



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS KOORDINASI RELE ARUS LEBIH DAN RELE
GANGGUAN TANAH SEBAGAI PENGAMAN MOTOR
INDUKSI, KABEL DAN TRAFU PADA PLANT XI DI PT
INDOCEMENT**

SKRIPSI

**Nanda Febriadi
04 04 03 0644**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
DESEMBER 2008**



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS KOORDINASI RELE ARUS LEBIH DAN RELE
GANGGUAN TANAH SEBAGAI PENGAMAN MOTOR
INDUKSI, KABEL DAN TRAFU PADA PLANT XI DI PT
INDOCEMENT**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar

Sarjana Teknik

**Nanda Febriadi
04 04 03 0644**

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

DEPOK

DESEMBER 2008

HALAMAN PERNYATAAN ORISINILITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar**

Nama : Nanda Febriadi

NPM : 04 04 03 0644

Tanda tangan :

Tanggal : 5 Januari 2008

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Nanda Febriadi
NPM : 04 04 03 0644
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Analisis Koordinasi Rele Arus Lebih dan Rele Gangguan Tanah Sebagai Pengaman Motor Induksi, Kabel dan Trafo pada Plant XI di PT Indocement

Telah berhasil dipertahankan dihadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof . Ir. Rudy Setiabudy M.Sc, Ph.D ()

Penguji 1 : Ir. Amien Rahardjo MT. ()

Penguji 2 : Budi Sudiarto, ST, MT ()

Ditetapkan di : Kampus UI Depok

Tanggal : 31 Desember 2008

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT atas berkah dan anugerah-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Saya menyadari, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof . Ir. Rudy Setiabudy M.Sc, Ph.D, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
2. Pihak PT Indocement Plant XI yang telah membantu dalam usaha memperoleh data yang saya perlukan;
3. Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral; dan
4. Sahabat-sahabat yang telah banyak membantu dukungan moral saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 5 Januari 2008

Nanda Febriadi

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Nanda Febriadi
NPM : 04 04 03 0644
Program Studi : Teknik Elektro
Departemen : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**Analisis Koordinasi Rele Arus Lebih dan Rele Gangguan Tanah Sebagai
Pengaman Motor Induksi, Kabel dan Trafo pada Plant XI di PT Indocement**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : Desember 2008
Yang menyatakan

(Nanda Febriadi)

ABSTRAK

Nama : Nanda Febriadi
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : Analisis koordinasi rele arus lebih dan rele gangguan tanah sebagai pengamanan motor induksi, kabel dan trafo pada plant XI di PT Indocement

Salah satu ciri motor induksi adalah arus start yang beberapa kali dari arus nominal motor. Kondisi normal ini jangan menyebabkan bekerjanya sistem pengamanan arus lebih yang berarti *setting* waktu kerja rele harus lebih besar dari waktu start motor. Rele arus lebih dan gangguan tanah perlu dikoordinasikan dengan baik sehingga diwujudkan sistem pengamanan yang sensitif dan selektif sehingga melindungi kabel dan trafo ketika terjadi gangguan hubung singkat. Pada skripsi ini dibahas mengenai teori dan metodologi untuk menghitung arus gangguan yang mungkin terjadi pada sistem, serta koordinasi rele arus lebih dan rele gangguan tanah untuk menjaga sistem dari arus gangguan tersebut.

Kata Kunci : start motor, arus hubung singkat, rele arus lebih, rele ga

ABSTRACT

Name : Nanda Febriadi
Study Program : Electrical Engineering
Title : Analysis of overcurrent relay and ground fault relay coordination as induction motor, cable and transformer protection on PT Indocement Plant XI

One of the induction motor characteristic has starting current which many times from motor nominal current. This condition don't cause the overcurrent relay work so the relay operation time setting must longer than motor starting time. Overcurrent relay and groundfault relay must be coordinated carefully so we can get protection system sensitively and selectively so that to protect cable and transformer when short circuit fault has done. In this paper will be explained about theory and methodology to calculate fault current which may be done in the system and to get relay setting.

Key word : motor starting, short circuit current, overcurrent relay, ground fault relay

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINILITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan.....	2
1.3 Pembatasan Masalah.....	2
1.4 Sistematika Penulisan.....	3
BAB 2. DASAR TEORI	4
2.1 Start Motor Induksi.....	4
2.2 Peralihan Motor Induksi.....	6
2.3 Gangguan Hubung Singkat.....	8
2.3.1 Berdasarkan Tipe Gangguan.....	8
2.3.1.1 Gangguan Simetris.....	8
2.3.1.2 Gangguan Asimetris.....	10
2.3.2 Berdasarkan Metode Perhitungan.....	
2.3.2.1 ANSI/IEEE.....	21
2.3.2.2 IEC.....	22
2.4 Pengaman Sistem Tenaga Listrik.....	24
2.4.1 Pengertian dasar dan persyaratan peralatan pengaman.....	24
2.4.2 Jenis - jenis Pengaman.....	29
2.4.3 Macam Rele.....	30
2.4.4 Rele Arus Lebih.....	32
2.4.4.1 Penentuan Setting Rele Arus Lebih.....	36
2.4.4.2 Koordinasi Rele Arus Lebih dengan diskriminasi.....	38
Waktu	
2.4.4.3 Koordinasi Rele Arus Lebih dengan diskriminasi.....	39
Arus	
2.4.4.4 Koordinasi Rele Arus Lebih dengan diskriminasi.....	40
Arus dan waktu	
2.4.4.5 Rele Gangguan Tanah.....	42
2.4.5 Prosedur Koordinasi Pengaman.....	44
2.4.6 Pengaman Motor Induksi.....	46
2.4.6.1 Pengaman Beban Lebih.....	47
2.4.6.2 Pengaman Rotor Terkunci.....	47

2.4.6.3	Pengaman Arus Lebih.....	48
2.4.7	Pengaman Trafo.....	48
2.4.7.1	Pengaman Arus Lebih.....	50
2.4.8	Pengaman Kabel.....	53
2.4.8.1	Pengaman Arus Hubung Singkat.....	53
2.4.8.2	Prosedur Koordinasi.....	54
BAB 3	SKEMA DAN SIMULASI KOORDINASI RELE ARUS.....	55
	LEBIH DAN RELE GANGGUAN TANAH SEBAGAI	
	PENGAMAN MOTOR INDUKSI, KABEL DAN TRAF0	
	PADA PLANT XI PT INDOCEMENT	
3.1	Umum.....	55
3.2	Perhitungan arus hubung singkat maksimum.....	56
3.3	Perhitungan setting arus dan waktu kerja rele arus lebih dan rele gangguan tanah	62
3.4	Gambar kurva karakteristik rele arus lebih dan rele..... gangguan tanah	66
BAB 4	ANALISIS KOORDINASI RELE ARUS LEBIH DAN.....	71
	RELE GANGGUAN TANAH SEBAGAI PENGAMAN	
	MOTOR INDUKSI, KABEL DAN TRAF0 PADA	
	PLANT XI DI PT INDOCEMENT	
4.1	Rele Arus Lebih.....	71
4.1.1	Setting dan Koordinasi Rele Arus Lebih.....	71
4.2	Rele Gangguan Tanah.....	92
4.2.1	Setting dan Koordinasi Rele Arus Lebih.....	92
	DAFTAR ACUAN.....	106
	DAFTAR PUSTAKA.....	107
	LAMPIRAN.....	108

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Rangkaian rotor ketika motor berputar.....	4
Gambar 2.2. Rangkaian ekivalen peralihan motor induksi.....	7
Gambar 2.3. Rangkaian pada keadaan gangguan.....	9
Gambar 2.4. Diagram garis tunggal sederhana.....	9
Gambar 2.5. Komponen urutan positif.....	10
Gambar 2.6. Komponen urutan negatif.....	11
Gambar 2.7. Komponen urutan nol.....	11
Gambar 2.8. Konstanta α	17
Gambar 2.9. Gangguan satu fasa ke tanah.....	18
Gambar 2.10. Gangguan dua fasa.....	21
Gambar 2.11. Gangguan dua fasa ke tanah.....	22
Gambar 2.12. Diagram pencari factor λ_{maks} untuk I_{kmaks}	24
Gambar 2.13. Diagram pencari factor λ_{min} untuk I_{kmin}	25
Gambar 2.14. Skema proteksi sederhana.....	26
Gambar 2.15. Diagram garis tunggal dengan skema proteksi.....	27
Gambar 2.16. Diagram satu garis dari sistem yang menggambarkan..... selektivitas daerah proteksi	28
Gambar 2.17. Diagram garis tunggal dengan skema proteksi rele tingkatan waktu	29
Gambar 2.18. Kurva karakteristik rele arus lebih inverse (standar IEC).....	30
Gambar 2.19. Kurva karakteristik rele arus lebih inverse (standar IEEE)...	30
Gambar 2.20. Kurva jenis - jenis rele arus lebih.....	31
Gambar 2.21. Diagram garis tunggal dengan skema proteksi rele tingkatan waktu	33
Gambar 2.22. Diagram garis tunggal dengan skema proteksi rele arus lebih tingkatan arus	34
Gambar 2.23. Diagram garis tunggal untuk tingkat arus gangguan tertentu	35
Gambar 2.24. Kurva arus – waktu untuk masing-masing seksi.....	35
Gambar 2.25. Contoh skema proteksi untuk semua gangguan hubung..... singkat	36
Gambar 2.26. Suatu bentuk skema proteksi dengan dilengkapi dengan.. sebuah rele urutan nol agar lebih sensitif terhadap gangguan satu fasa dan 2 fasa ke tanah	36
Gambar 2.27. Metode untuk mengukur arus residu.....	37
Gambar 2.28. Daerah pengaman trafo.....	38
Gambar 2.29. Trafo kategori 1.....	38
Gambar 2.30. Trafo kategori 2.....	39
Gambar 2.31. Trafo kategori 3.....	39
Gambar 2.32. Trafo kategori 4.....	39
Gambar 2.33. Arus hubung singkat maksimum untuk isolasi tembaga.....	41
Gambar 2.34. Arus hubung singkat maksimum untuk isolasi alumunium....	41
Gambar 3.1. Diagram alir proses koordinasi rele.....	56
Gambar 3.2. Diagram satu garis PT Indocement.....	57
Gambar 3.3. Diagram satu garis pada penyulang motor dengan kapasitas total arus hubung singkat terbesar dan kapasitas daya motor induksi terbesar	65

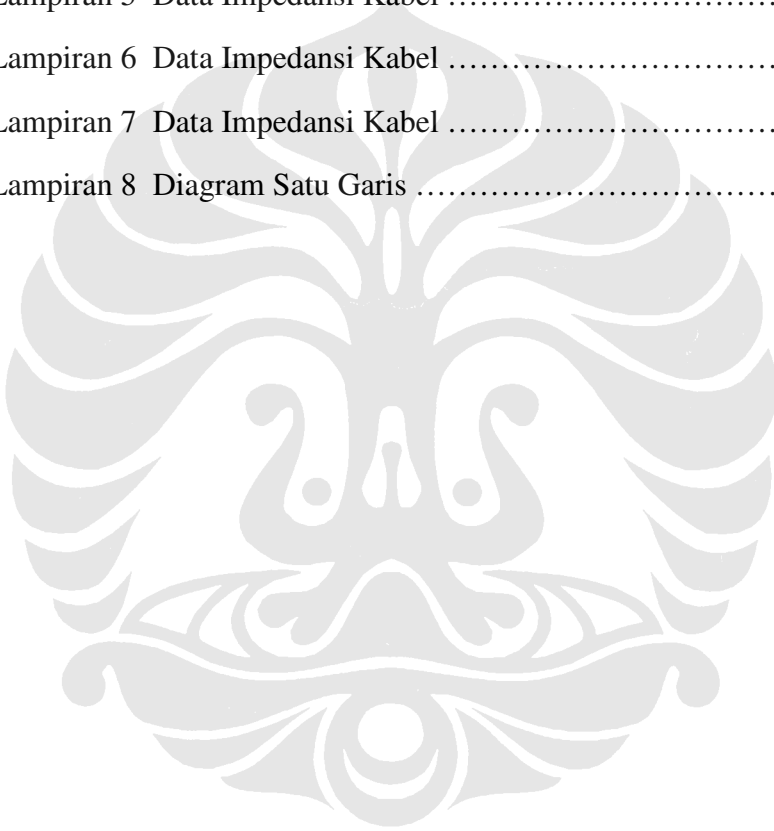
Gambar 3.4.	Koordinasi rele arus lebih dari bagian hilir/penyulang motor sampai ke bagian hulu/penyulang keluaran(outgoing) trafo	66
Gambar 3.5	Karakteristik start motor.....	67
Gambar 3.6	Karakteristik kabel.....	67
Gambar 3.7	Karakteristik rele.....	68
Gambar 3.8	Karakteristik bus.....	68
Gambar 3.9	Karakteristik trafo.....	69
Gambar 3.10	Kurva koordinasi arus dan waktu dari rele arus lebih, pengaman kabel, pengaman motor induksi, dan pengaman trafo	70
Gambar 4.1	Diagram satu garis penyulang 3P11S1 dan 3P11S2 di keluaran (outgoing) trafo jala-jala listrik 2 pada Plant XI PT Indocement Tunggal Prakarsa	72
Gambar 4.2	Kurva koordinasi arus terhadap waktu rele 3P1T1H dan 3P11S1	81
Gambar 4.3	Kurva koordinasi arus terhadap waktu rele 3P1T2H dan 3P11S2	82
Gambar 4.4	Kurva koordinasi arus terhadap waktu rele 3P1T3H dan..... 3P11S2	83
Gambar 4.5	Kurva koordinasi arus terhadap waktu rele 3P1T4H dan..... 3P11S1	84
Gambar 4.6	Kurva koordinasi arus terhadap waktu rele E1128N dan..... 3P11S1	85
Gambar 4.7	Kurva koordinasi arus terhadap waktu rele E1135N dan 3P11S2	86
Gambar 4.8	Kurva koordinasi arus terhadap waktu rele 3P11S1, E1128N, 3P1T1H, 3P1T4H	88
Gambar 4.9	Kurva koordinasi arus terhadap waktu rele 3P11S2, E1135N, 3P1T2H, 3P1T3H	90
Gambar 4.10	Kurva koordinasi arus terhadap waktu rele E21152, 3P11S1, 3P11S2	91
Gambar 4.11	Kurva koordinasi arus terhadap waktu rele 3P1T1H dan 3P11S1	94
Gambar 4.12	Kurva koordinasi arus terhadap waktu rele 3P1T2H dan 3P11S2	95
Gambar 4.13	Kurva koordinasi arus terhadap waktu rele 3P1T3H dan..... 3P11S2	96
Gambar 4.14	Kurva koordinasi arus terhadap waktu rele 3P1T4H dan..... 3P11S1	97
Gambar 4.15	Kurva koordinasi arus terhadap waktu rele E1128N dan..... 3P11S1	98
Gambar 4.16	Kurva koordinasi arus terhadap waktu rele E1135N dan 3P11S2	99
Gambar 4.17	Kurva koordinasi arus terhadap waktu rele 3P11S1, E1128N, 3P1T1H, 3P1T4H	101
Gambar 4.18	Kurva koordinasi arus terhadap waktu rele 3P11S2, E1135N, 3P1T2H, 3P1T3H	103
Gambar 4.19	Kurva koordinasi arus terhadap waktu rele E21152, 3P11S1, 3P11S2	104

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Konstanta karakteristik rele arus lebih waktu terbalik menurut... 35 standard IEC	35
Tabel 2.2 Konstanta karakteristik rele arus lebih waktu terbalik menurut... 35 standard ANSI	35
Tabel 2.3 Jenis gangguan dengan pembagian fungsi pengaman..... 49	49
Tabel 2.4 Kapabilitas ketahanan gangguan hubung singkat pada trafo..... 52	52
Tabel 3.1 Hasil perhitungan arus hubung singkat dari sumber jala-jala..... 58 listrik 1 dengan waktu gangguan 0.5 cycle	58
Tabel 3.2 Hasil perhitungan arus hubung singkat dari sumber jala-jala..... 59 listrik 2 dengan waktu gangguan 0.5 cycle	59
Tabel 3.3 Hasil perhitungan arus hubung singkat dari sumber jala-jala..... 60 listrik 1 dengan waktu gangguan 30 cycle	60
Tabel 3.4 Hasil perhitungan arus hubung singkat dari sumber jala-jala..... 61 listrik 2 dengan waktu gangguan 30 cycle	61
Tabel 3.5 Konstanta karakteristik rele arus lebih menurut standard IEEE... 64	64
Tabel 3.6 Data termal konduktor untuk batas kekuatan pada kondisi..... 64 gangguan	64
Tabel 4.1 Hasil perhitungan arus hubung singkat dari bus penyulang motor71	71
Tabel 4.2 Hasil perhitungan arus hubung singkat dari bus penyulang motor72	72
Tabel 4.3 Perbandingan trafo arus pada masing-masing rele..... 73	73
Tabel 4.4 Konstanta karakteristik rele menurut standar IEEE..... 75	75
Tabel 4.5 Arus beban penuh penyulang keluaran trafo jala-jala listrik 2..... 78	78
Tabel 4.6 Arus setting dengan jangkauan arus batas bawah dan batas atas.. 79	79
Tabel 4.7 Hasil perhitungan arus hubung singkat ke tanah 92	92
Tabel 4.8 Arus setting rele gangguan tanah 93	93

