Nol pada Titik Gangguan

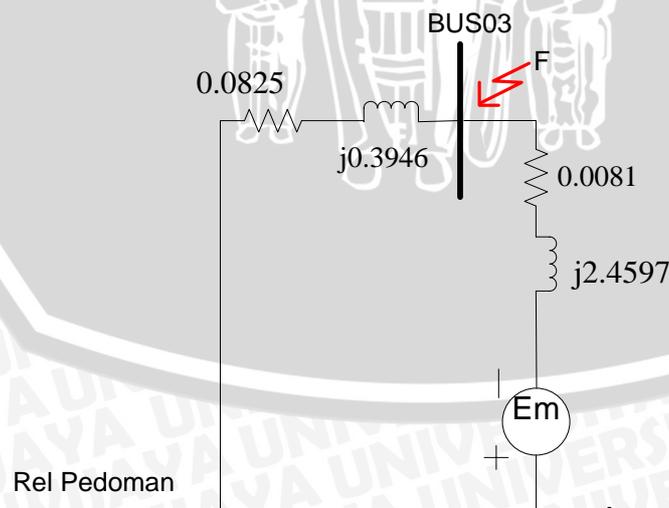
Dalam menganalisa nilai impedansi urutan positif pada titik-titik gangguan suatu sistem tenaga listrik dapat dilakukan dengan cara mengubah diagram satu garis sistem kelistrikan menjadi Gambar 4.4 di bawah ini yang terlebih dahulu telah didapat nilai impedansi urutan nol dari masing-masing komponennya:



Gambar 4.4 Jaringan Impedansi Urutan Nol
Sumber: Hasil Analisis

4.4.4 Analisis Nilai Impedansi Urutan pada Titik Gangguan

Analisis nilai impedansi urutan yang terjadi pada titik F dapat dihitung dengan cara menyederhanakan Gambar 4.2 menjadi seperti pada Gambar 4.5, maka Z_1 ekuivalen:



Gambar 4.5 Jaringan Impedansi Urutan Positif dan Penyederhanaanya
Sumber: Hasil Analisis

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= \frac{(0.0825 + j0.3946) \times (0.0081 + j2.4597)}{(0.0825 + j0.3946) + (0.009787603 + j2.464352066)} \\
 &= 0.0770864705648392 + j0.24560028296153 \\
 &= 0.0771 + j0.2456 \text{ pu}
 \end{aligned}$$

Dengan cara yang sama maka didapatkan nilai dari Z_1 , Z_2 , dan Z_0 seperti pada Tabel 4.7:

Tabel 4.7 Impedansi Gangguan pada Titik Gangguan

Titik Gangguan	$Z_1(\text{pu})$	$Z_2(\text{pu})$	$Z_0(\text{pu})$
F	$0.0614 + j0.3418$	$0.0614 + j0.3418$	$0.1128 + j0.3121$

Sumber: Hasil Analisis

4.5 Analisis Gangguan Hubung Singkat

Untuk perhitungan arus gangguan hubung singkat, tegangan sebelum gangguan adalah:

$$V_f = 1.0 \text{ pu}$$

4.5.1 Analisis Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa

Pada gangguan hubung singkat tiga fasa, perhitungan arus gangguannya digunakan Persamaan 2.32 :

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1}$$

Untuk gangguan hubung singkat pada titik gangguan (F) maka:

$$Z_1 = 0.0614 + j0.3418 \text{ pu}$$

Dan besar arus dasar :

$$\frac{18MVA}{\sqrt{3} \times 3.3 \text{ kV}} = 3149.18 \text{ A}$$

Sehingga besar arus gangguan hubung singkat tiga fasa pada titik F adalah:

$$\begin{aligned}
 I_{a1} &= \frac{1.0 \angle 0}{0.0614 + j0.3418} \\
 &= 3.8800 \angle -79.82^\circ \text{ pu}
 \end{aligned}$$

Dengan $I_{a0} = I_{a2} = 0$, maka besar arus tiap fasanya (A) adalah

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ 3.8800 \angle -79.82^\circ \\ I_{a2} \end{bmatrix} \times 3149.18$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 3.8800 \angle -79.82^\circ \\ 0 \end{bmatrix} \times 3149.18$$

$$I_a = 12218.83 \angle -79.82^\circ \text{ A}$$

$$I_b = 12218.83 \angle 160.18^\circ \text{ A}$$

$$I_c = 12218.83 \angle 40.18^\circ \text{ A}$$

4.5.2 Analisis Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa

Untuk menghitung arus gangguan hubung singkat antar fasa pada titik F digunakan Persamaan 2.31:

$$\begin{aligned} I_{a1} &= \frac{V_f}{Z_1 + Z_2} \\ &= \frac{1 \angle 0}{0.0614 + j0.3418 + 0.0614 + j0.3418} \\ &= 1.440 \angle -79.82^\circ \text{ pu} \end{aligned}$$

$$I_{a2} = -I_{a1} = -1.440 \angle -79.82^\circ \text{ pu}$$

$$I_{a0} = 0 \text{ pu}$$

Sedangkan arus tiap fasa nya adalah :

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1.44 \angle -79.82^\circ \\ -1.44 \angle -79.82^\circ \end{bmatrix} \times 3012.262$$

$$I_a = 0 \text{ A}$$

$$I_b = 8926.651 \angle 150.007^\circ \text{ A}$$

$$I_c = 4534.074 \angle 100.202^\circ \text{ A}$$

4.5.3 Analisis Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Untuk menghitung arus gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah digunakan Persamaan 2.25:

$$I_{hs} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

Untuk gangguan hubung singkat di titik F :

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0}; Z_0 = 0.1128 + j0.3121$$

$$Z_1 = Z_2 = 0.0614 + j0.3418$$

$$= \frac{1 \angle 0^\circ}{0.2356 + j0.9956} = 0.9774 \angle -76.88^\circ \text{ pu}$$

$$I_{a2} = I_{a1} = I_{a0} = 0.9774 \angle -76.88^\circ \text{ pu}$$

Dan untuk besar arus tiap fasa adalah :

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.9774 \angle -76.88^\circ \\ 0.9774 \angle -76.88^\circ \\ 0.9774 \angle -76.88^\circ \end{bmatrix} \times 3149.18 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} I_a &= 3(0.9774 \angle -76.88^\circ) \times 3149.18 \\ &= 9233.97 \angle -89.68974132^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

$I_b = I_c = 0 \text{ A}$, karena diasumsikan bahwa fasa yang mengalami gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah adalah fasa a.