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Spesifikasi Motor E1135	108
Lampiran 2 Spesifikasi Motor E1128	109
Lampiran 3 Spesifikasi Kabel	110
Lampiran 4 Spesifikasi Trafo.....	111
Lampiran 5 Data Impedansi Kabel	112
Lampiran 6 Data Impedansi Kabel	113
Lampiran 7 Data Impedansi Kabel	114
Lampiran 8 Diagram Satu Garis	115



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beban listrik di industri yang menggunakan energi paling besar pada umumnya adalah motor listrik dengan jenis yang bermacam-macam seperti motor induksi, motor sinkron dan motor DC. Salah satu ciri dari motor-motor tersebut adalah arus start yang cukup tinggi. Arus start ini beberapa kali dari arus nominal motor. Kondisi normal ini tidak boleh menyebabkan bekerjanya sistem pengaman arus lebih dan beban lebih, yang berarti setting waktu kerja rele harus lebih besar dari waktu start motor. Ketika mensetting rele arus lebih untuk mengamankan motor listrik maka harus diperhatikan spesifikasi motor seperti arus rotor terkunci, waktu percepatan, dan waktu kegagalan start motor akibat kelebihan beban dengan tujuan agar motor dapat start dengan baik. Sistem pengaman arus lebih pada motor yang digunakan termasuk beban lebih dan gangguan hubung singkat (gangguan fasa dan gangguan tanah). Rele yang digunakan biasanya kombinasi antara rele beban lebih dan pengaman lebur atau rele beban lebih dan MCCB/LVCB. Rele beban lebih disetting berdasarkan arus beban penuh dan faktor pelayanan dari motor. Pengaman lebur dan pemutus tenaga disetting untuk mengamankan rangkaian motor selama ada gangguan hubung singkat tetapi tidak menginterupsi arus start normal motor. Pada kertas logaritmis yang sumbu x menunjukkan arus maksimum rele dan sumbu y menunjukkan waktu kerja rele, kurva karakteristik arus dan waktu dari rele beban lebih harus berada di kanan atas dari kurva karakteristik arus dan waktu start motor.

Pengaman arus lebih juga melindungi kabel ketika terjadi gangguan hubung singkat yang disetting berdasarkan level hubung singkat dari kabel tersebut. Dalam koordinasi sistem pengaman, kabel seharusnya mampu untuk menahan arus gangguan maksimum yang lewat agar menghindari kerusakan pada isolasi kabel. Pada kertas logaritmis, kurva karakteristik arus dan waktu kerusakan kabel dari gangguan hubung singkat harus berada di sebelah kanan atas dari kurva

relay arus lebih. Pengaman arus lebih juga melindungi trafo ketika terjadi gangguan hubung singkat baik yang diletakkan di sisi primer maupun sekunder. Dalam koordinasi sistem pengaman, trafo seharusnya mampu untuk menahan arus gangguan maksimum yang lewat agar menghindari kerusakan pada isolasi trafo. Pada kertas logartimis, kurva karakteristik arus dan waktu kerusakan trafo dari gangguan hubung singkat harus berada di sebelah kanan atas dari kurva rele arus lebih.

Data yang dibutuhkan untuk studi koordinasi tersebut di atas antara lain :

1. Bus dan pemutus tenaga
2. Trafo
3. Generator
4. Kabel
5. Kapasitas hubung singkat dan rasio X/R dari setiap peralatan
6. Informasi Peralatan Proteksi
7. Spesifikasi Beban
8. Kurva batas kerusakan untuk Motor, Kabel dan Transformator
9. Diagram garis tunggal sistem kelistrikan

1.2 Tujuan

Tujuan penulisan skripsi ini adalah untuk :

- Menghitung tetapan (setting) rele arus lebih dan rele gangguan tanah yang digunakan pada plant XI PT Indocement agar didapatkan koordinasi yang selektif dan sensitif untuk mengamankan motor induksi, kabel dan trafo

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah skripsi ini adalah :

1. Koordinasi rele arus lebih dan gangguan tanah hanya pada bus *Motor Control Center* yang memiliki total jumlah arus gangguan hubung singkat terbesar dan kapasitas daya motor terbesar

2. Pengaman motor yang dibahas adalah pengaman untuk motor induksi 3 fasa dengan kapasitas besar
3. Start motor yang dibahas adalah start motor yang dilakukan pertama kali dari keadaan diam hingga keadaan tunak
4. Urutan start motor yang dibahas adalah motor yang dihidupkan secara tidak bersamaan

1.4 Sistematika Penulisan

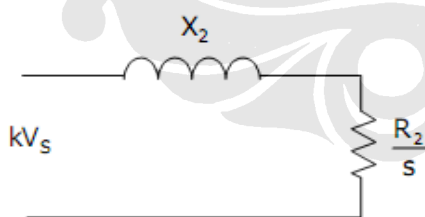
Skripsi ini dibagi menjadi 4 bab. Bab satu menguraikan latar belakang, tujuan dan batasan dalam penyusunan seminar ini. Bab dua berisi dasar teori tentang peralihan motor induksi, start motor induksi, gangguan hubung singkat, pengaman sistem tenaga listrik, prosedur koordinasi pengaman, pengaman motor induksi, pengaman trafo dan pengaman kabel. Bab tiga berisi penguraian tentang metodologi penelitian yang akan dilakukan. Bab empat berisi analisis koordinasi. Bab lima berisi kesimpulan.

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Start Motor Induksi

Pada saat starting motor-motor besar, dapat menyebabkan gangguan besar pada motor dan beban lain yang terhubung dengan penyulang motor tersebut. Turunnya tegangan merupakan efek yang paling besar pada starting motor. Sistem tenaga yang lebih kecil biasanya memiliki kapasitas yang terbatas, yang umumnya memperbesar masalah jatuh tegangan pada saat start motor, terutama jika motor-motor besar dihubungkan pada satu bus yang sama. Jatuh tegangan dan naiknya arus yang sangat besar inilah yang kemudian membuat frekuensi pada sistem tenaga listrik di industri menurun. Pada sistem tenaga listrik di Industri, dengan adanya banyak motor induksi yang digunakan, kondisi start motor harus diperhatikan untuk menghindari pelepasan beban lainnya yang seharusnya tidak terjadi pada start motor. Untuk kebanyakan motor induksi, arus awal adalah 4-7 kali arus nominalnya dan hal ini tidak diizinkan karena akan mengganggu jaringan dan akan merusak motor itu sendiri, maka untuk mengatasi hal-hal yang tidak diinginkan arus start tersebut harus diturunkan. Naiknya arus inilah yang menyebabkan sistem kelebihan beban dan seolah-olah kekurangan pembangkitan dalam waktu sesaat.



Gambar 2.1 Rangkaian rotor ketika motor berputar

Arus rotor ketika motor berputar adalah :

$$I_r = \frac{skV_s}{\sqrt{R_2^2 + s^2 X_2^2}} = \frac{kV_s}{\sqrt{\frac{R_2^2}{s^2} + X_2^2}} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dari rumus diatas dapat kita lihat bahwa pada saat starting, awalnya $s \sim 1$ (rotor

diam), arus sangat besar karena impedansi R_2+jX_2 relatif rendah, pf sangat rendah atau juga dikatakan rangkaian bersifat induktif ($R_2 \ll X_2$). Ketika rotor telah berputar, nilai s mengecil sehingga R_2/s membesar yang mengakibatkan arus rotor mengecil dan rangkaian bersifat makin resistif ditandai pf yang mendekati 1.

Untuk mendapatkan arus start motor induksi, dapat diketahui dari rating tegangan, daya nyata dengan satuan hp, dan kode huruf yang tercantum di nameplate motor tersebut.

Code Letter*	Kva per HP, with locked rotor	Code Letter*	Kva per HP, with locked rotor
A	0-3.14	L	9.0-9.99
B	3.15-3.54	M	10.0-11.19
C	3.55-3.99	N	11.2-12.49
D	4.0-4.49	P	12.5-13.99
E	4.5-4.99	R	14.0-15.99
F	5.0-5.59	S	16.0-17.99
G	5.6-6.29	T	18.0-19.99
H	6.3-7.09	U	20.0-22.39
J	7.1-7.99	V	22.4 and up
K	8.0-8.99		

* NEC

Maka arus start motor induksi dapat diketahui dari persamaan berikut :

$$I_L = \frac{S_{start}}{\sqrt{3}V_T} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana S_{start} = (daya nyata dengan satuan hp)(kVA/hp yang dipilih sesuai kode huruf)

Secara praktis pendekatan, waktu start dari motor induksi dapat dihitung dengan persamaan :

$$t = \frac{100}{\Delta Tr} \times \frac{wk^2(2) \left(\frac{ns}{1000}\right)^2}{Kw} \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana

t = waktu start (detik)

ΔTr = Torsi akselerasi rata-rata (% dari torsi nominal motor)

$wk^2(2)$ = flywheel effect dari motor dan pompa ($kg\ m^2$)

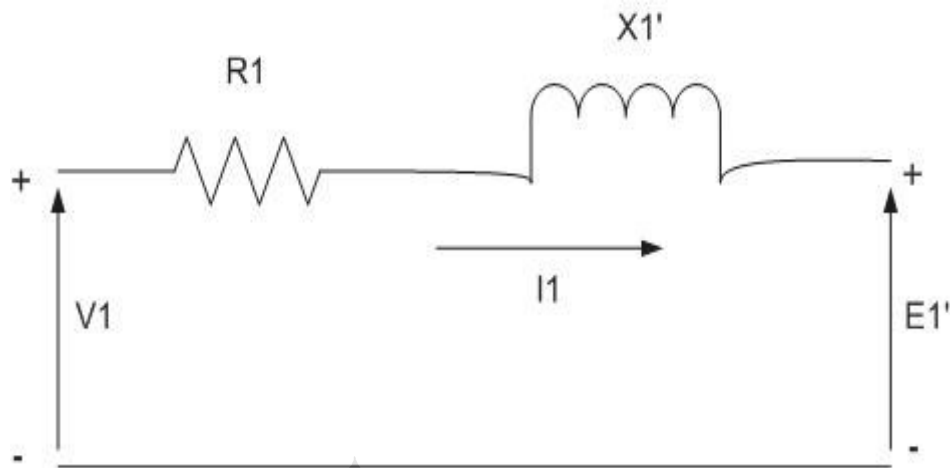
n_s = putaran sinkron (rpm)

K_w = daya motor

2.2 Peralihan Motor Induksi

Pada suatu keadaan dimana terjadi hubung singkat pada terminal-terminal mesin induksi yang berlaku baik sebagai motor atau generator, mesin akan memberikan arus yang tidak semestinya karena adanya gandengan fluks dengan rangkaian rotor. Arus ini pada saatnya akan mengecil menjadi nol. Disamping komponen arus bolak-balik, pada umumnya juga terdapat komponen arus searah yang semakin mengecil untuk menjaga hubungan fluks dengan fasa yang bersangkutan yang semula tetap besarnya.

Magnitudo awal dari komponen arus bolak-balik stator dapat ditentukan sebagai reaktansi peralihan X' serta tegangan E'_1 di belakang reaktansi tersebut, dianggap sama dengan harga sebelum terjadi hubung singkat. Penurunan komponen arus bolak-balik dapat dinyatakan sebagai konstanta waktu hubung singkat peralihan T' . Karena arus di kumparan stator digerakkan oleh arus rotor DC yang mengecil, maka frekuensi arus stator ditentukan oleh kecepatan sudut rotor. Untuk slip yang rendah frekuensi tersebut merupakan frekuensi listrik serempak; untuk slip yang lebih tinggi besarnya frekuensi mengikuti slip tersebut. Pada umumnya dianggap bahwa kecepatan mesin tetap tak berubah selama peralihan hubung singkat karena peristiwa peralihan berlangsung dalam waktu yang sangat singkat. Rangkaian ekuivalen pada keadaan peralihan terhubung singkat motor induksi adalah sebagai berikut :



Gambar 2.2 Rangkaian ekivalen peralihan motor induksi

Besarnya arus peralihan terhubung singkat (I_1) pada motor induksi adalah :

$$X' = X_1 + \frac{X_\varphi X_2}{X_\varphi + X_2}$$

$$T'_0 = \frac{X_2 + X_\varphi}{2\pi f R_2}$$

$$T' = T'_0 \cdot \frac{X'}{X_\varphi + X_1}$$

$$I_1 = \frac{E_1'}{X'} \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana :

X' : Reaktansi Peralihan

X_φ : Reaktansi Magnetisasi

X_1 : Reaktansi bocor stator

X_2 : Reaktansi bocor rotor (acuan pada stator)

R_1 : Resistansi rangkaian stator

- R_2 : Resistansi rangkaian rotor (acuan pada stator)
- T_0' : Konstanta waktu rangkaian terbuka
- T' : Konstanta waktu terhubung singkat
- E_1' : Tegangan di belakang reaktansi peralihan
- I_1 : Arus peralihan awal

Tegangan E_1' yang mengikuti reaktansi peralihan merupakan tegangan yang berbanding lurus dengan hubungan fluks. Tegangan tersebut berubah menurut besarnya hubungan fluks dan untuk rangkaian terhubung singkat 3 fasa, berkurang menjadi nol pada laju yang ditentukan oleh konstanta waktu T' .

2.3 Gangguan Hubung Singkat

2.3.1 Berdasarkan Tipe Gangguan

2.3.1.1 Gangguan Simetris

Gangguan simetris merupakan gangguan dimana besar magnitude dari arus gangguan sama pada setiap fasa. Gangguan ini terjadi pada gangguan hubung singkat tiga fasa.

Secara umum besarnya arus gangguan dihitung menggunakan rumus :

$$I_{fault} : \frac{V_{source}}{Z_s + Z_L + Z_f} \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana,

I_{fault} : Arus gangguan

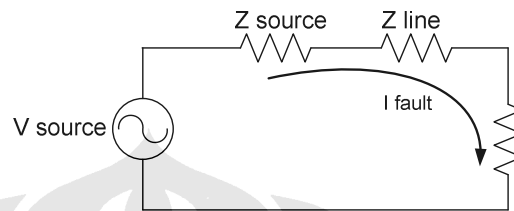
V_{source} : tegangan sistem.

Z_s : impedansi peralatan sistem.

Z_L : impedansi saluran sistem.

Z_f : impedansi gangguan misalnya : busur, tahanan tanah.

Titik di mana konduktor menyentuh tanah selama gangguan biasanya disertai dengan sebuah busur (*arc*). Busur ini bersifat resistif, namun resistansi busur besarnya sangat beragam. Resistansi gangguan besarnya tergantung resistansi busur serta tahanan tanah ketika terjadi gangguan ke tanah.



Gambar 2.3 rangkaian pada keadaan gangguan

Perhitungan arus gangguan menggunakan persamaan diatas, hanya saja ketika gangguan simetris terjadi, tidak terjadi busur dikarenakan konduktor tidak menyentuh tanah. Sehingga persamaannya menjadi :

$$I_{fault} = \frac{V_{source}}{Z_s + Z_L} \quad (2.6)$$

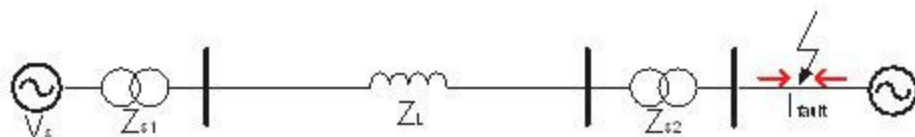
Dimana

I_{fault} : Arus gangguan

V_{source} : tegangan sistem.

Z_s : impedansi peralatan sistem.

Z_L : impedansi saluran sistem.



Gambar 2.4 Diagram garis tunggal sederhana

Pada gambar di atas jika kita ingin mencari besarnya gangguan pada I_{fault} , maka sesuai dengan persamaan besarnya arus gangguan hubung singkat tiga fasa adalah:

$$I_{fault} : \frac{V_s}{Z_{s1} + Z_L + Z_{s2}} \dots \dots \dots (2.7)$$

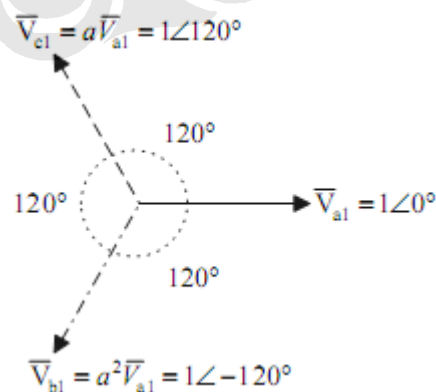
2.3.1.2 Gangguan Asimetris

Kebanyakan gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik adalah gangguan tidak simetris. Pada gangguan ini magnitude dari tegangan serta arus yang mengalir pada setiap fasa berbeda.