4.5.4 Analisis Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah

Untuk menghitung arus gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah digunakan

Persamaan 2.33 :

$$I_{hs} = \frac{V_f}{Z_1 + \frac{Z_2 Z_0}{Z_2 + Z_0}}$$

Untuk gangguan hubung singkat di titik F, digunakan persamaan 2.33 untuk menghitung arus urutan positif

$$\begin{aligned} I_{a1} &= \frac{V_f}{Z_1 + \frac{Z_2 Z_0}{Z_2 + Z_0}} \\ &= \frac{1 \angle 0}{0.0614 + j0.3418 + \frac{(0.0614 + j0.3418)(0.1128 + j0.3121)}{(0.0614 + j0.3418) + (0.1128 + j0.3121)}} \\ &= 1.935 \angle -78.19^\circ \text{ pu} \end{aligned}$$

Persamaan 2.34 untuk menghitung arus urutan negatif

$$\begin{aligned} I_{a2} &= -I_{a1} \frac{Z_0}{Z_2 + Z_0} \\ &= -1.935 \angle -78.19^\circ \frac{0.1128 + j0.3121}{0.0614 + j0.3418 + 0.1128 + j0.3121} \\ &= -0.949 \angle -83.15^\circ \text{ pu} \end{aligned}$$

Dan persamaan 2.35 untuk menghitung arus urutan nol

$$\begin{aligned} I_{a0} &= -I_{a1} \frac{Z_2}{Z_2 + Z_0} \\ &= 1.935 \angle -78.19^\circ \angle -78.19^\circ \left[\frac{0.0614 + j0.3418}{0.0614 + j0.3418 + 0.1128 + j0.3121} \right] \\ &= -0.993 \angle -73.45^\circ \text{ pu} \end{aligned}$$

Sedangkan besar arus tiap fasa adalah dengan $I_a = 0$ (diasumsikan bahwa fasa yang mengalami gangguan dua fasa ke tanah adalah fasa b dan c) :

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.993 \angle -73.45 \\ 1.935 \angle -78.19 \\ -0.949 \angle 83.15 \end{bmatrix} \times 3149.18$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.888 \angle 175.608 \\ 0.7657 \angle 68.011 \end{bmatrix} \times 3149.18$$

$$I_a = 0 \text{ A}$$

$$I_b = 9097.615853 \angle 175.61^\circ \text{ A}$$

$$I_c = 2411.330465 \angle 68.011^\circ \text{ A}$$

4.6 Setelan Rele Arus Lebih Sebagai Pengaman Utama Motor

Untuk menentukan nilai setelan rele arus lebih pada F, dihitung terlebih dahulu arus nominal beban yaitu :

$$\text{Daya beban} = 1250 \text{ kVA}$$

$$\text{Tegangan} = 3.3 \text{ kV}$$

$$\text{CT rasio} = 400/5$$

Arus nominal beban pada titik F adalah :

$$\begin{aligned} I_{\text{beban}} = I_n &= \frac{kVA}{\sqrt{3}kV} \\ &= \frac{1250}{\sqrt{3} \times 3.3} \\ &= 218.693 \text{ A} \end{aligned}$$

4.6.1 Setelan Arus

Untuk mendapatkan setelan arus pada rele arus lebih digunakan Persamaan 2.3 :

$$I_s = \frac{k_f k}{k_d} \times I_{\text{beban}}$$

Dengan $k_{fk} = 1.2$ dan $k_d = 1$, untuk rele arus lebih dengan karakteristik operasi waktu *inverse*. Sehingga setelan arus rele sebagai berikut :

$$\begin{aligned} I_s &= \frac{k_f k}{k_d} \times I_{\text{beban}} \\ I_s &= \frac{1.2}{1.0} \times 218.693 \\ &= 262.432 \text{ A} \end{aligned}$$

Nilai setelan tersebut merupakan setelan nilai primer. Untuk mendapatkan nilai setelan sekunder pada rele arus lebih tersebut harus dihitung dengan menggunakan data rasio transformator arus yang terpasang sesuai dengan Persamaan 2.4 :

Jadi arus yang melewati kumparan rele:

$$\begin{aligned}
 I_{\text{set(sek)}} &= I_{\text{set(pri)}} \times (1/\text{rasio CT}) \\
 &= 262.432 \times (5/400) \\
 &= 3.28 \text{ A}
 \end{aligned}$$

4.6.2 Setelan Waktu

Rele COC4-A02D1 merupakan rele multifungsi, yang bisa disetel sebagai *Over Current Relay* (OCR) dan sebagai *Ground Fault Relay* (GFR). OCR akan mengamankan sistem dari gangguan hubung singkat tiga fasa dan antar fasa, sedangkan GFR akan mengamankan sistem dari gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah dan dua fasa fasa ke tanah. Setelan waktu operasi rele dapat dilihat pada lampiran 2.

Untuk OCR digunakan tipe *long inverse*, yang dihitung dengan menggunakan rumus kurva waktu dan arus sesuai dengan karakteristik rele COC4-A02D1 yaitu :

$$t(s) = \frac{54}{I-1} \times \frac{M}{10}$$

Sedangkan tipe GFR digunakan tipe *very inverse* dengan persamaan :

$$t(s) = \frac{13.5}{I-1} \times \frac{M}{10}$$

- Setelan OCR

Untuk menentukan nilai M (pengali waktu) / TMS (*Time Multiple Setting*) yang akan disetel pada rele arus lebih diambil nilai arus gangguan antar fasa yang terjadi pada titik F yaitu sebesar 4534.07 A. Dan waktu kerja rele arus lebih dipilih waktu paling singkat selama 0.25 detik. Maka Nilai M yang akan disetel pada rele arus lebih adalah :

$$\begin{aligned}
 M &= \frac{t(s) \left[\frac{I_{hs}}{I_{\text{set.pri}}} - 1 \right]}{5.4} \\
 &= \frac{0.25 \left[\frac{4534.07}{262.432} - 1 \right]}{5.4} = 0.75
 \end{aligned}$$

Sehingga digunakan M = 0.75, sesuai dengan karakteristik kerja rele, maka waktu kerja rele pada titik gangguan F adalah :

$$\begin{aligned}
 t(s) &= \frac{54}{I-1} \times \frac{M}{10} \\
 &= \frac{54}{\left(\frac{4534.07}{262.432} \right) - 1} \times \frac{0.75}{10} = 0.248 \text{ detik}
 \end{aligned}$$

- Setelan GFR

Untuk menentukan nilai M (pengali waktu) / TMS (*Time Multiple Setting*) yang akan disetel pada rele arus lebih diambil nilai arus gangguan dua fasa ke tanah yang terjadi pada titik F sebesar 2411.33 A. Dan waktu kerja rele arus lebih dipilih waktu paling singkat yaitu selama 0.25 detik. Maka Nilai M yang akan disetel pada rele arus lebih adalah :

$$M = \frac{t(s) \left[\frac{I_{hs}}{I_{set,pri}} - 1 \right]}{1.35}$$

$$= \frac{0.25 \left[\frac{2411.33}{262.432} - 1 \right]}{1.35} = 0.962017 \approx 1$$