Komponen simetris merupakan metode yang dikembangkan *C.L. Fortescue* pada tahun 1918. Metode ini memperlakukan tiga fasa yang tidak seimbang pada sistem tenaga listrik seolah-olah sistem tersebut seimbang. Metode ini membuktikan bahwa sistem yang tidak simetris dapat dijabarkan menjadi tiga buah set komponen simetris. Ketiga komponen itu adalah :

1. Komponen urutan positif.

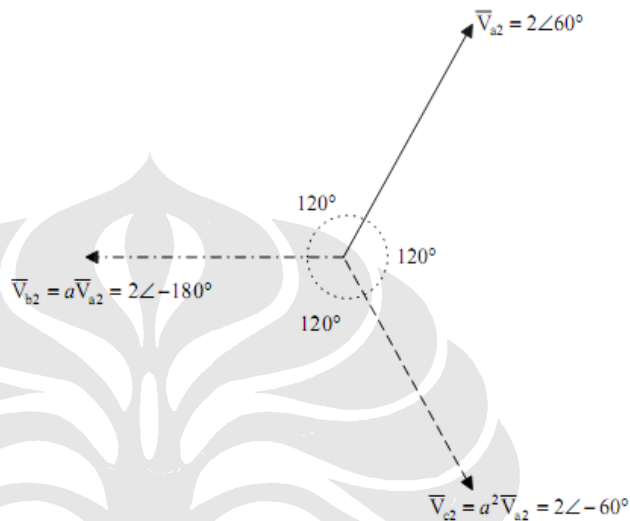
Komponen ini terdiri dari phasor yang besar magnitudenya sama dimana masing-masing berbeda sebesar 120° . Komponen ini memiliki fasa yang sama dengan fasa sistem. Komponen ini biasanya ditulis menggunakan indeks 1



Gambar 2.5 Komponen urutan positif

2. Komponen urutan negatif .

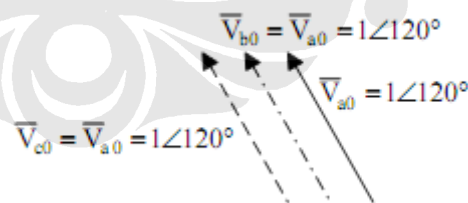
Komponen ini terdiri dari tiga fasor yang besar magnitudenya sama dimana masing-masing berbeda sebesar 120° . Komponen ini memiliki fasa yang berkebalikan dengan fasa sistem. Komponen ini biasanya ditulis menggunakan indeks 2



Gambar 2.6 Komponen urutan negatif

3. Komponen urutan nol.

Komponen ini terdiri dari tiga fasor yang memiliki magnitudo dan fasa yang sama. Komponen ini biasanya ditulis menggunakan indeks 0.



Gambar 2.7 Komponen urutan nol

Total arus maupun tegangan pada sistem tenaga listrik merupakan penjumlahan masing-masing komponen simetris. Seperti pada persamaan berikut :

$$V_A = V_{A1} + V_{A2} + V_{A0}$$

$$V_B = V_{B1} + V_{B2} + V_{B0}$$

$$V_C = V_{C1} + V_{C2} + V_{C0}$$

$$I_A = I_{A1} + I_{A2} + I_{A0}$$

$$I_B = I_{B1} + I_{B2} + I_{B0}$$

$$I_C = I_{C1} + I_{C2} + I_{C0}$$

Ketika kita menggunakan komponen simetris pada sistem yang tidak seimbang, operasi penggeseran phasor adalah sebesar 120° . Operasi ini ekuivalen dengan mengalikan phasor dengan $1\angle 120^\circ$. Perkalian dengan $1\angle 120^\circ$ akan terjadi berulang-ulang sehingga diperkenalkan dengan konstanta α . Di mana :

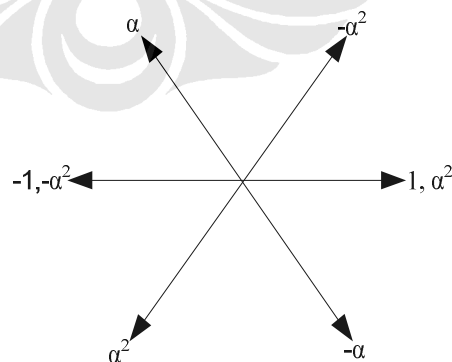
$$\alpha = 1\angle 120^\circ$$

Setiap operasi perkalian dengan α akan merotasi phasor sebesar 120° tanpa merubah besar magnitudenya. Sehingga :

$$\alpha = 1\angle 120^\circ$$

$$\alpha^2 = 1\angle 240^\circ$$

$$\alpha^3 = 1\angle 360^\circ$$



Gambar 2.8 konstanta α

Dengan menggunakan α maka komponen simetris dapat direpresentasikan menjadi fungsi dari α . Misalnya jika komponen positif mempunyai urutan abc,

yang berarti fasa akan memiliki urutan a, b, c sehingga hubungan urutan komponen positif menjadi :

$$V_{B1} = \alpha^2 V_{A1}$$

$$V_{C1} = \alpha V_{A1}$$

Sedangkan pada komponen urutan negatif berarti memiliki urutan fasa acb, akan mempunyai hubungan :

$$V_{B2} = \alpha V_{A2}$$

$$V_{C2} = \alpha^2 V_{A2}$$

Sedangkan pada komponen urutan nol, persamaan akan sama karena urutan ini sama besar dan arahnya sehingga :

$$V_{B0} = V_{A0}$$

$$V_{C0} = V_{A0}$$

Ketiga komponen yang pada persamaan di atas dapat dijadikan sebuah persamaan menjadi :

$$V_A = V_{A1} + V_{A2} + V_{A0}$$

$$V_B = \alpha^2 V_{A1} + \alpha V_{A2} + V_{A0}$$

$$V_C = \alpha V_{A1} + \alpha^2 V_{A2} + V_{A0}$$

Dengan menggunakan matriks maka persamaan menjadi :

$$\begin{pmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{A0} \\ V_{A1} \\ V_{A2} \end{pmatrix}$$

Jika didefinisikan :

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{pmatrix}$$

maka akan didapatkan persamaan :

$$\begin{pmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} V_{A0} \\ V_{A1} \\ V_{A2} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} V_{A0} \\ V_{A1} \\ V_{A2} \end{pmatrix} = A^{-1} \begin{pmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{pmatrix}$$

karena

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{pmatrix}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{pmatrix}$$

Persamaan akan menjadi :

$$\begin{pmatrix} V_{A0} \\ V_{A1} \\ V_{A2} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{pmatrix}$$

Dari persamaan di atas, komponen simetris dari fasa A akan didapatkan sebagai berikut :

$$V_{A0} = \frac{1}{3}(V_A + V_B + V_C) \quad \text{urutan nol}$$

$$V_{A1} = \frac{1}{3}(V_A + \alpha V_B + \alpha^2 V_C) \quad \text{urutan positif}$$

$$V_{A2} = \frac{1}{3}(V_A + \alpha^2 V_B + \alpha V_C) \quad \text{urutan negatif}$$

Persamaan pada arus yang tidak seimbang memiliki bentuk yang sama dengan persamaan pada tegangan. Arus pada setiap fasa dapat direpresentasikan sebagai :

$$I_A = I_{A1} + I_{A2} + I_{A0}$$

$$I_B = I_{B1} + I_{B2} + I_{B0}$$

$$I_C = I_{C1} + I_{C2} + I_{C0}$$

Substitusi hubungan antar fasa dengan komponen positif, negatif, dan nol akan menghasilkan :

$$I_A = I_{A1} + I_{A2} + I_{A0}$$

$$I_B = \alpha^2 I_{A1} + \alpha I_{A2} + I_{A0}$$

$$I_C = \alpha I_{A1} + \alpha^2 I_{A2} + I_{A0}$$

sehingga komponen simetris dapat direpresentasikan sebagai fungsi dari setiap arus pada masing-masing fasa, yaitu :

$$I_{A0} = \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C) \quad \text{urutan nol}$$

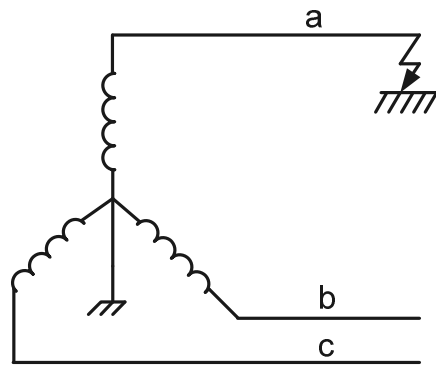
$$I_{A1} = \frac{1}{3}(I_A + \alpha I_B + \alpha^2 I_C) \quad \text{urutan positif}$$

$$I_{A2} = \frac{1}{3}(I_A + \alpha^2 I_B + \alpha I_C) \quad \text{urutan negatif}$$

Perhitungan Arus dan Tegangan Pada Gangguan Asimetris

Gangguan Satu Fasa ke Tanah.

Gangguan satu fasa ke tanah terjadi ketika sebuah fasa dari sistem tenaga listrik terhubung singkat dengan tanah.



Gambar 2.9 Gangguan satu fasa ke tanah

Persamaan ketika gangguan ini terjadi adalah :

$$V_A = 0$$

$$I_B = 0$$

$$I_C = 0$$

Didapatkan :

$$I_{A0} = \frac{1}{3}(I_A + 0 + 0)$$

$$I_{A1} = \frac{1}{3}(I_A + \alpha(0) + \alpha^2(0))$$

$$I_{A2} = \frac{1}{3}(I_A + \alpha^2(0) + \alpha(0))$$

$$I_{A0} = I_{A1} = I_{A2} = \frac{1}{3} I_A$$

Pada fasa generator (fasa A misalnya), jika kita mengaplikasikan hukum kirchoff akan berlaku:

$$V_{A1} = V_f - I_{A1} Z_1$$

$$V_{A2} = -I_{A2} Z_2$$

$$V_{A0} = -I_{A0}Z_0$$

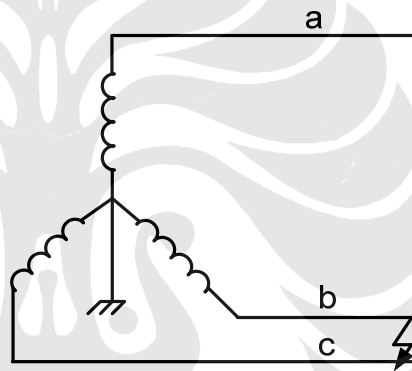
$$V_A = V_{A0} + V_{A1} + V_{A2} = -I_{A0}Z_0 + E_{A1} - I_{A1}Z_1 - I_{A2}Z_2 = 0$$

besarnya arus gangguan sebesar :

$$I_{A1} = \frac{V_f}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \quad (2.8)$$

Gangguan Dua Fasa Hubung Singkat

Gangguan dua fasa hubung singkat terjadi ketika dua buah fasa dari sistem tenaga listrik terhubung singkat.



Gambar 2.10 Gangguan dua fasa

Persamaan setiap fasa ketika gangguan ini terjadi adalah :

$$V_B = V_C$$

$$I_A = 0$$

$$I_B = -I_C$$

Sehingga didapat :

$$I_{A0} = \frac{1}{3}(0 - I_C + I_C)$$

$$I_{A1} = \frac{1}{3}(0 + \alpha(-I_C) + \alpha^2(I_C))$$

$$I_{A2} = \frac{1}{3}(0 + \alpha^2(-I_C) + \alpha(I_C))$$

Dari persamaan di atas :

$$I_{A0} = 0$$

$$I_{A1} = -I_{A2}$$

$$V_{A1} = V_f - I_{A1}Z_1$$

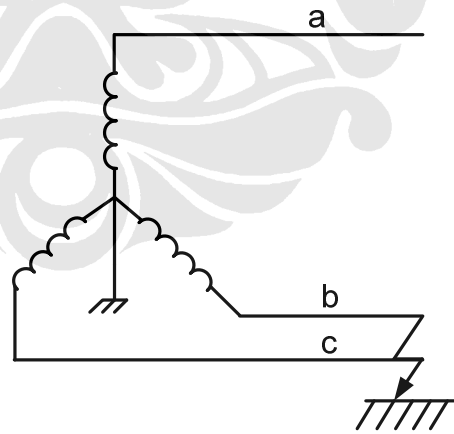
$$V_{A1} = I_{A1}Z_2$$

Sehingga :

$$I_{A1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2} \quad (2.9)$$

Gangguan Dua Fasa Ke Tanah

Gangguan dua fasa ke tanah terjadi ketika dua buah fasa dari sistem tenaga listrik terhubung singkat dengan tanah.



Gambar 2.11 Gangguan dua fasa ke tanah

Persamaan setiap fasa ketika gangguan ini terjadi adalah :

$$V_B = 0$$

$$V_C = 0$$

$$I_A = 0$$

dengan persamaan komponen simetris didapatkan :

$$V_{A0} = \frac{1}{3}(V_A + 0 + 0) = \frac{1}{3}V_A$$

$$V_{A1} = \frac{1}{3}[V_A + a(0) + a^2(0)] = \frac{1}{3}V_A$$

$$V_{A2} = \frac{1}{3}[V_A + a^2(0) + a(0)] = \frac{1}{3}V_A$$

sehingga untuk gangguan dua fasa ke tanah, dari persamaan di atas didapatkan :

$$V_{A0} = V_{A1} = V_{A2}$$

pada gangguan ini, arus yang mengalir melalui fasa A dan B akan kembali ke netral sehingga

$$I_N = I_B + I_C$$

Dari persamaan komponen arus :

$$I_{A0} = \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C)$$

$$I_N = I_A + I_B + I_C$$

$$I_N = 3I_{A0}$$

Substitusi dengan persamaan di atas :

$$I_N = I_B + I_C$$

$$3I_{A0} = (a^2I_{A1} + aI_{A2} + I_{A0}) + (aI_{A1} + a^2I_{A2} + I_{A0})$$

$$I_{A0} = (a^2 + a)I_{A1} + (a^2 + a)I_{A2}$$

$$I_{A0} = -I_{A1} - I_{A2}$$

Diketahui bahwa :

$$V_{A0} = V_{A1} = V_{A2}$$

$$V_{A1} = V_f - I_{A1}Z_1$$

$$V_{A2} = -I_{A2}Z_2$$

$$V_{A0} = -I_{A0}Z_0$$

Sehingga :

$$V_f - I_{A1}Z_1 = -I_{A2}Z_2$$

$$I_{A2} = \frac{I_{A1}Z_1 - V_f}{Z_2}$$

Serta :

$$V_f - I_{A1}Z_1 = -I_{A0}Z_0$$

$$I_{A0} = \frac{I_{A1}Z_1 - V_f}{Z_0}$$

Didapatkan:

$$I_{A0} = -I_{A1} - I_{A2}$$

$$\frac{I_{A1}Z_1 - V_f}{Z_0} = -I_{A1} - \frac{I_{A1}Z_1 - V_f}{Z_2}$$

$$I_{A1}Z_1Z_2 - V_fZ_2 = -I_{A1}Z_0Z_2 - (I_{A1}Z_0Z_1 - V_fZ_0)$$

$$I_{A1}Z_1Z_2 + I_{A1}Z_0Z_2 + I_{A1}Z_0Z_1 = V_fZ_2 + V_fZ_0$$

$$I_{A1} = \frac{V_f(Z_0 + Z_2)}{Z_1Z_2 + Z_0Z_2 + Z_0Z_1}$$

$$I_{A1} = \frac{V_f}{Z_1 + \frac{Z_0Z_2}{Z_0 + Z_2}} \quad (2.10)$$

2.3.2 Berdasarkan Metode Perhitungan

2.3.2.1 ANSI/IEEE

Arus hubung singkat dibagi menjadi 3 kondisi berdasarkan lamanya waktu gangguan yaitu setelah $\frac{1}{2}$ cycle (momentary/subtransient network), 1.5-4 cycle (interrupting/transient network), dan 30 cycle (steadystate) gangguan terjadi. Ketiga kondisi tersebut dibedakan lagi berdasarkan reaktansi masing-masing mesin seperti dilihat pada tabel dibawah ini.