Sehingga digunakan M = 1, sesuai dengan karakteristik kerja rele, maka waktu kerja rele pada titik gangguan F adalah :

$$t(s) = \frac{13.5}{I-1} \times \frac{M}{10}$$

$$= \frac{54}{\left(\frac{2411.33}{262.432} \right) - 1} \times \frac{1}{10} = 0.259871 \text{ detik}$$

Untuk setelan rele arus lebih (*Relay1*) tipe COC4-A02D1 (Mistubishi Electric) sebagai pengaman motor 1000 kW pada *feeder* 2F sebelum dan sesudah perhitungan ditampilkan pada Tabel 4.9

Tabel 4.8 Perbandingan setelan rele arus lebih sebelum dengan setelah perhitungan

Sebelum Perhitungan		Setelah Perhitungan	
CT = 400/5		CT = 400/5	
I _{set primer} = 225 A		I _{set primer} = 262.432 A	
I _{set sekunder} = 2.75 A		I _{set sekunder} = 3.28 A	
OCR	GFR	OCR	GFR
M = 1	M = 1	M = 0.75	M = 1
t = 1	t = 1	t = 0.25	t = 0.25

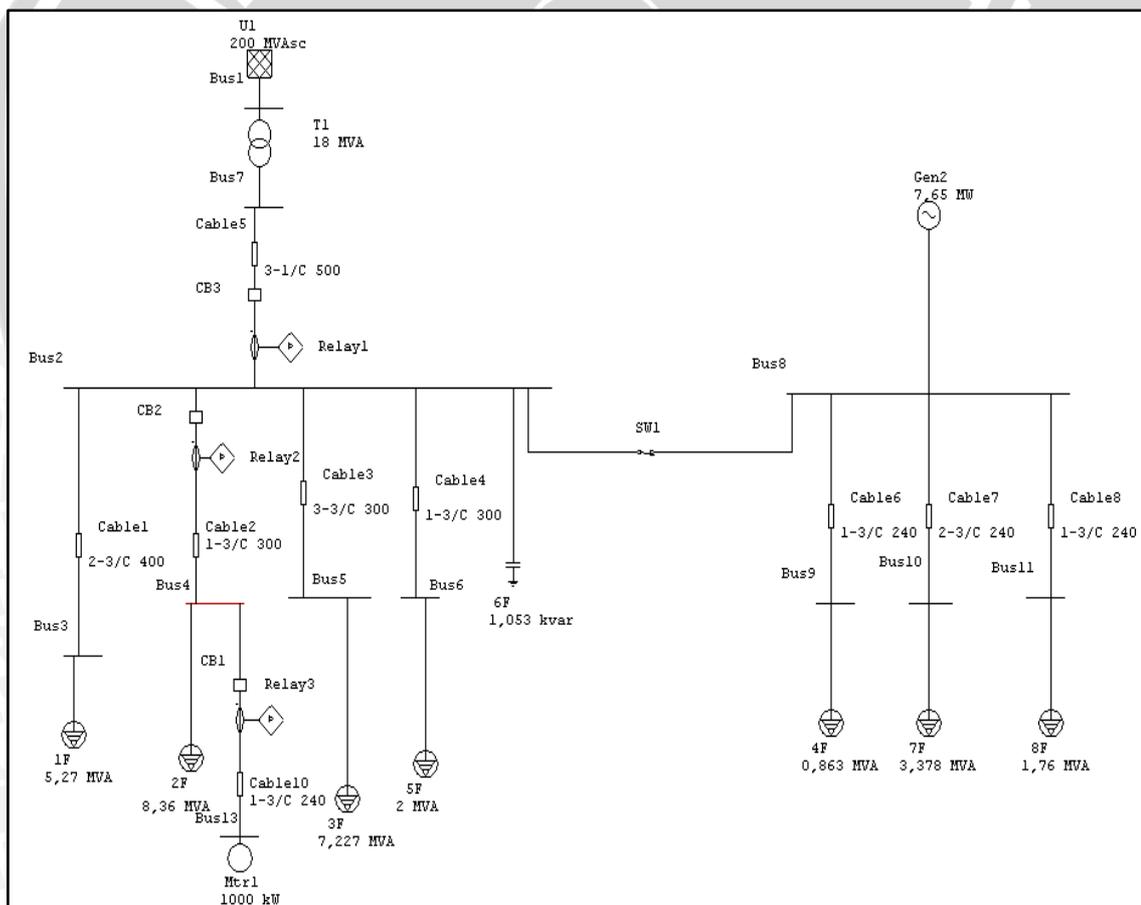
Sumber : Hasil Analisis

Setelan lama atau sebelum perhitungan tidak sesuai dengan acuan pada dasar teori. Dengan nilai I_{set primer} sebesar 225 A dan arus nominal beban 218.69 A, maka didapat besar koefisien keamanan (K_{fk}) 1.03. Padahal sesuai pada dasar teori apabila digunakan rele tipe *inverse* nilai K_{fk} sebesar 1.2. Selain itu, nilai *time dial* pada sisi *downstream* yang digunakan terlalu besar. Seharusnya diambil *time dial* paling singkat untuk rele

tersebut mengingat besar arus gangguan hubung sangat berbahaya. Oleh karena itu setelan arus dan waktu setelah perhitungan tersebut direkomendasikan sebagai setelan baru untuk melindungi *compressor* pada *feeder* 2F.

4.7 Simulasi Kerja Rele Menggunakan ETAP 7.0

Untuk melakukan simulasi pada ETAP 7.0 yang pertama kali dilakukan adalah menggambarkan *single line diagram* mulai dari sistem pembangkitan tenaga listrik PLN sampai dengan beban yaitu motor 1000 kW pada *feeder* 2F. *Single line diagram* tersebut ditampilkan pada Gambar 4.6. Kemudian dilakukan pengisian data *rating* masing-masing komponen. Mulai dari *rating* transformator, tipe dan panjang kabel penghantar, *rating* motor, *rating current transformer* (CT) dan rele arus lebih. *Relay3* merupakan pengaman utama motor induksi 3 fasa 1000 kW sedangkan *Relay2* dan *Relay1* merupakan pengaman cadangannya.



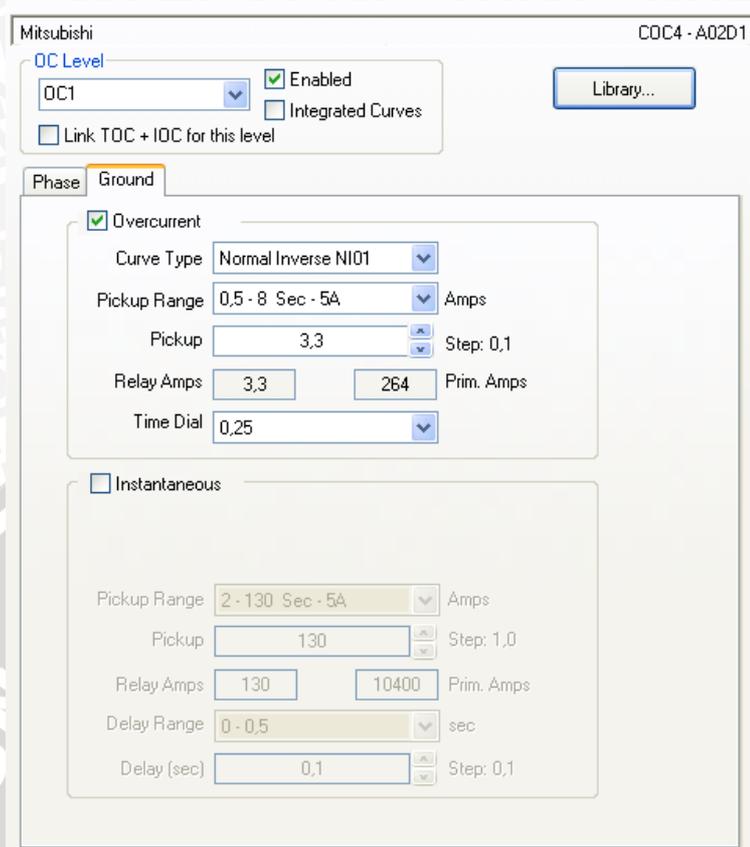
Gambar 4.6 Single Line Diagram PT. Ajinomoto
Sumber: Data PT. Ajinomoto

4.7.1 Setelan Rele Arus Lebih sebagai Pengaman Utama

Hasil perhitungan untuk setelan OCR dan GFR tersebut dimasukkan pada ETAP 7.0. Setelan tersebut merupakan setelan untuk *Relay3*. Pengisian data *rating* rele pada ETAP meliputi pengisian merk rele, fungsi rele, pemilihan tipe *setting* kurva kerja rele. Gambar setelan OCR dan GFR ditampilkan pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8.

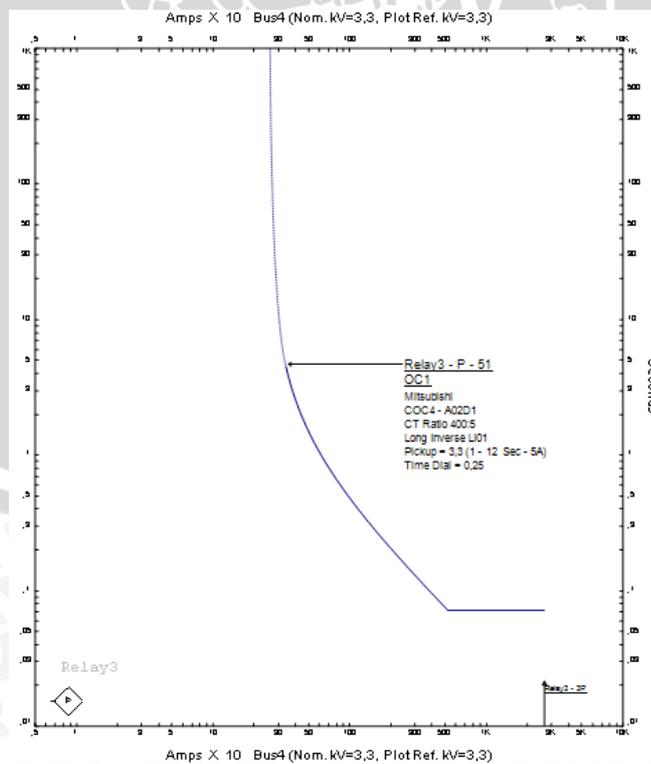
The screenshot displays the OCR configuration window in ETAP 7.0. The window title is 'Mitsubishi' and the device ID is 'COC4 - A02D1'. The 'OC Level' is set to 'OC1' and is 'Enabled'. There are checkboxes for 'Integrated Curves' (unchecked) and 'Link TOC + IOC for this level' (unchecked). A 'Library...' button is present. The 'Phase' is set to 'Ground'. Under the 'Overcurrent' section, the 'Curve Type' is 'Long Inverse LI01', 'Pickup Range' is '1 - 12 Sec - 5A', 'Pickup' is '3,3' (Step: 0,1), 'Relay Amps' are '3,3' and '264' (Prim. Amps), and 'Time Dial' is '0,25'. Under the 'Instantaneous' section, the 'Pickup Range' is '2 - 130 Sec - 5A', 'Pickup' is '130' (Step: 1,0), 'Relay Amps' are '130' and '10400' (Prim. Amps), 'Delay Range' is '0 - 0,5' sec, and 'Delay (sec)' is '0,1' (Step: 0,1).