Tipe Mesin	1/2 cycle	1.5-4 cycles	30 cycles
Utility	X''	X''	X''
Motor Sinkron	Xd''	1.5 Xd''	Infinity
Motor Induksi			Infinity
>1000 hp @1800 rpm/less	Xd''	1.5 Xd''	
>250 hp @3600 rpm	Xd''	1.5 Xd''	
all other \geq 50 hp	1.2 Xd''	3.0 Xd''	
<50 hp	1.67 Xd''	Infinity	

Prosedur berikut digunakan untuk menghitung arus hubung singkat seketika :

1. Hitung nilai rms simetris dari hubung singkat seketika dengan rumus :

$$I_{mom,rms,symm} = \frac{V_{pre-fault}}{\sqrt{3} Z_{eq}} \quad (2.11)$$

Dimana Z_{eq} adalah impedansi ekivalen dari bus bar yang terganggu

2. Hitung nilai rms asimetris dari hubung singkat seketika dengan rumus :

$$I_{mom,rms,asymm} = MF_m I_{mom,rms,symm}$$

Dimana MF_m adalah faktor pengali seketika yang dihitung dari :

$$MF_m = \sqrt{1 + 2e^{\frac{2\pi}{X/R}}} \quad (2.12)$$

3. Hitung nilai *peak* dari arus hubung singkat seketika dengan rumus :

$$I_{mom,peak} = MF_p I_{mom,rms,symm}$$

Dimana MF_p adalah faktor pengali *peak* yang dihitung dari :

$$MF_p = \sqrt{2} \left(1 + e^{\frac{\pi}{X/R}} \right) \quad (2.13)$$

Prosedur untuk menghitung arus hubung singkat transient dan steadystate sama seperti di atas namun bedanya terletak pada impedansi sistem yang digunakan.

2.3.2.2 IEC

Arus hubung singkat dibagi berdasarkan letak gangguan yang terjadi yaitu:

1. Gangguan hubung singkat yang terjadi jauh dari generator

$$I''_k = \frac{cU_n}{\sqrt{3} \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_k} \quad (2.14)$$

Dimana :

$cU_n/\sqrt{3}$ = sumber tegangan ekivalen

$R_k = R_{Qt} + R_T + R_L$ = jumlah resistansi sistem yang terkena arus hubung singkat

$X_k = X_{Qt} + X_T + X_L$ = jumlah reaktansi sistem yang terkena arus hubung singkat

$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}$ = impedansi hubung singkat

I_k'' = arus hubung singkat subtransient

Sedangkan arus hubung singkat steadystate adalah $I_k = I_b = I_k''$

Nilai faktor koreksi (c) pada beberapa tingkat tegangan dapat dilihat di table berikut.

		faktor tegangan c	
	SC maks		SC min
	cmaks		cmin
Tegangan Nominal Un			
Low voltage : 100-1000V			
230 V /400 V	1.00		0.95
other voltages	1.05		1.00
Medium voltage	1.10		1.00
High voltage	1.10		1.00

2. Gangguan hubung singkat yang terjadi dekat dengan generator

- 1) I_p (Peak) = $\lambda \cdot I_k'' = f(X/R, I_k'')$

Dimana I_p adalah arus peak dari gangguan hubung singkat

- 2) I_b (Breaking) = $\mu \cdot I_k'' = f(X/R, I_k'')$

Dimana I_b adalah arus pemutusan yang digunakan oleh circuit breaker apabila terjadi gangguan hubung singkat

- 3) I_k'' (initial) = $f(E_a, Z_{\text{fault}})$

Dimana I_k'' adalah arus gangguan hubung singkat subtransient

$$4) I_{k\max} (\text{steady}) = \lambda_{\max} \cdot I_{RG}$$

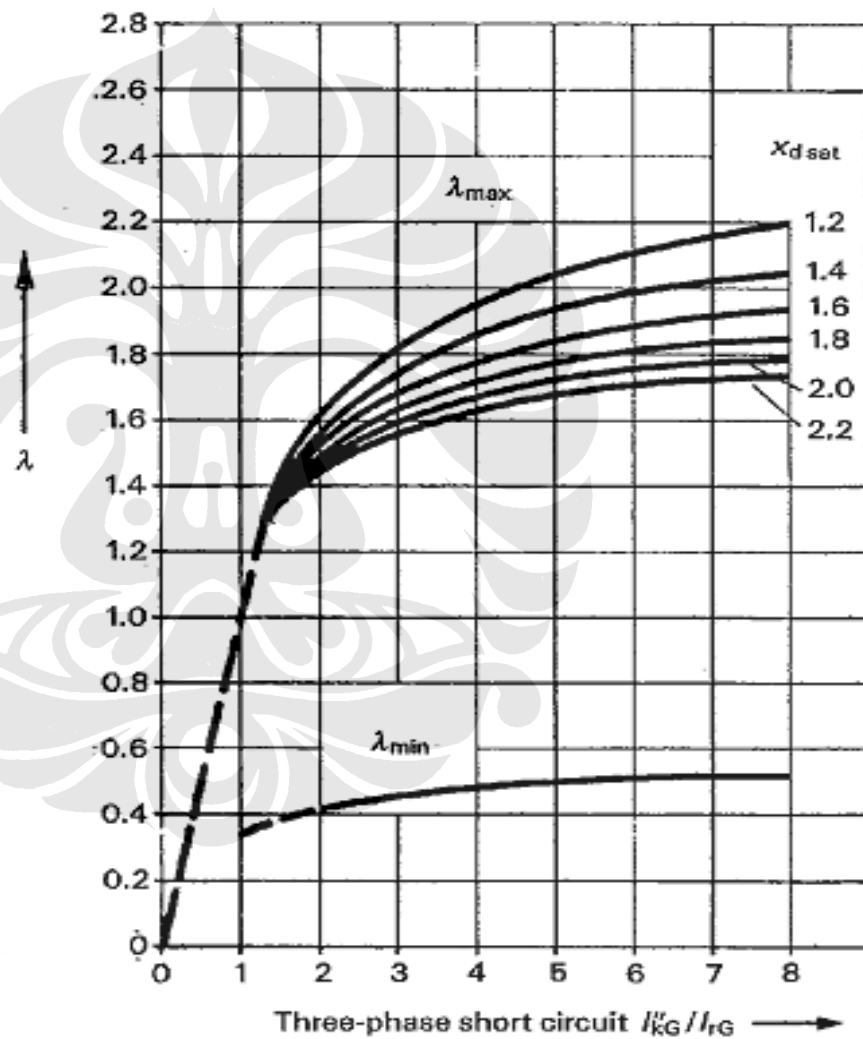
$$I_{k\min} (\text{steady}) = \lambda_{\min} \cdot I_{RG}$$

Dimana:

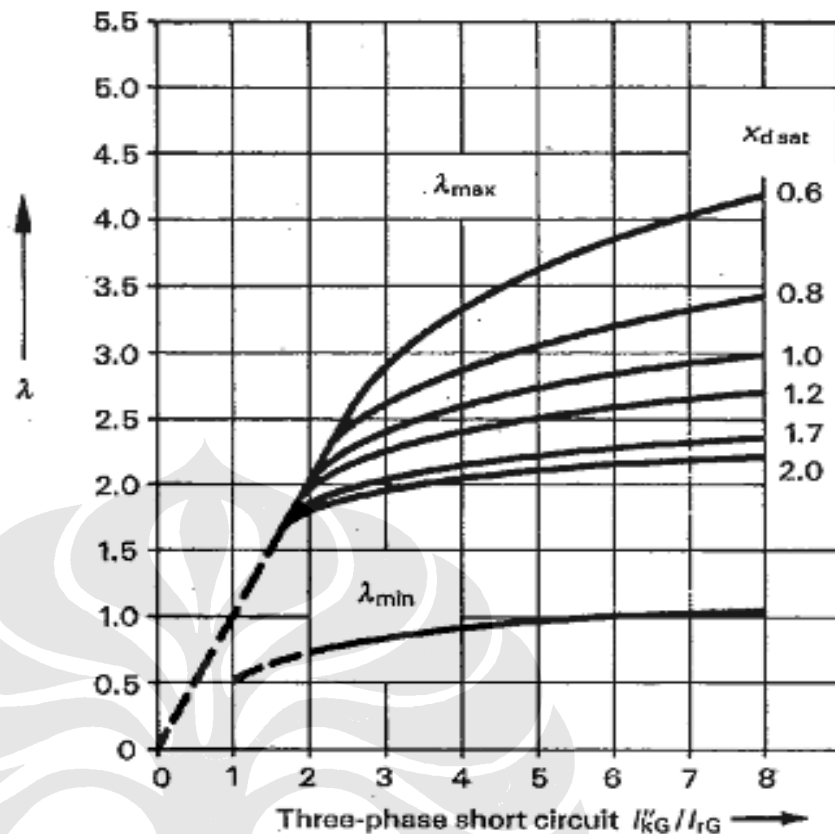
I_k adalah arus hubung singkat steadystate

I_{RG} adalah arus rating dari generator

λ adalah ratio arus hubung singkat subtransient dengan arus rating generator yang didapat dari diagram berikut ini



Gambar 2.12 diagram pencari factor λ_{\max} untuk $I_{k\max}$



Gambar 2.13 diagram pencari factor λ_{min} untuk I_{kmin}

2.4 Pengaman Sistem Tenaga Listrik

2.4.1 Pengertian dasar dan persyaratan peralatan pengaman

Pengaman dibutuhkan untuk melindungi tiap elemen dari sistem serta mengamankan secepat mungkin dari gangguan yang sedang terjadi, sebab gangguan dapat membahayakan sistem, antara lain menyebabkan jatuhnya generator-generator dalam sistem. Bagi pihak konsumen akibatnya adalah terganggunya kerja dari alat-alat listrik, terutama didalam industri-industri yang mengakibatkan terganggunya produksi.

Tujuan dari pengaman terutama untuk mengamankan peralatan dan memadamkan gangguan yang telah terjadi serta melokalisirnya, dan membatasi pengaruh-pengaruhnya, biasanya dengan mengisolir bagian-bagian yang terganggu itu tanpa mengganggu bagian-bagian yang lain. Didalam sistem atau rangkaian yang konstruksinya cukup baik, proteksi yang ada padanya akan memperlihatkan fungsi-fungsinya dengan sangat memuaskan, dan bilamana

rangkaian diubah atau diperluas, maka proteksinya juga harus mengalami perubahan.

Pada umumnya sistem transmisi beroperasi dengan netral trafonya diketanahkan, baik secara langsung atau melalui suatu impedansi. Karena sebagian besar gangguan (70-80%) adalah gangguan tanah, maka rele gangguan tanah harus dipasang selain rele fasa untuk proteksi pada sistem distribusi. Arus residu atau arus urutan nol bersama-sama dengan tegangan urutan nol dipakai sebagai sumber penggerak dari rele tanah itu.

Untuk membangkitkan tenaga dan mengalirkan daya listrik ke pemakai diperlukan investasi yang sangat besar, terutama untuk pengadaan peralatan-peralatan listrik. Peralatan-peralatan ini dibuat untuk dapat bekerja pada kondisi normal, tetapi gangguan hubung singkat selalu mungkin terjadi, antara lain :

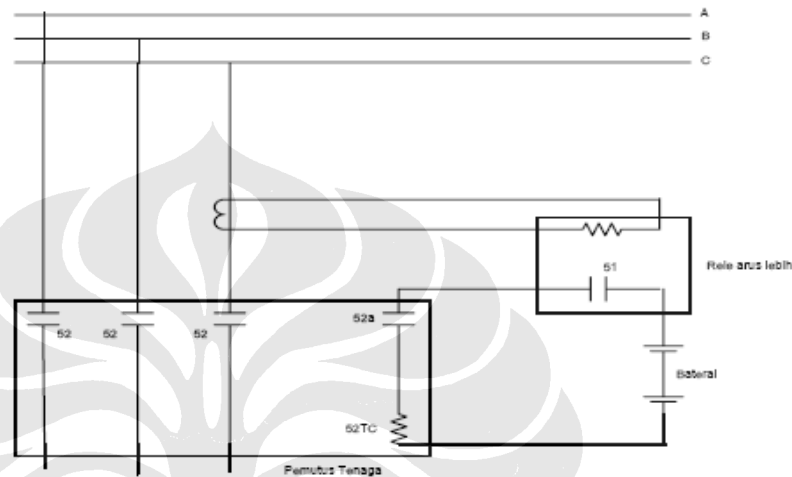
- Tegangan lebih karena proses putus-sambung pemutus tenaga
- Tegangan lebih sebagai akibat sambaran petir langsung dan tidak langsung
- Kerusakan mekanis dari peralatan

Arus hubung singkat ini dapat menyebabkan gangguan serius pada peralatan dan juga terhentinya pelayanan daya pada pemakai. Pada sistem tenaga listrik yang modern untuk mengurangi kerusakan pada peralatan terdapat dua alternatif dalam perencanaan, yakni yang pertama sistem dapat direncanakan sedemikian rupa sehingga gangguan tidak terjadi, yang kedua gangguan masih memungkinkan terjadi dan untuk itu dilakukan langkah-langkah untuk melokalisasi gangguan sehingga kerusakan yang ditimbulkan dapat ditekan walaupun ada kemungkinan untuk menghilangkan gangguan-gangguan yang terjadi di sistem dengan cara : perencanaan sistem yang baik, perhitungan koordinasi isolasi yang teliti, operasi dan pemilihan yang tertib dan lain-lain, namun hal ini tidak mungkin menjamin bahwa sistem bebas dari gangguan. Karena itu timbulnya gangguan dalam merupakan hal yang sudah harus diterima dan diperhitungkan.

Rele proteksi adalah suatu peralatan yang dapat mendeteksi kondisi tidak normal yang mungkin terjadi dalam sistem dengan cara mengukur perbedaan besaran listrik pada keadaan normal dan keadaan gangguan. Besaran listrik dasar

yang berubah harganya pada keadaan gangguan adalah tegangan, arus, sudut fasa dan frekuensi.

Jika gangguan telah dideteksi maka rele akan bekerja melepaskan bagian sistem yang terganggu dari sistem yang masih sehat melalui operasi pemutus daya (*Circuit Breaker*). Suatu contoh proteksi rele sederhana dapat dilihat pada gambar.



Gambar 2.14 Skema proteksi sederhana

Suatu perencanaan rele proteksi yang baik dan efisien harus mempunyai hal-hal sebagai berikut :

a. Kecepatan

rele proteksi harus dapat melepaskan bagian yang terganggu secepat mungkin. Kecepatan kerja rele proteksi diperlukan antara lain karena :

- Menjaga stabilitas sistem
- Mengurangi bagian-bagian peralatan yang rusak
- Mengurangi kerugian waktu gagal dari pemakai (*outage time*)
- Memungkinkan kecepatan penutupan kembali dari pemutus daya (*High speed recloser*) sehingga dapat memperbaiki pelayanan bagi pemakai.

Untuk memperkecil waktu yang diperlukan untuk memutuskan bagian yang terganggu dari sistem maka rele proteksi kecepatan tinggi harus dioperasikan bersama dengan pemutus daya kecepatan tinggi. Waktu kerja yang diperlukan dari mulai terjadi gangguan sampai bekerjanya

pemutus daya untuk mengisolasi daerah gangguan adalah seperti persamaan berikut :

$$T_{op} = t_p + t_{cb} \quad (2.15)$$

Dimana :

T_{op} = waktu operasi rele mulai bergerak hingga pemutus daya mengisolir daerah gangguan

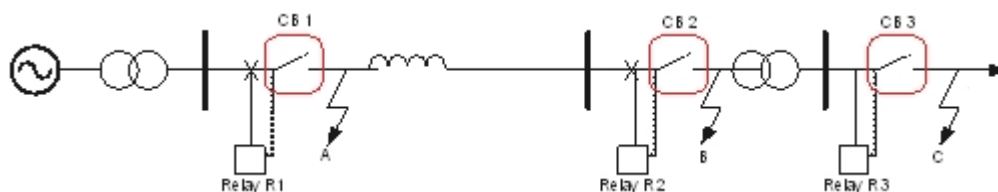
t_p = waktu yang dibutuhkan rele mulai piringan bergerak hingga bekerjanya kontak rele

t_{cb} = waktu yang dibutuhkan oleh sistem mekanis untuk menggerakkan pemutus daya

Waktu pemutusan dari CB adalah waktu mulai dari penutupan kontak pada rangkaian penggerak sampai dengan terputusnya arus gangguan (akibat membukanya CB). Rele proteksi saat ini mempunyai waktu operasi 1 sampai 2 *cycles*, atau 0,02 sampai 0,06 detik, sedangkan waktu pemutusan CB saat ini adalah 2,5 sampai 3 *cycles* atau 0,05 sampai 0,06 detik, dengan demikian waktu pembersihan gangguan (*clearing time*) adalah 0,07 sampai 0,10 detik.

b. Selektivitas

adalah kemampuan dari sistem proteksi untuk menentukan dimana gangguan terjadi dan memilih Pemutus Tenaga Terdekat mana yang akan bekerja yang mampu membebaskan sistem yang sehat dari gangguan dengan resiko sekecil mungkin.