Gambar 4.7 Tampilan setelan OCR pada ETAP 7.0
Sumber : Hasil Analisis



Gambar4.8 Tampilan Setelan GFR pada ETAP 7.0
 Sumber : Hasil Analisis

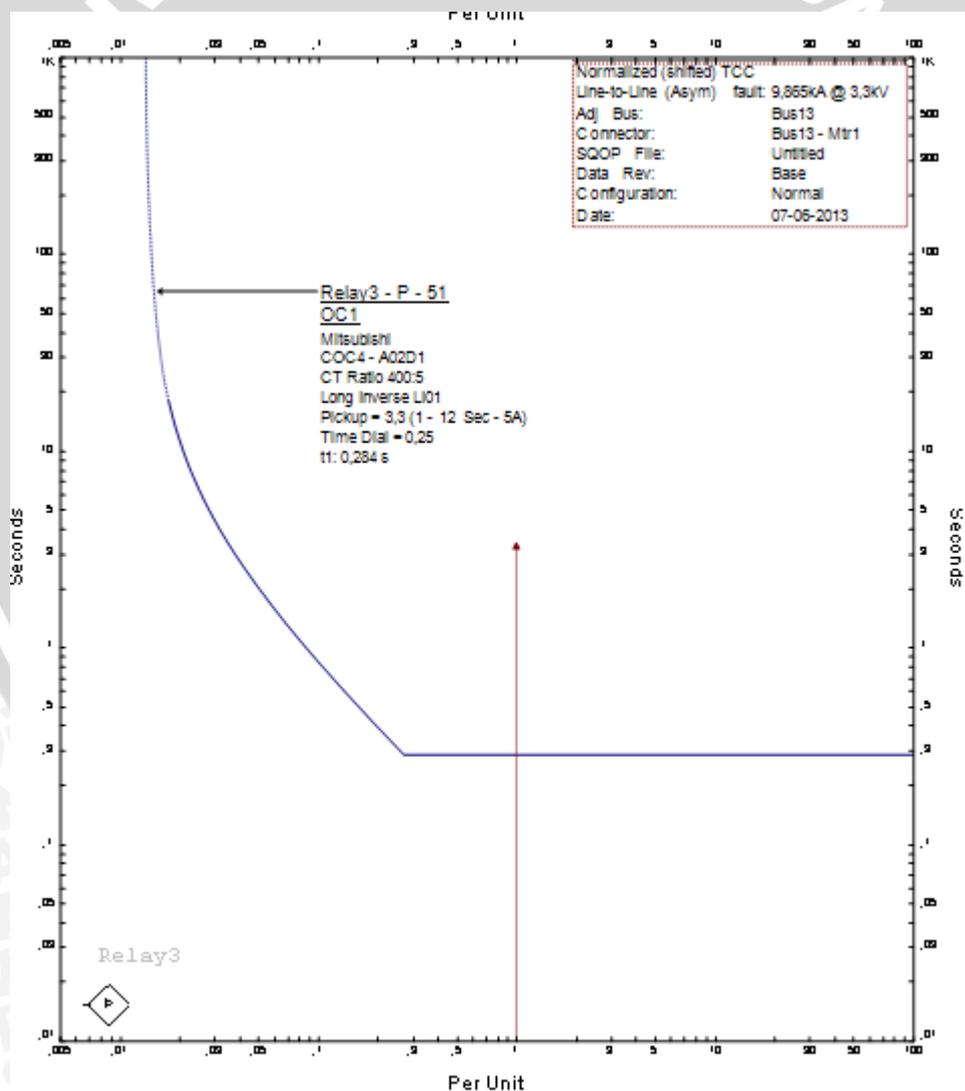
Berikutnya kurva kerja *Relay3* ditampilkan pada ETAP 7.0 seperti pada Gambar 4.9



Gambar 4.9 Kurva OCR sebagai pelindung utama motorpada *feeder* 2F
 Sumber : Analisis Data

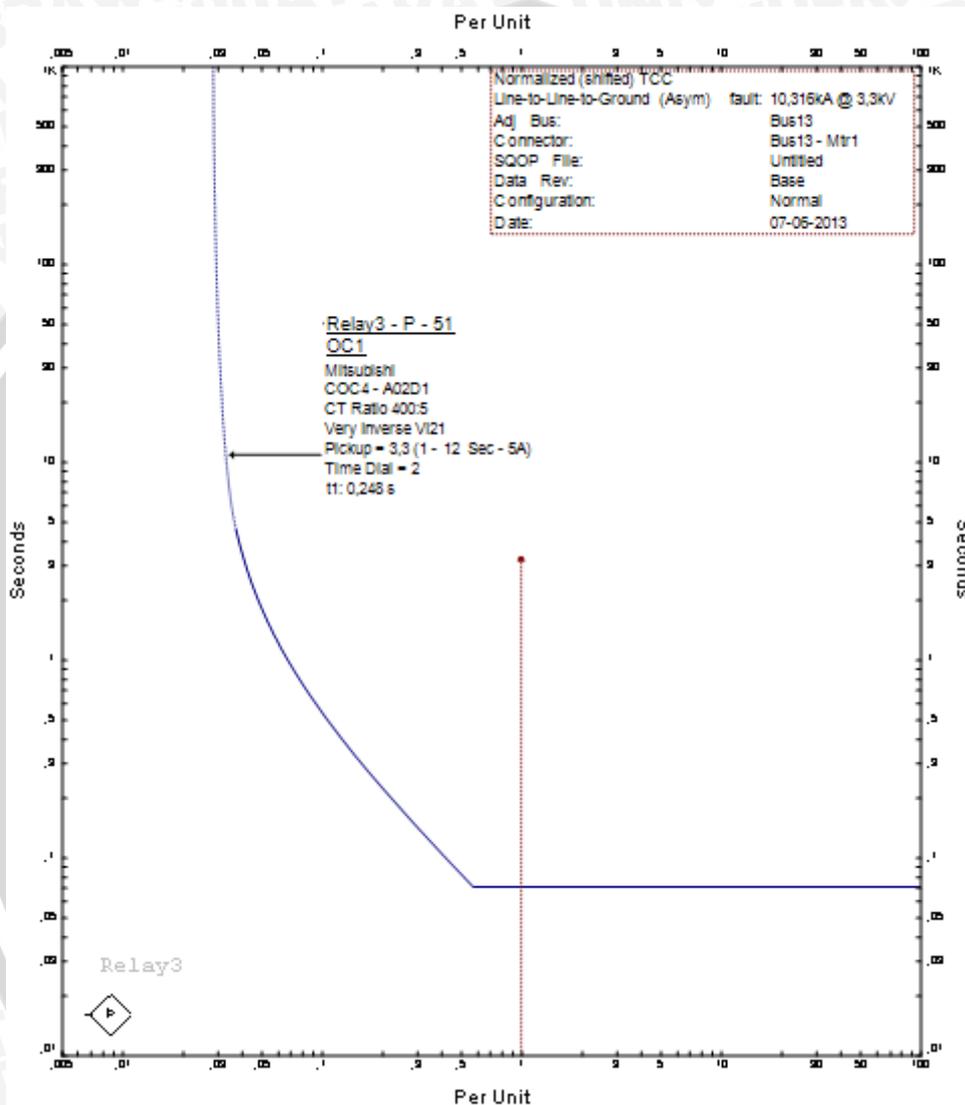
Selanjutnya dilakukan simulasi gangguan hubung singkat. Diambil masing-masing satu contoh simulasi gangguan hubung singkat untuk OCR dan GFR sebagai rele proteksinya. Pada simulasi ini OCR akan melindungi motor dari gangguan hubung singkat antar fasa. Sedangkan GFR akan melindungi motor dari gangguan dua fasa ke tanah. Grafik kerja OCR akan ditampilkan pada Gambar 4.10 dan grafik kerja GFR akan ditampilkan pada Gambar 4.11. Untuk mengganti jenis gangguan hubung singkat pada simulasi digunakan *toolbar* “*edit study case*”.

OCR diatur dengan karakteristik *long inverse*, dimana rele akan bekerja berdasarkan besarnya arus. Rele ini akan bekerja sangat cepat pada saat arus besar, dan diharapkan akan melindungi *feeder* dari gangguan antar fasa yang nilainya cukup besar. Dapat dilihat pada Gambar 4.10 bahwa letak kurva setelan rele berada sebelum kurva gangguan hubung singkat, sehingga hasil simulasi *setting* OCR ini sudah tepat.



Gambar 4.10 Kurva OCR Saat Diberikan Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa
Sumber : Hasil Analisis

Sedangkan untuk GFR digunakan karakteristik *very inverse* untuk melindungi *feeder* dari gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah. Dipilih sebagai contoh adalah gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah. Dengan *time delay* sebesar 0.25s diharapkan GFR dapat bekerja dengan cepat ketika terjadi gangguan. Untuk grafik kerja GFR akan ditampilkan pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11 Kurva GFR Saat Diberikan Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Sumber : Hasil Analisis

4.7.2 Koordinasi Rele Pengaman Utama dengan Pengaman Cadangan

Koordinasi antara rele pengaman utama dengan pengaman cadangan digunakan untuk meningkatkan keandalan dari sistem proteksi dalam melindungi sistem. Untuk mempermudah konsep dari pengaman utama dan pengaman cadangan, dapat dilihat pada Gambar 4.6 akan dibagi menjadi dua wilayah pengaman, yaitu *downstream* dan *upstream*. Sisi *downstream* merupakan sisi pengaman utama yaitu

Relay3 untuk memproteksi motor 1000 kW. Sedangkan sisi *upstream* merupakan sisi pengaman cadangan yaitu *Relay1*, *Relay2*. Pengaman cadangan akan bekerja apabila pengaman utama tidak bekerja.

Setelan rele pada sisi *upstream* harus dibuat berdasarkan setelan rele pada sisi *downstream* agar koordinasi yang baik dapat tercapai. Rele pada sisi *upstream* dibuat lebih lama tunda waktu ketimbang rele pada sisi *downstream*. Jadi rele pada sisi *upstream* waktu kerjanya lebih lama, karena sifatnya sebagai *back-up*.

Dalam hal ini rele pada sisi *upstream* juga disetel sama seperti rele pada sisi *downstream*, tetapi tunda waktunya dibuat lebih lama. Hal ini dibuat dengan maksud agar terjadi koordinasi yang baik antara rele pada sisi *downstream* dan rele pada sisi *upstream*. Sesuai dengan data PT.Ajinomoto bahwa setelan *Time Dial* pada *Relay02* adalah sebesar 0.5 s dan *Time Delay* pada *Relay1* 0.75 s. Kemudian dilakukan simulasi koordinasi antara rele pengaman utama dengan rele pengaman cadangan menggunakan ETAP.

The screenshot displays the ETAP software interface for configuring a relay. The 'OCR' tab is selected, and the device is identified as 'Mitsubishi COC4 - A02D'. The 'OC Level' is set to 'OC1' and is 'Enabled'. The 'Phase' is set to 'Ground'. Under the 'Overcurrent' section, the 'Curve Type' is 'Long Inverse LI01', 'Pickup Range' is '1 - 12 Sec - 5A', 'Pickup' is '4.6', 'Relay Amps' is '4.6', and 'Time Dial' is '0,5'. The 'Instantaneous' section is currently disabled.

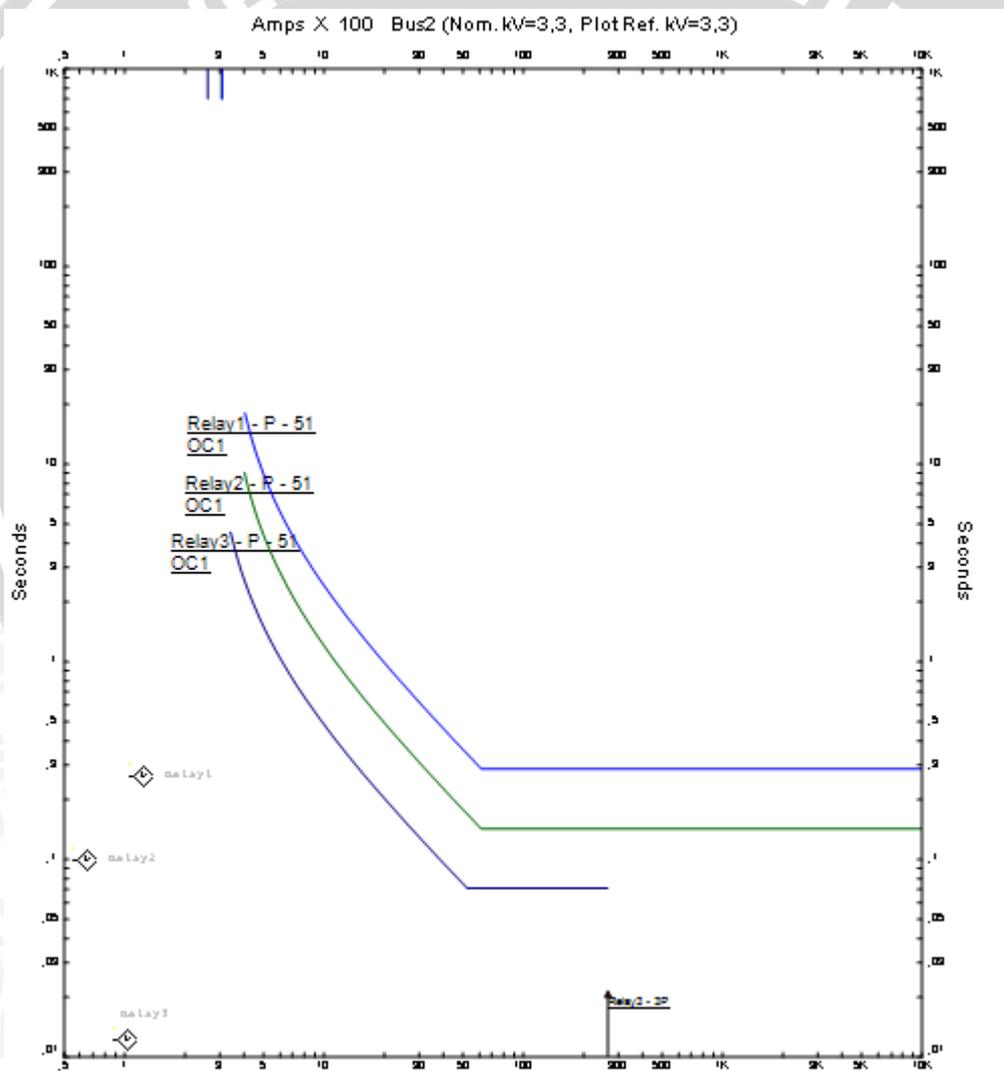
Gambar 4.12 Setelan *Relay2* pada ETAP
Sumber : Hasil Analisis