Gambar 2.16 Diagram satu garis dari sistem yang menggambarkan selektivitas daerah proteksi.

Jika gangguan terjadi pada titik C (Gambar 2.16) maka Pemutus Tenaga CB 3 akan terbuka, jika gangguan terjadi pada titik B maka Pemutus Tenaga CB 2 akan terbuka, demikian seterusnya. Karena itu jika terjadi gangguan pada sistem, maka hanya Pemutus Tenaga yang terdekat yang akan bekerja. Hal ini menyebabkan perlunya membagi sistem menjadi beberapa bagian yang akan dapat melindungi sistem dari gangguan dengan menjaga agar sistem yang terbuka seminimum mungkin. Setiap gangguan pada daerah yang diamankan akan menyebabkan terbukanya Pemutus Tenaga pada daerah tersebut. Sistem akan dibagi menjadi beberapa daerah proteksi (*Protection Zone*) :

- Generator dan Trafo Generator unit
- Busbar
- Rangkaian distribusi (seperti pada gambar 4)
- Transformator
- Transmisi

c. Sensitivitas

adalah kemampuan dari rele untuk bekerja dengan baik sesuai dengan karakteristiknya dengan penyimpangan yang minimum. Kemungkinan terjadinya penyimpangan yang tidak sesuai dengan perencanaan dari cara kerja rele harus diperhitungkan. Proteksi yang diinginkan adalah proteksi yang sesensitif mungkin agar rele dapat bekerja sesuai dengan karakteristiknya. Sistem proteksi yang sensitif akan lebih kompleks dan memerlukan lebih banyak peralatan dan rangkaian karena itu akan lebih mahal. Proteksi seperti ini digunakan pada sistem dimana proteksi sederhana tidak dapat dipergunakan karena tingkat sensitivitasnya rendah. Sensitivitas ditentukan oleh faktor kepekaan (F_{sens}). Untuk rele arus lebih dapat ditulis sebagai berikut :

$$F_{sens} = \frac{I_{fault}}{I_{pu}}$$

Dimana : F_{sens} = faktor sensitivitas

I_{fault} = arus gangguan minimum

I_{pu} = arus mula rele/arus minimum pick up

Pada umumnya faktor sensitivitas harus > 1.5 karena kurva arus waktu rele arus lebih dimulai pada tap 1.5

d. Keandalan

berarti bahwa rele proteksi setiap saat harus dapat berfungsi dengan baik dan betul pada setiap kondisi gangguan yang telah direncanakan untuk rele tersebut.

Keandalan dapat dibagi menjadi 3 aspek yaitu sebagai berikut :

- **Dependability**
Yaitu tingkat kepastian beroperasinya suatu peralatan proteksi. Pada prinsipnya peralatan proteksi harus dapat mendeteksi dan melepaskan bagian yang terganggu tidak boleh gagal bekerja. Dengan kata lain memiliki tingkat dependability yang sangat tinggi.
- **Security**
Yaitu tingkat kepastian dari peralatan proteksi untuk tidak salah beroperasi. Salah beroperasi mengakibatkan pengaman bekerja (dari yang seharusnya tidak beroperasi).
- **Avaibility**
Yaitu perbandingan antara waktu dimana pengaman dalam kondisi berfungsi atau siap beroperasi dengan waktu total dalam operasinya.

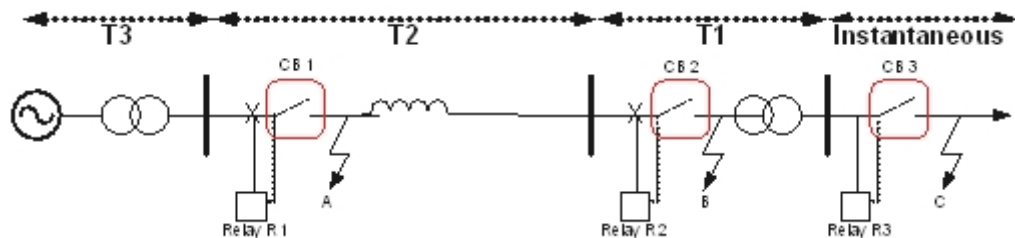
2.4.2 Jenis - jenis Pengaman

Ada dua pengaman yang dikenal, yaitu sebagai berikut :

- *Primary protection* (Pengaman Utama)
- *Back – up protection* (Pengaman Cadangan)

Pengaman Utama adalah pertahanan terdepan dari sistem dimana gangguan di daerah proteksi dari suatu rele dapat diatasi secepat mungkin. Seperti disebutkan keandalan yang sempurna dari sistem proteksi, trafo arus, trafo tegangan dan pemutus tenaga tidak mungkin diperoleh, karena itu beberapa proteksi cadangan sangat diperlukan. Pengaman Cadangan akan bekerja jika proteksi utama gagal bekerja, selain itu juga melindungi daerah pengaman berikutnya. Rele cadangan mempunyai penundaan waktu yang cukup panjang sehingga memungkinkan proteksi utama bekerja terlebih dahulu.

Suatu contoh sederhana dari proteksi cadangan adalah dengan Rele tingkatan waktu seperti pada gambar 2.17.



Gambar 2.17. Diagram garis tunggal dengan skema proteksi rele tingkatan waktu

Gangguan pada C pada umumnya pertama-tama akan dideteksi oleh Rele R3 dan dipisahkan oleh Pemutus Tenaga di titik C. Jika terjadi kegagalan operasi dari Rele atau peralatan pada titik C maka gangguan akan dipisahkan dengan beroperasinya rele pada titik B. Hal ini dapat diperoleh dengan mengatur waktu pemutusan untuk masing-masing rele $R_3 < R_2 < R_1$. Pada ujung sistem di atas biasanya di set *instantaneous* (seketika) dan secara bertahap $T_1 < T_2 < T_3$ dan seterusnya.

2.4.3 Macam Rele

Rele proteksi dapat dibagi tergantung pada proteksi dan prinsip kerjanya sebagai berikut :

- Rele elektromagnetik : yang bisa digerakkan dengan arus AC dan DC dengan prinsip pergerakan besi magnetik, besi jangkar dan lain-lain, untuk menggerakkan kontak.
- Rele induksi elektromagnetik atau Rele induksi sederhana ; yang pada prinsipnya menggunakan prinsip motor induksi pada operasinya. Rele jenis ini hanya digerakkan oleh Supply AC saja.
- Rele Elektrotermis
- Rele Elektrophisic ; contohnya adalah Rele Bucholz untuk trafo
- Rele Static ; menggunakan katup termis, transistor dan amplifier untuk mendapatkan karakteristik operasi.
- Rele Elektrodinamis ; mempunyai prinsip yang sama dengan peralatan penggerak (moving coil instrument).

Rele dapat Dibagi Menurut Penggunaannya sebagai berikut :

- i. Rele tegangan kurang, arus kurang dan daya kurang
Dimana rele akan beroperasi jika terjadi penurunan tegangan, arus atau kehilangan daya melewati harga yang telah ditentukan.
- ii. Rele tegangan lebih, arus lebih atau daya lebih
Dimana rele akan bekerja jika tegangan, arus dan daya telah melewati harga yang telah ditentukan.
- iii. Rele Arah atau Rele Arus Balik
Dimana rele akan bekerja jika terjadi pergeseran sudut fasa dari arus terhadap tegangan sistem dengan kompensasi pada tegangan jatuh.
- iv. Rele Arah atau Rele Daya Balik
Dimana rele akan beroperasi jika terjadi pergeseran sudut fasa dari arus dan tegangan kerja tanpa kompensasi dari tegangan.
- v. Rele Diferensial
Dimana rele akan bekerja jika terjadinya perbedaan fasa atau amplituda antara dua harga besaran listrik.
- vi. Rele Jarak
Dimana operasi rele tergantung pada perbandingan tegangan dan arus.
- vii. Rele Bucholz
adalah suatu rele yang dioperasikan untuk mengamankan trafo dari timbulnya gas akibat adanya gangguan. Gangguan di dalam trafo akan menyebabkan timbulnya gas yang segera akan bergerak ke atas. Gas ini digunakan sebagai besaran ukur untuk menggerakkan rele. Jika terjadi gangguan di dalam trafo (seperti kerusakan isolasi antar gulungan, tembusnya isolasi, pemanasan inti, hubungan kontak yang kurang baik, salah sambung dan lain-lain) maka akan timbul gelembung gas yang bergerak ke atas ke permukaan minyak ke udara luar melalui rele Bucholz dimana aliran gas dideteksi oleh sebuah katup yang dapat memberikan alarm dan tripping dari Pemutus Tenaga. Rele ini dapat juga digunakan untuk mendeteksi tinggi minyak didalam trafo dan memberikan peringatan. Pipa yang menghubungkan trafo dengan rele harus sependek

mungkin dan harus mempunyai sudut kemiringan yang cukup kecil dengan horizontal.

2.4.4 Rele Arus Lebih

Pada dasarnya rele arus lebih adalah suatu alat yang mendeteksi besaran arus yang melalui suatu jaringan dengan bantuan trafo arus, jika arus melebihi tetapan arus pada pengaturan rele maka rele akan mengirim sinyal trip pada pemutus tenaga. Harga atau besaran arus yang boleh dilewati disebut dengan *current setting*. Karakteristik dari rele arus lebih adalah sebagai berikut :

1. Rele arus lebih waktu seketika (*Instantaneous Relay*)

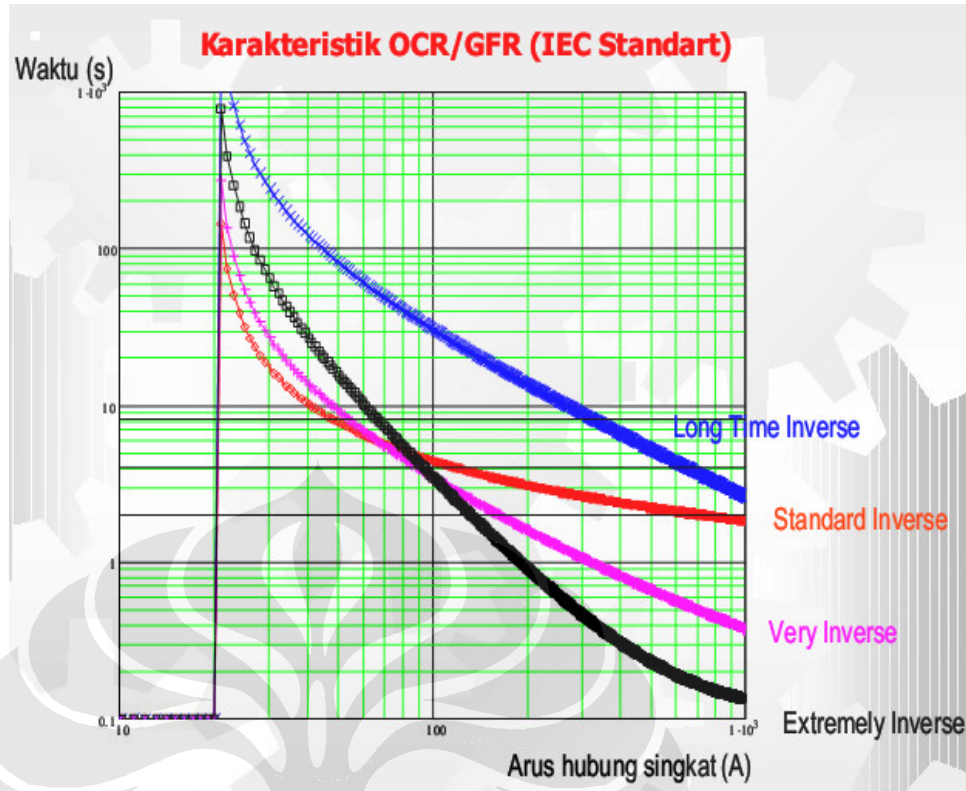
Dimana rele ini akan memberikan perintah buka kepada pemutus tenaga apabila arus gangguan yang mengalir melebihi setting arusnya dan jangka waktu kerja relai mulai dari pick up sampai rele bekerja sangat singkat tanpa adanya waktu tunda.

2. Rele arus lebih waktu tertentu (*Definite time-lag Relay*)

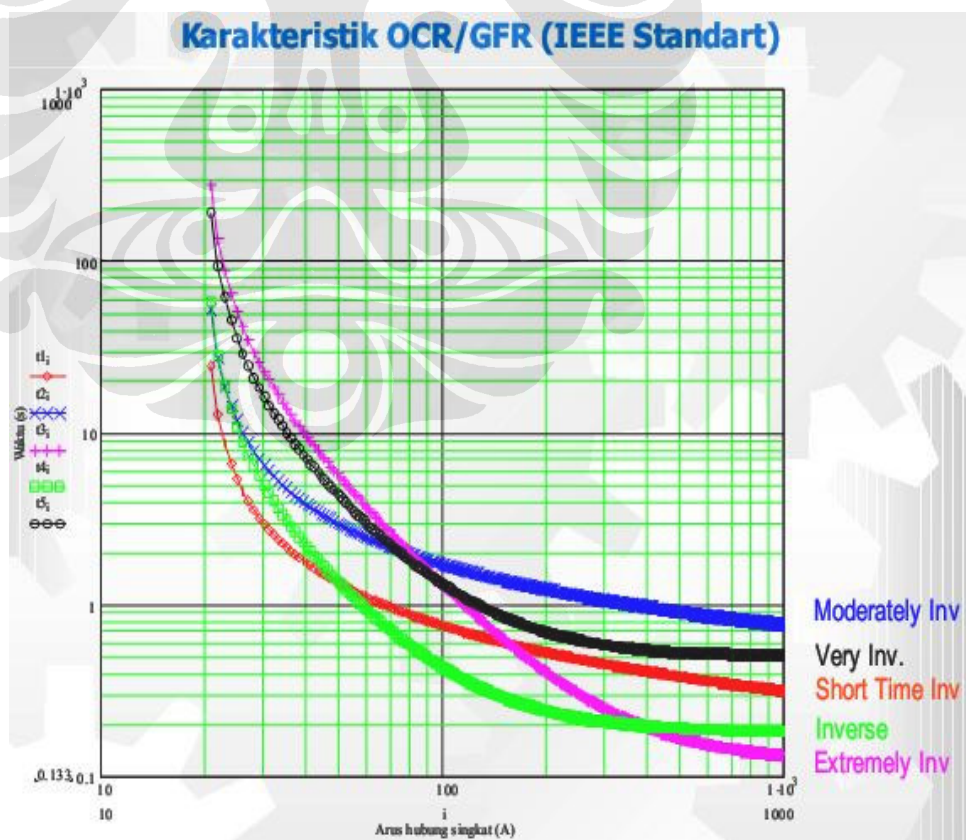
Dimana rele ini akan memberikan perintah buka kepada pemutus tenaga apabila arus gangguan yang mengalir melalui rele melampaui setting arusnya, dan jangka kerja waktu rele mulai dari pick up sampai kerja rele diperpanjang sampai waktu tertentu.

3. Rele arus lebih waktu terbalik (*Invers Time-lag Relay*)

Dimana waktu operasi rele berbanding terbalik terhadap besar arus atau besaran lain yang menyebabkan rele bekerja.



Gambar 2.18 Kurva karakteristik rele arus lebih inverse (standar IEC)



Gambar 2.19 Kurva karakteristik rele arus lebih inverse (standar IEEE/ANSI)

Karakteristik-karakteristik di atas memiliki perbedaan dalam hal aplikasi. Perbedaan tersebut adalah :

- Short Time Inverse
Karakteristik ini digunakan untuk sistem yang membutuhkan waktu pemutusan gangguan yang cepat, dimana koordinasi dengan relai lain tidak diperlukan
- Standard inverse
Karakteristik ini digunakan sebagai karakteristik standard untuk koordinasi antar rele dimana kapasitas hubung singkat di berbagai lokasi rele cukup signifikan
- Inverse
Karakteristik ini lebih curam dibanding kurva standar inverse. Kurva ini biasanya dikoordinasikan dengan rele lain yang tidak menggunakan karakteristik standard IEC
- Very Inverse
Karakteristik ini lebih curam dibanding kurva inverse. Karakteristik ini digunakan untuk koordinasi beberapa rele dan dimana terdapat perbedaan kapasitas hubung singkat di antara lokasi rele
- Extremely Inverse
Karakteristik ini lebih curam dibanding kurva very inverse. Kurva jenis ini biasa digunakan untuk koordinasi dengan pengaman lebur atau fuse di sisi bawah rele
- Long Time Inverse
Karakteristik jenis ini memiliki waktu kerja yang cukup lama pada setting arus yang sama di banding karakteristik jenis lain. Karakteristik jenis ini biasanya digunakan untuk pengamanan tahanan pentanahan trafo dan sebagai cadangan pengaman gangguan tanah.