Setelah itu dilakukan simulasi koordinasi dengan menggunakan *toolbar* “Star”. *Star view* merupakan fasilitas pada ETAP untuk menampilkan kurva kerja rele baik secara individu ataupun koordinasi antar rele. Koordinasi antara *Relay1*, *Relay2*, dan *Relay3* ditunjukkan pada Gambar 4.13. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa koordinasi antar rele sudah tepat, tidak ada kurva yang saling mendahului dan tidak saling bersinggungan. *Delay Time* antar Rele adalah sebagai berikut :

$$\Delta t_1 = TD_{\text{relay02}} - TD_{\text{relay01}} = 0.5 - 0.25 = 0.5\text{s}$$

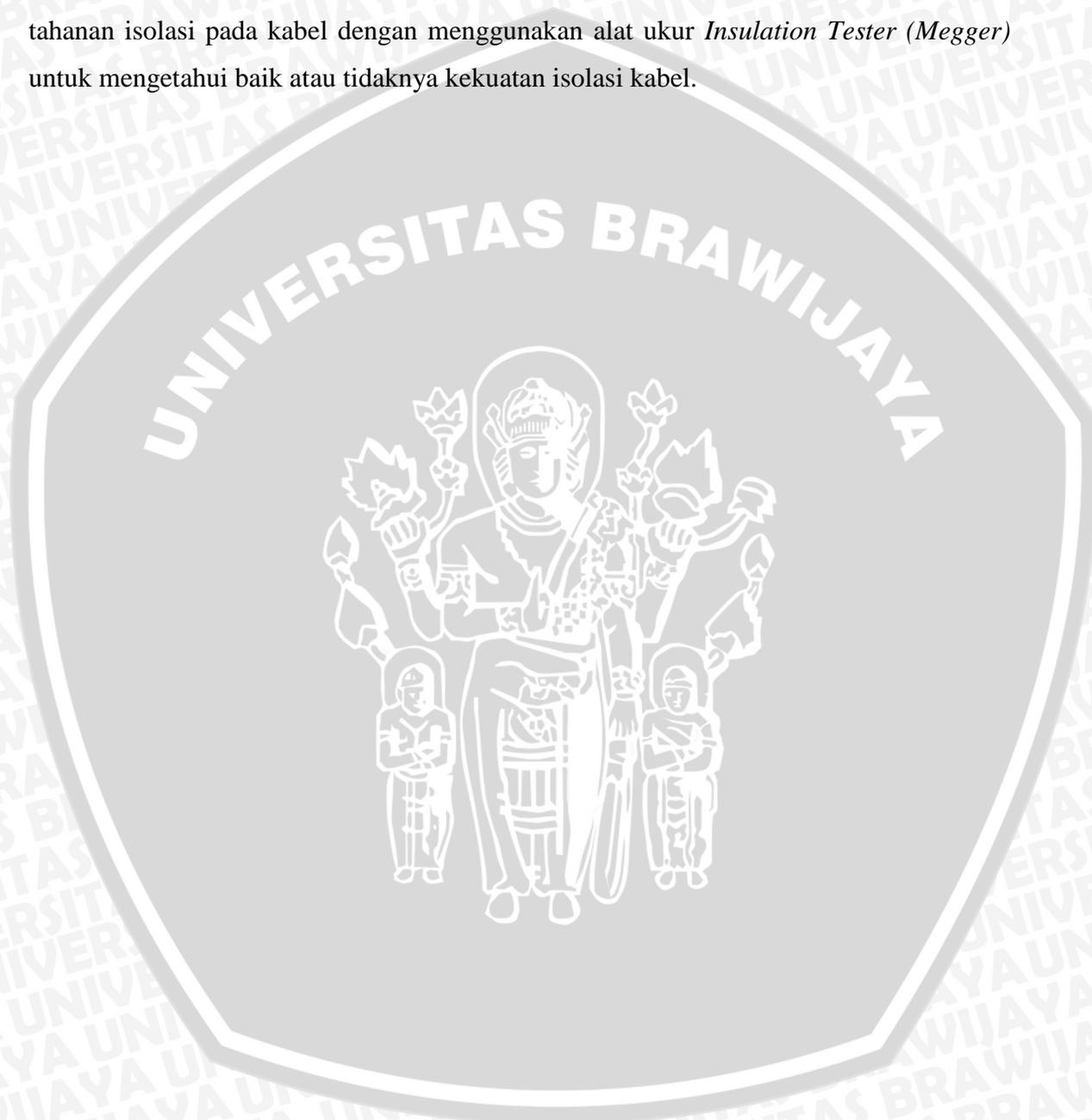
$$\Delta t_2 = TD_{\text{relay03}} - TD_{\text{relay02}} = 0.75 - 0.5 = 0.25\text{ s}$$

Dengan adanya *Delay Time* tersebut rele pada sisi *upstream* akan bekerja sebagai pengaman cadangan ketika terjadi gangguan hubung singkat pada *Motor01* dan *Relay01* sebagai pengaman utama tidak bekerja.



Gambar 4.13 Kurva Kerja Koordinasi Rele Arus Lebih Sebagai Pengaman
Sumber: Hasil Analisis

Sedangkan kemungkinan kedua yang menyebabkan terjadinya kesalahan lokalisir gangguan adalah melemahnya kekuatan isolasi pada kabel penghantar terutama pada sisi *upstream* (sekitar *Relay1*). Melemahnya kekuatan isolasi pada kabel penghantar dapat menyebabkan terjadinya arus bocor. Arus bocor pada sisi *upstream* dapat menyebabkan *Relay1* bekerja. Oleh karena itu perlu dilakukan pengukuran tahanan isolasi pada kabel dengan menggunakan alat ukur *Insulation Tester (Megger)* untuk mengetahui baik atau tidaknya kekuatan isolasi kabel.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil analisis penelitian tentang penyetelan ulang rele arus lebih sebagai pengaman utama *compressor* 1000 kW pada feeder 2F, didapat kesimpulan sebagai berikut :

a. Besar arus gangguan hubung singkat pada motor induksi tiga fasa 1000 kW

(sebagai penggerak *compressor*)

- Gangguan hubung singkat tiga fasa = 12218.83 A
- Gangguan hubung singkat antar fasa = 8926.65 A
- Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah = 9233.97 A
- Gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah = 9097.61 A

b. Hasil setelan rele arus lebih tipe COC4-A02D1 sesudah perhitungan dan analisis:

$$CT = 400/5$$

$$I_{\text{set primer}} = 262.432 \text{ A}$$

$$I_{\text{set sekunder}} = 3.28 \text{ A}$$

$$\text{Setelan OCR} : M = 0.75$$

$$t = 0.25 \text{ s}$$

$$\text{Setelan GFR} : M = 1$$

$$t = 0.25 \text{ s}$$

Hasil simulasi pada ETAP menunjukkan bahwa setelan rele tersebut sudah tepat saat terjadi gangguan hubung singkat.

c. Dari hasil simulasi pada ETAP, koordinasi antara rele pengaman utama dan pengaman cadangan sudah tepat. Sehingga penyebab kesalahan lokalisir gangguan disebabkan oleh keadaan komponen dalam rele dan catu daya rele yang tidak baik. Selain itu kemampuan isolasi kabel penghantar yang buruk pada daerah *Relay1* dapat menyebabkan adanya arus bocor, sehingga *Relay1* bekerja.