Persamaan karakteristik-karakteristik di atas menurut standar IEC adalah :

$$t = \frac{KTMS}{\left(\frac{I_f}{I_s}\right)^\alpha - 1} \quad (2.16)$$

Dimana :

TMS (Time Multiplier Setting) adalah penyetelan waktu atau kurva yang digunakan yang dirumuskan sebagai berikut :

$$TMS = \frac{\text{Arus Primer}}{\text{Setting arus Primer}} = \frac{\text{Arus Primer}}{\text{Setting arus primer} * CT \text{ ratio}} \quad (2.17)$$

I_f/I_s adalah perkalian dari arus primer terhadap setting arus (MTVC – Multiple of Tap Value current). Sedangkan konstanta K dan α untuk masing-masing karakteristik di atas dapat dilihat pada table berikut :

Tabel 2.1 Konstanta karakteristik rele arus lebih waktu terbalik menurut standard IEC

Karakteristik	K	α
Short Time Inverse	0,05	0,04
Standard Inverse	0,14	0,02
Inverse	9,4	0,7
Very Inverse	13,5	1
Exteremely Inverse	80	2
Long Time Inverse	120	1

Sedangkan Persamaan karakteristik-karakteristik di atas menurut standar ANSI/IEEE adalah :

$$t = \left(\frac{A}{M^p - 1} + B \right) \cdot TMS \quad (2.18)$$

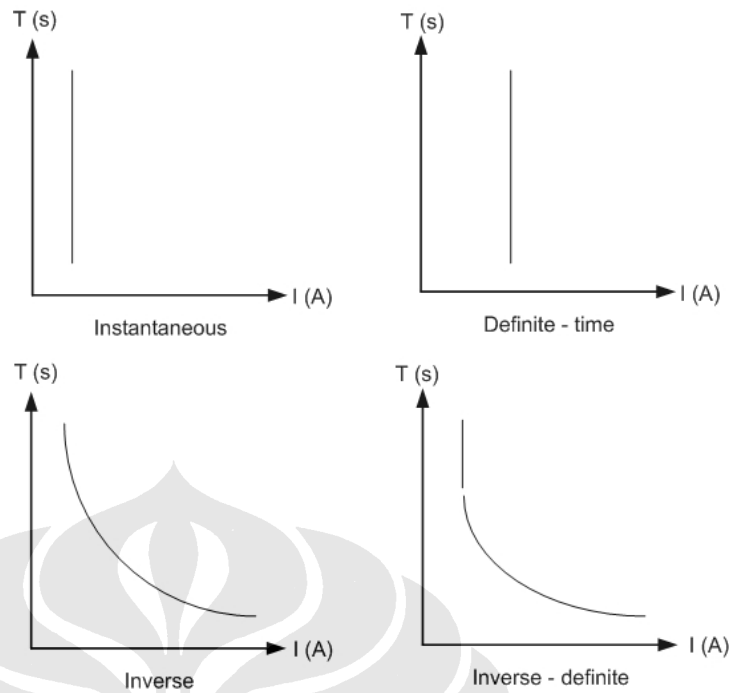
M adalah perkalian dari arus primer terhadap setting arus (MTVC – Multiple of Tap Value current). Sedangkan untuk konstanta A, B dan p untuk masing-masing karakteristik di atas dapat dilihat pada table berikut :

Tabel 2.2 Konstanta karakteristik rele arus lebih waktu terbalik menurut standard ANSI

Karakteristik	A	B	p
Short Time Inverse	0,019	0,113	0,04
Moderately Inverse	0,052	0,113	0,02
Inverse	8,93	0,179	2,09
Very Inverse	18,92	0,492	2
Exteremely Inverse	28,08	0,13	2
Long Time Inverse	5,61	2,18	2,09

4. Rele arus lebih terbalik waktu tertentu minimum (*IDMT Relay*)

Dimana waktu kerja rele hampir terbalik dengan harga terkecil V dari arus atau besaran lain yang menyebabkan rele bekerja dan rele akan bekerja pada waktu minimum tergantung jika besaran listrik naik tanpa batas.



Gambar 2.20 kurva jenis - jenis rele arus lebih

2.4.4.1 Penentuan setting rele arus lebih

Dalam penyetelan arus lebih ada beberapa hal yang perlu dipertimbangkan yaitu perhatian yang berlebihan pada peralatan akan menyebabkan tingkat operasional terganggu, sedangkan perhatian yang berlebihan pada kondisi operasional akan membahayakan peralatan. Penentuan setting arus rele arus lebih terbagi menjadi 2 yaitu :

1. Pada gangguan fasa

Gangguan fasa yang dimaksud adalah gangguan hubung singkat 2 fasa dan 3 fasa. Lokasi transformator arus untuk rele gangguan fasa adalah dimasing-masing kawat fasa sehingga dibutuhkan 3 elemen rele arus lebih untuk sistem 3 fasa. Pada dasarnya rele gangguan fasa tidak boleh bekerja pada beban maksimum, namun diusahakan rele gangguan fasa dapat berfungsi sebagai pengaman beban lebih. Arus pick up sinonim dengan arus setting rele yang berarti nilai arus minimum rele yang mengakibatkan terbukanya kontak pemutus tenaga. Sehingga penyetelan arus pick up minimum adalah :

$$I_{set} = (1.1 \text{ s/d } 1.3) * I_{beban} \quad (2.19)$$

I_{beban} (arus beban) biasanya ditentukan oleh kapasitas arus penghantar (current carrying capacity) atau harga pengenalan transformator arus.

Selain rele gangguan fasa berfungsi sebagai rele pengaman utama juga berfungsi sebagai pengaman cadangan untuk seksi berikutnya pada arus gangguan minimum. Dalam hal ini diambil gangguan 2 fasa pada saat pembangkitan minimum sehingga

$$I_{\text{setmaks}} = K_s * I_{\text{hs2fasa}} \quad (2.20)$$

Dimana :

I_{setmaks} = penyetelan arus kerja maksimum

K_s = factor keamanan dalam hal ini bernilai 0.8

I_{hs2fasa} = arus gangguan 2 fasa pada pembangkitan minimum di seksi berikutnya

2. Pada gangguan tanah

Pengaman rele arus lebih gangguan tanah hanya dapat diterapkan pada sistem yang ditanahkan. Hal ini disebabkan pada sistem dengan pentanahan mengambang, besarnya impedansi urutan nol tak terhingga sehingga tidak ada arus gangguan satu fasa ke tanah yang dapat mengalir. Pada dasarnya rele gangguan tanah mendeteksi arus sisa (residual current) pada saluran. Dimana arus sisa adalah ;

$$I_{\text{residual}} = I_a + I_b + I_c$$

Mengingat rele gangguan tanah hanya bekerja jika terjadi gangguan tanah maka penyetelan arusnya dapat serendah mungkin, namun untuk sistem 3 fasa 4 kawat harus dipertimbangkan adanya arus ketidakseimbangan yang mungkin timbul. Pada umumnya penyetelan arus pick up minimum adalah :

$$I_{\text{set}} = (0.3 \text{ s/d } 0.5) * I_{\text{beban}} \quad (2.21)$$

I_{beban} (arus beban) biasanya ditentukan oleh kapasitas arus penghantar (current carrying capacity) atau harga pengenalan transformator arus.

Penentuan setting waktu kerja rele arus lebih baik rele gangguan fasa maupun rele gangguan tanah yang letaknya paling ujung atau level tegangan terendah adalah secepat mungkin. Adapun untuk penyetelannya untuk arus lebih waktu tertentu ialah 0.2 sampai 0.3 detik, sedangkan rele arus lebih dengan waktu terbalik dipilih

TMS terkecil atau kurva yang terendah. Penentuan setting waktu kerja di seksi hulunya didasarkan bahwa rele yang berdekatan harus selektif. Dengan demikian harus ada beda waktu kerja atau grading time untuk rele yang berdekatan. Pada umumnya Δt diambil 0.4 sampai 0.5 detik didasarkan adanya :

- Kesalahan rele waktu pada kedua rele waktu yang berurutan 0.2-0.3 detik
- Overshoot 0.05 detik
- Waktu pembukaan pemutus tenaga maksimum 0.1 detik
- Factor keamanan 0.05 detik

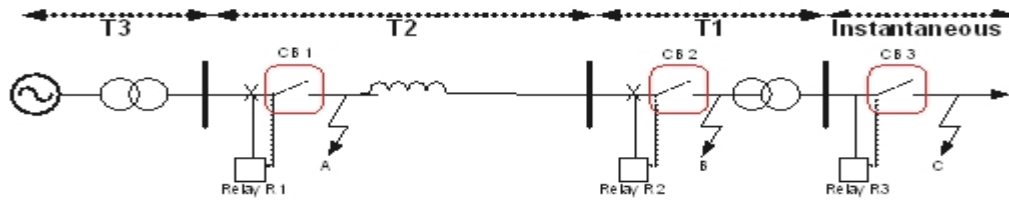
Penyetelan waktu berdasarkan pada pembangkitan maksimum dan kemudian diperiksa pada pembangkitan minimum apakah semua rele masih dapat berfungsi sebagai pengaman cadangan di seksi berikutnya. Bila ternyata untuk pembangkitan minimum tidak dapat sebagai pengaman cadangan seksi berikutnya, maka perlu ditinjau kembali penyetelan arusnya. Kalau peyetelan arusnya tidak dapat diturunkan karena rele akan salah kerja dengan adanya arus beban maksimum, maka harus dipilih rele jenis lain, misalnya rele arus lebih yang dikontrol tegangan.

2.4.4.2 Koordinasi Rele Arus Lebih Dengan Diskriminasi waktu

Koordinasi rele arus lebih memerlukan pengetahuan yang baik tentang arus hubung singkat yang mungkin terjadi pada setiap bagian dari sistem tenaga listrik. Karena tes dalam skala besar hampir tidak mungkin untuk dilakukan maka diperlukan analisa sistem tenaga listrik. Data yang dibutuhkan dalam studi koordinasi rele arus lebih antara lain :

- i. diagram garis tunggal dari sistem yang akan dipelajari termasuk didalamnya tipe serta rating dari rele yang digunakan serta karakteristik trafo arus yang digunakan.
- ii. Besarnya impedansi dari semua elemen sistem seperti trafo, mesin-mesin listrik, dan sirkuit penyulang.
- iii. Arus hubung singkat maksimum dan minimum yang mungkin terjadi pada pada setiap bagian sistem tenaga listrik.
- iv. Arus beban maksimum yang mungkin mengalir pada sistem.

Pada metode ini, waktu setting yang tepat diberikan pada masing-masing relay yang mengontrol pemutus tenaga. Hal ini untuk memastikan bahwa rele yang trip adalah rele yang paling dekat dengan gangguan.

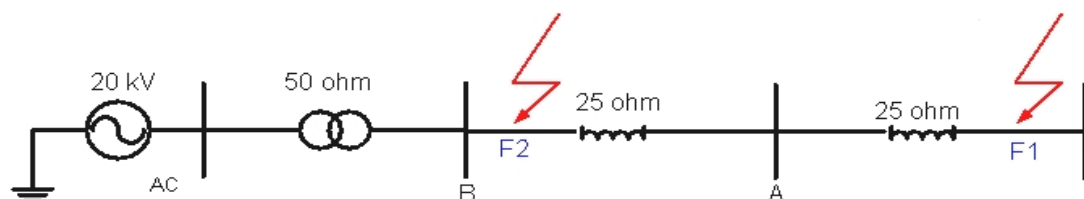


Gambar 2.21 Diagram garis tunggal dengan skema proteksi rele tingkatan waktu

Gambar di atas merupakan contoh sederhana dari sebuah sistem tenaga listrik. Proteksi terhadap arus lebih terdapat pada titik A, B, C. Masing-masing rele memiliki karakteristik definite-time. Jika terjadi Gangguan pada C pada umumnya pertama-tama akan dideteksi oleh Rele R3 dan dipisahkan oleh Pemutus Tenaga di titik C. Jika terjadi kegagalan operasi dari Rele atau peralatan pada titik C maka gangguan akan dipisahkan dengan beroperasinya rele pada titik B. Hal ini dapat diperoleh dengan mengatur waktu trip untuk masing-masing rele $R3 < R2 < R1$. Pada ujung sistem di atas biasanya di set *instantaneous* (seketika) dan secara bertahap $T1 < T2 < T3$ dan seterusnya. Kelemahan dari metode ini adalah setting rele yang terdekat dengan pembangkit diatur agar bekerja paling lama. Hal ini akan membahayakan karena jika terjadi gangguan dengan pembangkit maka gangguan yang sangat besar akan terjadi dalam waktu yang lama.

2.4.4.3 Koordinasi Rele Arus Lebih Dengan Diskriminasi Arus

Metode ini berdasarkan kepada fakta bahwa arus gangguan bervariasi pada setiap titik gangguan namun mengikuti pola bahwa semakin menuju hilir titik gangguan dari sumber pembangkit maka besar arusnya akan mengecil.



Gambar 2.22. Diagram garis tunggal dengan skema proteksi rele arus lebih tingkatan arus

Metode ini dilustrasikan oleh gambar di atas. Untuk gangguan pada F1 maka besarnya arus gangguan simetrisnya adalah sebesar :

$$I_{F1} = \frac{20000V}{\sqrt{3}x(50 + 25 + 25)}$$

$$I_{F1} = 115,5 \text{ A}$$

Sedangkan jika terjadi gangguan pada F2 maka besarnya arus gangguan :

$$I_{F2} = \frac{20000V}{\sqrt{3}x(50)}$$

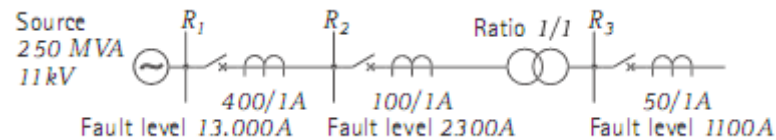
$$I_{F2} = 230.94 \text{ A}$$

Sehingga Rele pada bus A di set dengan arus pick-up sebesar 115.5 A sedangkan rele pada bus B di set dengan arus pick-up sebesar 230.94 A. Kelemahan dari metode ini adalah :

- i. Arus hubung singkat pada F1 dan F2 tidak terlalu jauh sehingga tidak dapat dibedakan dengan sangat teliti mengingat arus gangguan tersebut masih harus direplika menggunakan trafo arus.
- ii. Pada prakteknya, sumber pembangkitan selalu berubah-ubah seperti ketika pembangkitan maksimum dan pembangkitan minimum sehingga ketika pembangkitan minimum besarnya arus hubung singkat menjadi kecil dan tidak terdeteksi oleh rele arus lebih.

2.4.4.4 Koordinasi Rele Arus Lebih Dengan Diskriminasi Arus dan Waktu

Masing-masing metode yang telah dijelaskan di atas memiliki kelemahan yang mendasar. Hal ini terjadi karena penggunaan diskriminasi waktu dan arus digunakan secara terpisah. Masalah ini dapat diatasi jika diskriminasi arus dan waktu digunakan secara bersama-sama. Rele dengan karakteristik *inverse* memanfaatkan diskriminasi arus dan waktu.



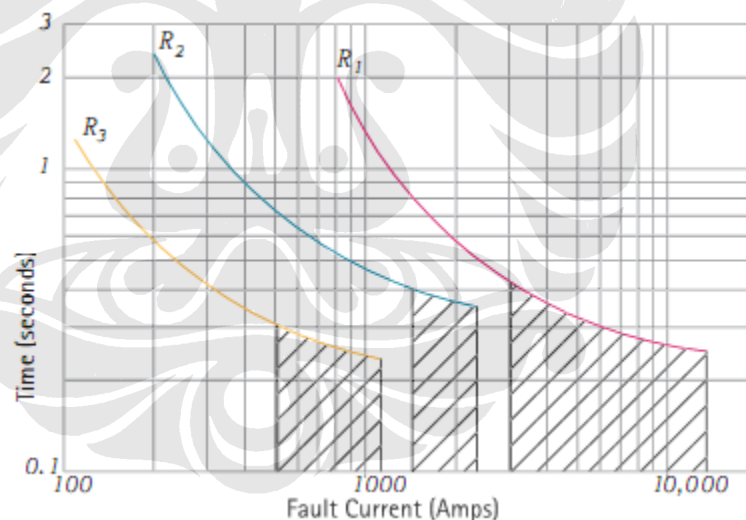
Gambar 2.23. Diagram garis tunggal untuk tingkat arus gangguan tertentu

Misalkan pada contoh gambar 2.23 pada seksi R1 besarnya arus gangguan adalah sebesar 13.000 A, pada seksi R2 besarnya arus gangguan adalah sebesar 23.000 A, sedangkan pada seksi R3 besarnya arus gangguan adalah sebesar 1.100 A. Maka jika digunakan rele dengan karakteristik *inverse*. Sehingga jika setting pada masing-masing seksi tersebut adalah :

R1 diset pada 500 A dengan TMS pada 0.125

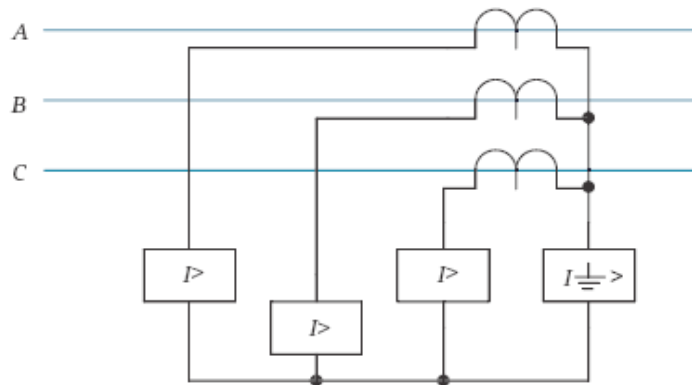
R2 diset pada 125 A dengan TMS pada 0.15

R3 diset pada 62.5 dengan TMS pada 0.10



Gambar 2.24. Kurva arus – waktu untuk masing-masing seksi

Dari gambar kurva di atas terlihat bahwa diskriminasi dengan arus maupun waktu terpenuhi. Pada saat arus gangguan kecil (jauh dari sumber) maka yang bekerja sebagai rele utama adalah R3 yang di back-up oleh R2 dan R3. Pada arus hubung singkat yang besarnya menengah maka R1 tidak lagi merasakan adanya gangguan dan yang bekerja sebagai pengamanan utama (ditengah-tengah antara sumber dan ujung saluran) adalah R2 di back-up oleh R3. Sedangkan pada



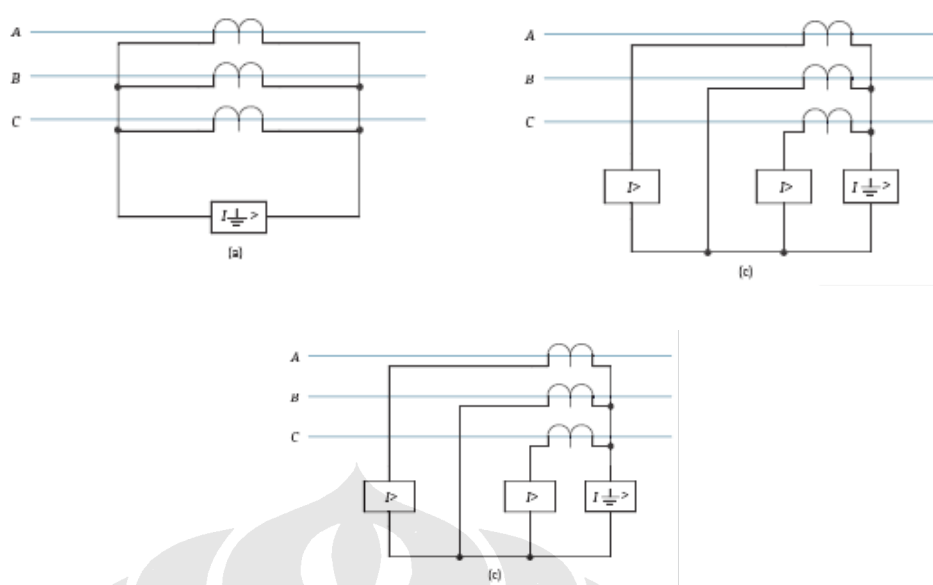
Gambar 2.26.. Suatu bentuk skema proteksi dengan diperlengkapi dengan sebuah rele urutan nol agar lebih sensitif terhadap gangguan satu fasa dan 2 fasa ke tanah

Skema proteksi pada gambar 2.25 dapat dipakai untuk proteksi semua jenis gangguan hubung singkat, tetapi untuk proteksi gangguan satu fasa ke tanah, sensitivitasnya kurang tinggi. Untuk gangguan tiga fasa yang terjadi pada titik K_1 semua rele bekerja. Apabila terjadi gangguan fasa-fasa di titik K_2 menyebabkan relay R_1 dan R_2 bekerja. Sedangkan gangguan dua fasa ke tanah dari fasa A dan B di titik K_4 arus gangguan mengalir melalui trafo arus dalam fasa A yang menyebabkan bekerjanya rele dari fasa ini.

Agar proteksi terhadap gangguan satu fasa ke tanah lebih baik dan lebih sensitif, maka perlu diberikan rele tanah R_0 , yang ditambahkan pada skema proteksi dari gambar 2.25, yang dipasang seperti pada gambar 2.26, untuk mengukur arus urutan nol dari gangguan tanah itu.

Tetapi bila khusus diinginkan proteksi terhadap gangguan satu fasa ke tanah saja, maka dapat digunakan filter arus urutan nol, dengan demikian rele akan mempunyai sensitivitas yang lebih tinggi terhadap gangguan itu.

Pada gangguan menuju tanah,. Jika terjadi pada sistem yang netralnya ditanahkan maka akan muncul arus yang menuju tanah yang disebut arus residu (*residual current*). Ada beberapa metode untuk mengukur besarnya arus residu (gambar 2.27)



Gambar 2.27 Metode untuk mengukur arus residu

Setting yang umum dari rele gangguan tanah adalah sebesar 30% - 40% dari arus beban maksimum atau arus minimum gangguan singkat ke tanah. Hal ini dikarenakan arus gangguan ke tanah mungkin sangat kecil dikarenakan impedansi yang tinggi pada tanah tempat konduktor jatuh sehingga arus terus-menerus mengalir dan tidak terdeteksi oleh rele jika rele diset dengan nilai yang tinggi seperti arus lebih. Pada rele gangguan tanah prosedur untuk melakukan koordinasi sama dengan prosedur yang ditempuh oleh rele arus lebih.

2.4.5 Prosedur Koordinasi Pengaman

Prosedur koordinasi pengaman berdasarkan standard IEEE no.242 tahun 2001. Koordinasi rele arus lebih adalah prosedur coba-coba berbagai macam peralatan proteksi di kurva arus-waktu yang digambarkan pada kertas logaritmis sehingga didapatkan koordinasi yang selektif. Proses penyetelan rele arus lebih adalah hasil kompromi kontradiktif antara proteksi peralatan maksimum dan kontinuitas pelayanan maksimum sehingga selektivitas koordinasi yang sempurna mungkin tidak dapat diraih di semua sistem. Berikut adalah langkah-langkah yang dibutuhkan untuk menggambar koordinasi peralatan pengaman di suatu sistem tenaga listrik :

1. Pilih rangkaian yang akan dikoordinasikan

Pekerjaan dimulai pada beban di rangkaian (pada level tegangan terendah) lalu balik sampai ke generator. Setelah itu tentukanlah cabang rangkaian dengan setting arus arus terbesar. Biasanya cabang rangkaian ini adalah cabang yang ada motor dengan kapasitas daya terpasang terbesar karena adanya arus inrush terbesar saat start motor. Bagaimanapun, cabang penyulang rangkaian harus dipilih jika ia mempunyai setting arus yang besar.

2. Pilih skala arus yang tepat

Anggap suatu sistem yang besar dengan lebih dari satu trafo tegangan. Kurva karakteristik peralatan terkecil digambarkan sejauh mungkin pada bagian kiri kertas logaritmis jadi kertas logaritmis tidak penuh pada bagian kanan kertas. Lebih dari 4 atau 5 kurva karakteristik arus dan waktu pada suatu kertas logaritmis akan membingungkan, biasanya kurva itu overlap. Semua karakteristik rele harus digambarkan pada skala arus yang sama walaupun mereka pada level tegangan yang berbeda. Sebagai contoh, trafo dengan daya kompleks 750 kVA dengan tegangan primer 4160 V dan tegangan sekunder 480 V. Asumsikan trafo ini dilengkapi dengan pemutus tenaga di bagian primer dan pemutus tenaga di bagian sekunder yang menyuplai daya ke beberapa penyulang. Pada sistem ini, arus beban penuh dari sisi sekunder trafo adalah $(750 \times 10^3)/(480 \times \sqrt{3}) = 902$ A. Ketika arus ini mengalir, maka di saat yang bersamaan arus yang mengalir pada sisi primer trafo nilainya merupakan rasio tegangan sekunder dengan tegangan primer trafo yang dikalikan dengan arus beban penuh pada sisi sekunder trafo. Dimana $(480/4160) \times 902 = 104$ A. Jika arus beban penuh di definisikan pada 1 pu sehingga arus beban penuh 902 A pada tegangan 480 V sama dengan arus beban penuh 104 A pada tegangan 4160 V. Sehingga apabila digambarkan pada kertas logaritmis, setting arus pick up baik pada sisi tegangan primer maupun sekunder memiliki nilai yang sama dan juga gambar kurva karakteristik yang sama.

3. Gambarkan sebuah diagram satu garis yang kecil yang akan digambarkan diatas kurva yang akan digunakan sebagai referensi untuk kurva karakteristik yang akan di gambar dengan peralatan pada diagram

4. Pada kertas logaritmis, indikasikan point-point yang penting berikut :
 - a. Arus hubung singkat maksimum dan minimum yang mungkin melewati rele
 - b. Arus beban penuh trafo dan arus aliran daya yang signifikan
 - c. Kurva kerusakan I^2t untuk trafo, kabel, motor dan peralatan yang lainnya
 - d. Arus inrush trafo
 - e. Kurva start motor mengindikasikan arus rotor terkunci, arus beban penuh dan waktu start motor
5. Mulai menggambar kurva karakteristik peralatan pengaman dimulai pada level tegangan terendah dan beban terbesar. Kadang kala skala arus yang spesifik dipilih. Menghitung pengali yang tepat untuk beberapa level tegangan yang digunakan pada studi. Kurva karakteristik untuk peralatan pengaman dan kurva kerusakan akibat gangguan hubung singkat untuk peralatan bisa ditempatkan pada permukaan halus yang terang seperti kertas putih. Kurva untuk semua jenis setting dan rating peralatan yang telah dipelajari mungkin diuji atau diulang kembali.

Koordinasi peralatan proteksi yang selektif harus berdasarkan limit karakteristik peralatan yang digunakan secara seri, batas dari beberapa peralatan proteksi ditentukan oleh arus beban penuh, arus hubung singkat, arus start motor, kurva kerusakan thermal dan beberapa standar yang dapat dipakai atau persyaratan NEC.

2.4.6 Pengaman Motor Induksi

Motor listrik merupakan suatu peralatan yang luas sekali pemakaiannya sehingga pengaman dari motor listrik tergantung dari tipe motor listrik dan beban apa yang diberikan padanya. Banyak ciri khas dari motor listrik, sehingga ketika ingin merancang pengaman banyak sekali parameter yang harus diketahui. Sebagai contoh :

- Arus start, arus stall dan waktu percepatan motor harus diketahui ketika mensetting pengaman beban lebih (overload)

- Ketahanan thermal mesin ketika beban seimbang atau tidak seimbang harus di definisikan secara jelas

Pengaman motor ditentukan oleh 2 kategori yaitu kondisi internal dan eksternal. Yang membentuk kategori ini adalah ketidakseimbangan supply tegangan, tegangan kurang, satu fasa terbuka dan urutan fasa terbalik saat start. Kategori yang lain adalah kegagalan bearing, hubung singkat antar lilitan dan yang sering terjadi adalah gangguan tanah dan kelebihan beban. Walaupun pengaman motor tergantung dari ukuran motor dan beban dari motor tapi semua motor harus ada pengaman beban lebih (overload) dan ketidakseimbangan tegangan dan ini biasanya ada pada 1 rele.

2.4.6.1 Pengaman beban lebih (overload)

Kurva karakteristik motor tidak mungkin menggambarkan dengan baik semua type dan rating motor karena luasnya penggunaan dan desain motor. Sebagai contoh :

- a. Motor yang digunakan untuk beban yang berubah-ubah dimana jika motor rusak maka proses yang ada akan berhenti. Pada kasus ini mungkin secara bijak kita akan mensetting rele dengan setting arus yang tinggi agar motor bisa berputar selama mungkin agar proses bisa terus berjalan
- b. Motor yang digunakan untuk beban yang tetap. Pada kasus ini kita bisa mensetting peralatan pengaman jika terjadi gangguan bisa trip lebih cepat

Secara umum, tidak semua informasi yang dibutuhkan untuk menset rele kelebihan beban secara akurat tersedia pada masing-masing mesin oleh karena itu hanya mungkin mendesain pengaman yang mendekati karakteristik panas dari motor. Selain hal tersebut kita juga harus yakin bahwa rele menyediakan waktu operasi yang baik untuk memungkinkan motor start, hal ini dapat dilakukan dengan menset waktu kerja rele.

2.4.6.2 Pengaman rotor terkunci

Pengaman ini mempunyai fungsi untuk melindungi motor dari keadaan rotor terkunci atau tidak bisa start. Desain dari motor menunjukkan bahwa arus start dari motor adalah 6 kali arus beban penuh. Nilai arus ini akan cepat turun

menuju nilai kondisi tunak (steady state). Setting dari pengaman rotor terkunci berdasarkan nilai arus dan waktu start motor juga waktu maksimal yang bisa ditanggung motor menanggung arus start ini. Sebagai pengaman rotor terkunci, peralatan ini merupakan pengaman cadangan sedangkan pengaman utama adalah rele arus lebih dengan tunda waktu.

2.4.6.3 Pengaman arus lebih

IEEE std C37.96-2000 tentang pengaman motor AC memberikan pedoman untuk setting rele arus lebih waktu terbalik yaitu :

1. Untuk aplikasi dimana rele arus lebih waktu terbalik dikoordinasikan dengan rele beban lebih maka arus pickup dapat diset diantara 150% sampai 175% arus beban
2. Motor yang digunakan untuk kondisi darurat seperti pompa pemadam kebakaran, keamanan ancaman nuklir atau proses kimia biasanya mempunyai sebuah rele arus lebih waktu terbalik yang ditambahkan dengan rele seketika (instantenous). Rele arus lebih waktu terbalik bisa diset pada 115% arus beban penuh dan rele seketika pada 125% sampai 200% arus beban penuh
3. Ketika digunakan untuk pengaman rotor terkunci yang berkepanjangan maka margin 2 detik digunakan untuk motor dengan waktu start diantara 5-10 detik dan margin 5 detik untuk motor dengan waktu start 40-50 detik
4. Ketika waktu tunda tidak bisa diset untuk mendapatkan margin yang diinginkan diatas arus start dan masih mengamankan motor maka kita harus mengawasi rele arus lebih dengan peralatan pengaman lainnya. Pada aplikasi ini pickup rele arus lebih dapat diset pada 175%-250% arus beban penuh motor

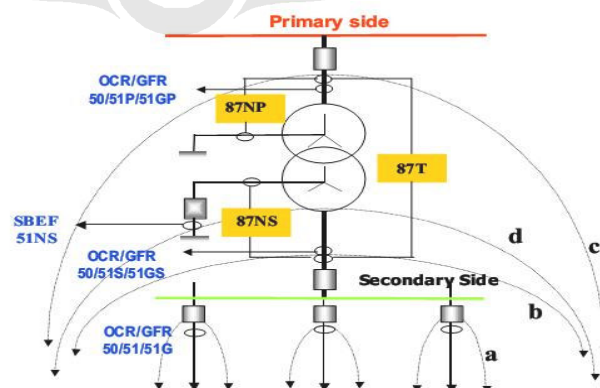
2.4.7 Pengaman Trafo

Trafo merupakan salah satu komponen terpenting dalam sistem tenaga listrik dan juga merupakan komponen termahal di sebuah gardu induk yang menjadikan alasan kenapa trafo dibutuhkan sebuah sistem proteksi untuk menjaga kontinuitas pelayanannya. Gangguan pada sebuah trafo tenaga berkapasitas daya

terpasang terbesar dapat menyebabkan pemadaman yang besar pula. Jika gangguan ini tidak diisolir dengan cepat, akan terjadi kerusakan yang parah yang juga mengganggu kestabilan sistem secara keseluruhan. Seperti halnya pengaman peralatan sistem tenaga listrik yang lain, pemilihan proteksi trafo juga mempertimbangkan aspek ekonomi. Pengaman trafo-trafo kecil (beberapa ratus kVA) cukup dengan pengaman lebur (fuse), tetapi trafo-trafo besar (beberapa ratus MVA) harus komprehensif seperti terlihat pada tabel. Proteksi pun terbagi menjadi 2 berdasarkan prioritas yaitu utama (primary) dan cadangan (back up) seperti terlihat pada tabel. Rele arus lebih pada sisi sekunder trafo distribusi merupakan cadangan dari rele arus lebih yang terletak pada penyulang beban seperti juga terlihat pada gambar daerah kerja proteksi trafo berikut.