5.2 Saran

Studi analisis mengenai arus kapasitif kabel penghantar pada sisi *upstream* juga perlu dilakukan untuk mengevaluasi setelan dari rele arus lebih, sehingga rele tersebut lebih selektif dalam melindungi sistem.

DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, P.M, 1998, "*Power System Protection*", John Wiley and Sons, Inc., Canada
- Davies, T, 2006, "*Protection of Industrial Power Systems 2nd Edition*", USA, Elsevier Ltd.
- ETAP power station 2.0, 1998, "*User Guide*", Operation Technology, Inc.
- Hutauruk, Tumpak S. 1991. *Pentanahan Titik Netral Sistem Tenaga dan Pentanahan Peralatan*. Jakarta : Penerbit Erlangga.
- Hutauruk, Tumpak S. 1983. *Jaringan Tegangan Menengah*. Bandung : Badan Pelaksana Prokerma PLN-ITB.
- IEEE Std 242-2001™, 2001, "*IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems*", New York, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
- Lazar, Irwin, 1980, "*Electrical System Analysis and Design for Industrial Plant*", USA, McGraw-Hill Inc.
- Manual Book Mitsubishi Electric : Mitsubishi Numerical Protection Relay MELPRO D series.
- Prévé, Christophe, 2006, "*Protection of Electrical Networks*", ISTE Ltd., London
- Sleva, Anthony F., 2009, "*Protective Relay Principles*", CRC Press, USA
- Stevenson, William D, 1994, "*Power system Analysis*", Singapore : McGraw-Hill
- Taqiyyuddin, Muhammad. 2006. *Proteksi Sistem Tenaga Listrik Edisi Seri Relay elektromagnetis*. Malang : Penerbit UIN.

DATA SHEET RELAY
COC4-A02D1
mitsubishi electric



Lampiran 2 : Data Sheet Kabel

Kabel saluran yang digunakan adalah tipe N2XSEY (data diambil sesuai ukuran kabel yang digunakan di PT. Ajinomoto)

tipe	Diameter (mm ²)	Positif		Zero	
		R (ohm/km)	X (ohm/km)	R (ohm/km)	X (ohm/km)
1 core	500	0.051	0.1	0.08	0.25
3 core	400	0.042	0.097	0.1	0.22
	300	0.08	0.105	0.13	0.22
	240	0.098	0.109	0.16	0.23

Panjang Kabel Saluran

Base MVA	Base kv	Feeder	Ke	Panjang (m)
18	3.3	bus pln	primer trafo	50
18	3.3	seknder trafo	main feeder	60
18	3.3	main feeder	incoming 2 F	600
18	3.3	incoming 2F	Motor	65

Note:

(untuk perhitungan impedansu kabel dalam satuan pu harus dikonversikan terlebih dahulu ke dalam bentuk ohm dengan cara mengkalikan rating sesuai *data sheet* dengan panjang kabel saluran)

Lampiran 3 : Pembagian Beban masing-masing sumber pembangkit

PEMBAGIAN BEBAN PT. AJINOMOTO DENGAN SUMBER PLN

Cos phi = 0.9

Feeder	Beban	Daya	Daya (KW)
1F	Motor Listrik	175 kW	175
	Motor Listrik	175 kW	175
	Motor Listrik	175 kW	175
	Motor Listrik	250 kW	250
	Motor Fan B	110 kW	110
	Motor Pompa A	132 kW	132
	Motor Pompa B	132 kW	132
	Transformator	2000 kVA	1800
	Transformator	1500 kVA	1350
	Trafo Instrumen	500 kVA	450
2F	Motor Pompa C	150 kW	150
	Motor Pompa D	150 kW	150
	Motor Pompa E	150 kW	150
	Motor Pompa F	150 kW	150
	Motor Listrik	150 kW	150
	Motor Listrik	1000 kW	1000
	Motor Listrik	1450 kW	1000
	Motor Listrik	410 kW	410
	Motor Listrik	410 kW	410
	Transformator	2000 kVA	1800
	Transformator	1500 kVA	1350
	Sub Trafo (SC)	2000 kVA	1800
	Motor Listrik	132 kW	132
	Motor Listrik	132 kW	132
	Motor Listrik	132 kW	132

3F	Motor Listrik	132 kW	132
	Motor Listrik	853 kW	853
	Motor Listrik	1490 kW	1490
	Motor Listrik	1250 Hp	932.5
	Transformator	1000 kVA	900
	Transformator	1000 kVA	900
	Transformator	1000 kVA	900
5F	Trafo Printing	2000 kVA	1800
6F	Capasitor Bank	3500 kVA	3150

PEMBAGIAN BEBAN PT. AJINOMOTO DENGAN SUMBER GENERATOR

PGen = 8.5 MVA

Feeder	Beban	Daya	Daya (KW)
4F	Trafo Packing	1250 kVA	1125
7F	Trafo Masako	2000 kVA	1800
	Trafo Cemp	750 kVA	675
	Transformator	853 kVA	767.7
	Transformator	1000 kVA	900
	Motor Listrik	132 kW	132
	Motor Listrik	132 kW	132
8F	Load	853 kW	853
	Load	410 kW	410
	Load	853 kW	853
	Transformator	200 kVA	180

Lampiran 4 : Data Setelan Rele *upstream*

Relay ID & Model	CT Ratio	Setting	
51MF (Relay2) Model : Melpro D Mitsubishi Electric	1200/5	<i>Curve Type</i>	<i>Inverse</i>
		<i>Pickup</i>	0.58
		<i>Time Dial</i>	0.5
51PLNF (Relay1) Model : Melpro D Mitsubishi Electric	1200/5	<i>Curve Type</i>	<i>Inverse</i>
		<i>Pickup</i>	0.69
		<i>Time Dial</i>	0.75

Sumber : PT. Ajinomoto