Tabel 2.3 Jenis gangguan dengan pembagian fungsi pengaman

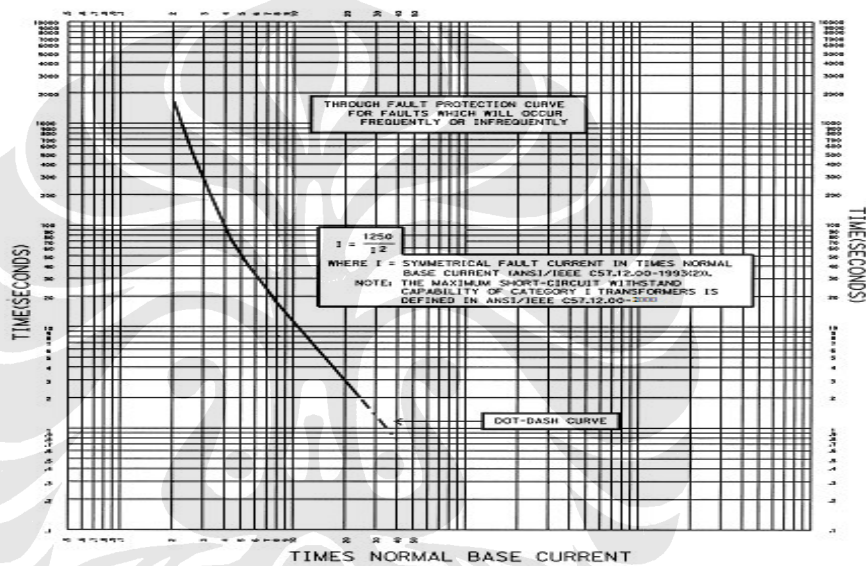
No	Jenis Gangguan	Proteksi		Akibat
		Utama	Back up	
1	Hubung singkat di dalam daerah pengamanan trafo	Diferensial REF Bucholz Tangki Tanah Tekanan lebih	OCR GFR	Kerusakan pada isolasi, kumparan atau inti Tangki mengembang
2	Hubung singkat di luar daerah pengamanan trafo	OCR GFR SBEF	OCR GFR	Kerusakan pada isolasi atau kumparan atau NGR
3	Beban lebih	Relai suhu	OCR	Kerusakan isolasi
4	Gangguan sistem pendingin	Relai suhu	-	Kerusakan isolasi
5	Gangguan pada OLTC	Jansen Tekanan lebih	-	Kerusakan OLTC
6	Tegangan lebih	OVR LA	-	Kerusakan isolasi



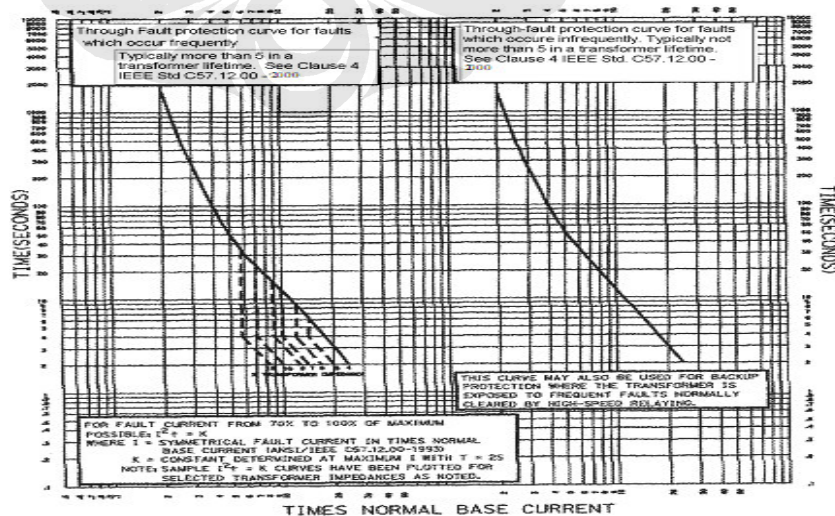
Gambar 2.28 Daerah pengaman trafo

2.4.7.1 Pengaman Arus Lebih

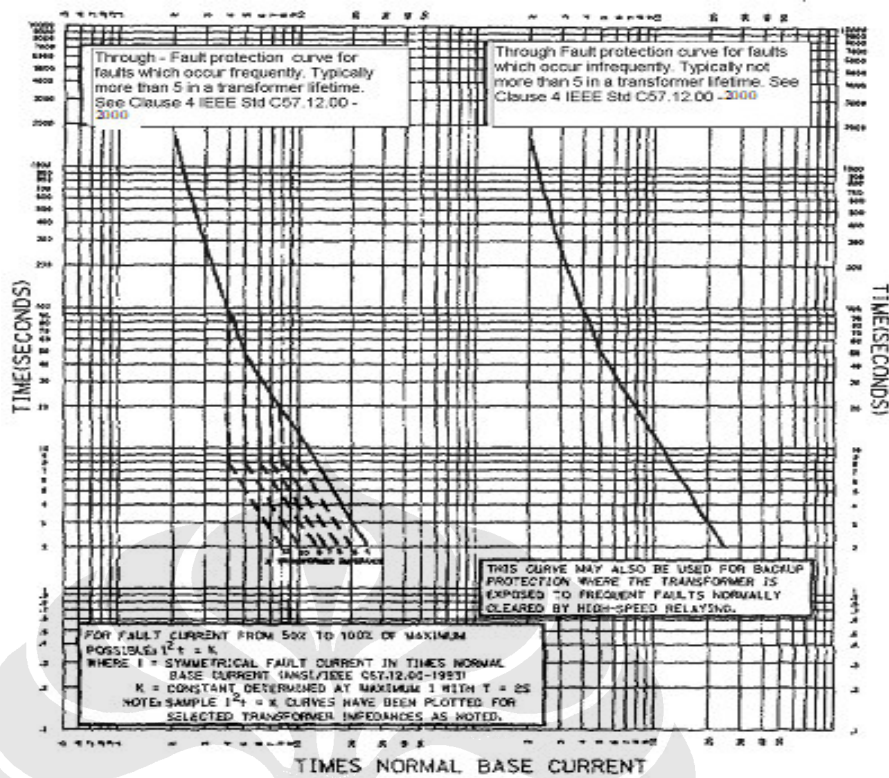
Pengaman arus lebih pada trafo umumnya digunakan pada saat gangguan hubung singkat fasa dan tanah. Pengaman arus lebih digunakan sebagai pengaman utama apabila rele differensial tidak bekerja (dalam hal ini khusus trafo kategori 1&2) dan juga sebagai pengaman cadangan apabila rele differensial bekerja (dalam hal ini khusus trafo kategori 3&4). Zona pengaman arus lebih dalam satu sistem tenaga listrik lebih luas daripada daerah kerja pengaman trafo sehingga proteksi arus lebih perlu dikoordinasikan satu sama lain.



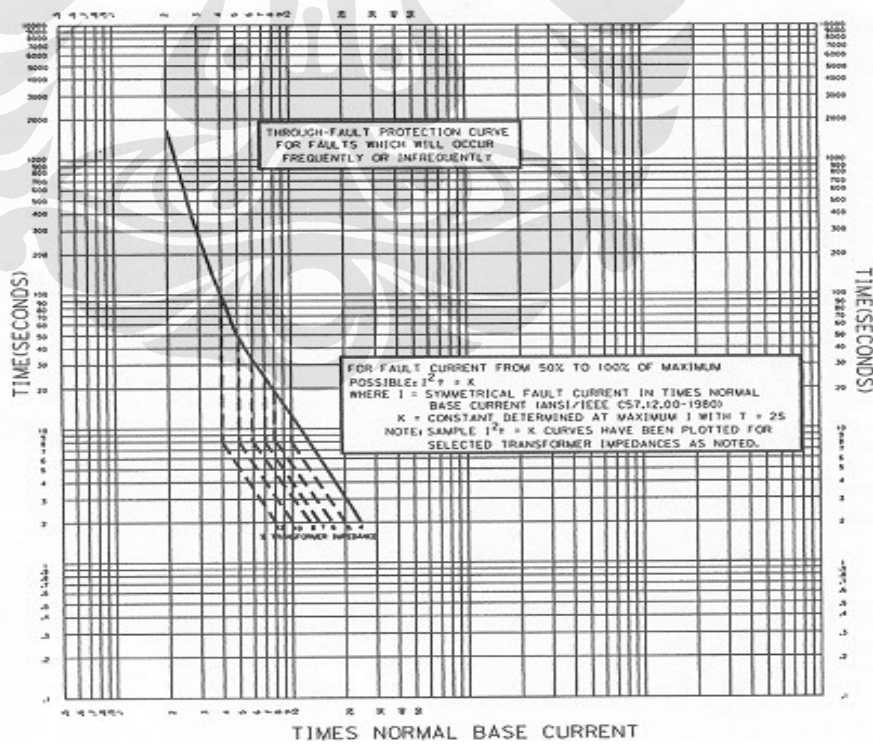
Gambar 2.29 Trafo kategori 1



Gambar 2.30 Trafo kategori 2



Gambar 2.31 Trafo kategori 3



Gambar 2.32 Trafo kategori 4

Pada dasarnya pengaman arus lebih pada trafo bertujuan membatasi arus gangguan sampai di bawah kapabilitas ketahanan gangguan yang melewati trafo. Gangguan hubung singkat dapat dibagi menjadi berdasarkan frekuensi gangguan yaitu gangguan yang sering (frequent) dan jarang (infrequent). Kita dapat melihat zona insiden yang membagi gangguan berdasarkan frequent dan infrequent yang terlihat pada gambar .Kapabilitas ketahanan gangguan pada trafo didefinisikan pada IEEE standar C57.91 – 1995 yang terlihat pada table berikut.

Tabel 2.4 Kapabilitas ketahanan gangguan hubung singkat pada trafo

Category	Transformer Rating – KVA		Use Curve	Frequent Faults	^b Dotted Curves Apply From
	1 Phase	3 Phase			
I	5 – 500	15 – 500	a	-	$t = \frac{25 - 501}{60 I^2} = \frac{1250}{I^2}$ at 60 Hz, where
II	501 – 1,667	501- 5,000	a or a+b	10	70% – 100% of max possible fault where $I^2 t = K$, K is determined at max I; where $t = 2$
III	1668 – 10,000	5,001 – 30,000	a or a+c	5	50% – 100% of max possible fault where $I^2 t = K$, K is determined at max I; where $t = 2$
IV	> 10,000	> 30,000	a+c	-	As Above

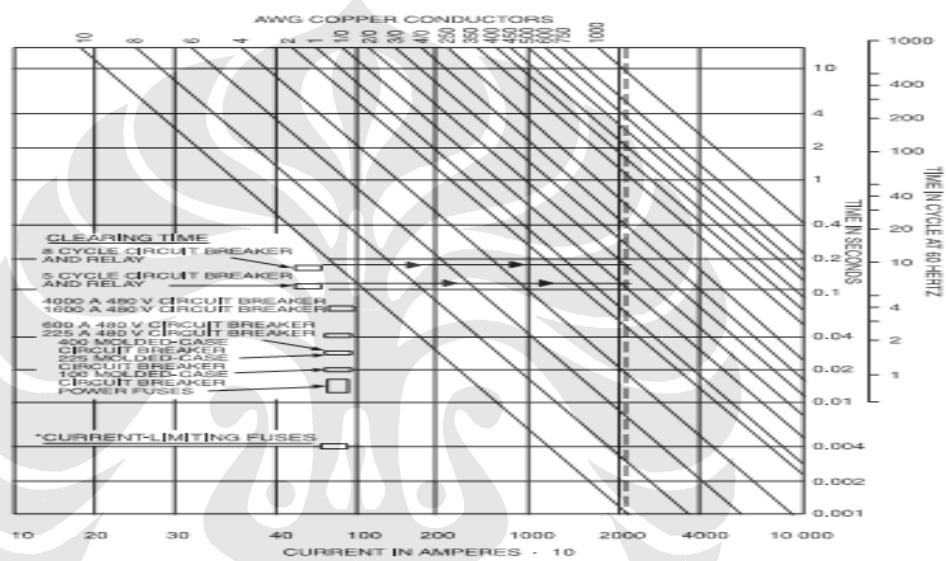
Prosedur koordinasi kurva pengaman gangguan trafo dengan rele arus lebih yang berada di luar zona proteksi trafo dengan menentukan rating ketahanan trafo terlebih dahulu adalah sebagai berikut :

1. Pilih kategori trafo berdasarkan kapasitas daya terpasang
2. Jika yang terpilih adalah trafo kategori 2 dan 3 maka dipilih lagi apakah termasuk sering (frequent) atau jarang (infrequent)
3. Pilih kurva untuk kategori trafo dengan pilihan sering (frequent) atau jarang (infrequent)
4. Plot kembali dengan menggunakan setting arus primer ataupun sekunder trafo, arus sekunder digunakan apabila berkoordinasi dengan proteksi di sisi hilir
5. Pilih parameter fuse atau rele seperti tap, time dial setting sehingga didapat koordinasi yang selektif dengan kurva ketahanan gangguan trafo

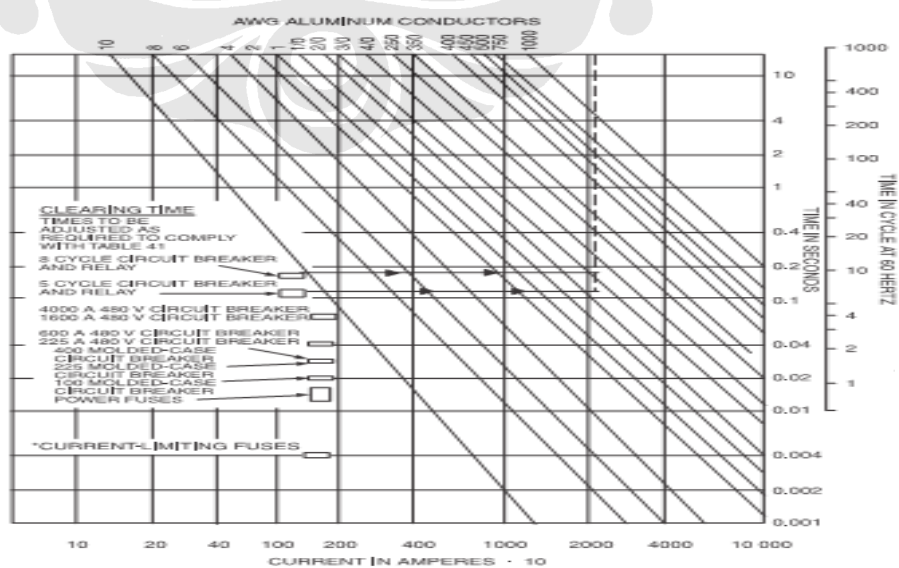
2.4.8 Pengaman Kabel

2.4.8.1 Pengaman Arus Hubung Singkat

Rele pengaman harus memenuhi pengaman maksimum dari bahaya kerusakan akibat arus gangguan hubung singkat terhadap kabel sehingga kurva arus-waktu di kertas logaritmis dari rele arus lebih cenderung di kiri bawah dari kurva arus hubung singkat maksimum baik untuk isolasi konduktor tembaga maupun aluminium seperti terlihat pada gambar berikut.



Gambar 2.33 arus hubung singkat maksimum untuk isolasi tembaga



Gambar 2.34 arus hubung singkat maksimum untuk isolasi aluminium

2.4.8.2 Prosedur Koordinasi

Rele pengaman seharusnya dikoordinasikan untuk memberikan cukup pengaman terhadap kabel dari arus hubung singkat. Proses ini mudah dilakukan dengan memplot kombinasi kurva arus-waktu dari rele dan kabel pada kertas logaritmis. Kurva arus-waktu dari rele pengaman seharusnya di bawah dan cenderung ke kiri dari kurva arus-waktu hubung singkat maksimum dari pengaman kabel. Langkah-langkah untuk mencapai itu semua adalah sebagai berikut :

1. Mencari nilai ekivalen arus gangguan lalu total waktu untuk membersihkan gangguan (total fault-clearing time)

Untuk mendapatkan waktu terjadinya gangguan hubung singkat dapat diketahui dari persamaan berikut untuk masing-masing jenis kabel:

- Tembaga

$$\left(\frac{I}{A}\right)^2 t = 0.0297 \log \left(\frac{T_2 + 234}{T_1 + 234} \right) \quad (2.22)$$

- Alumunium

$$\left(\frac{I}{A}\right)^2 t = 0.0125 \log \left(\frac{T_2 + 228}{T_1 + 228} \right) \quad (2.23)$$

Dimana :

A = ukuran konduktor

I = arus hubung singkat

t = waktu dari hubung singkat

T₁ = temperature operasi

T₂ = temperature pada saat arus hubung singkat maksimum

2. Mencari kapabilitas hubung singkat dari kabel
3. Gambar kurva batas thermal hubung singkat

BAB III

SKEMA DAN SIMULASI KOORDINASI RELE ARUS LEBIH DAN RELE GANGGUAN TANAH SEBAGAI PENGAMAN MOTOR INDUKSI, KABEL DAN TRAFU PADA PLANT XI DI PT INDOCEMENT

3.1 Umum

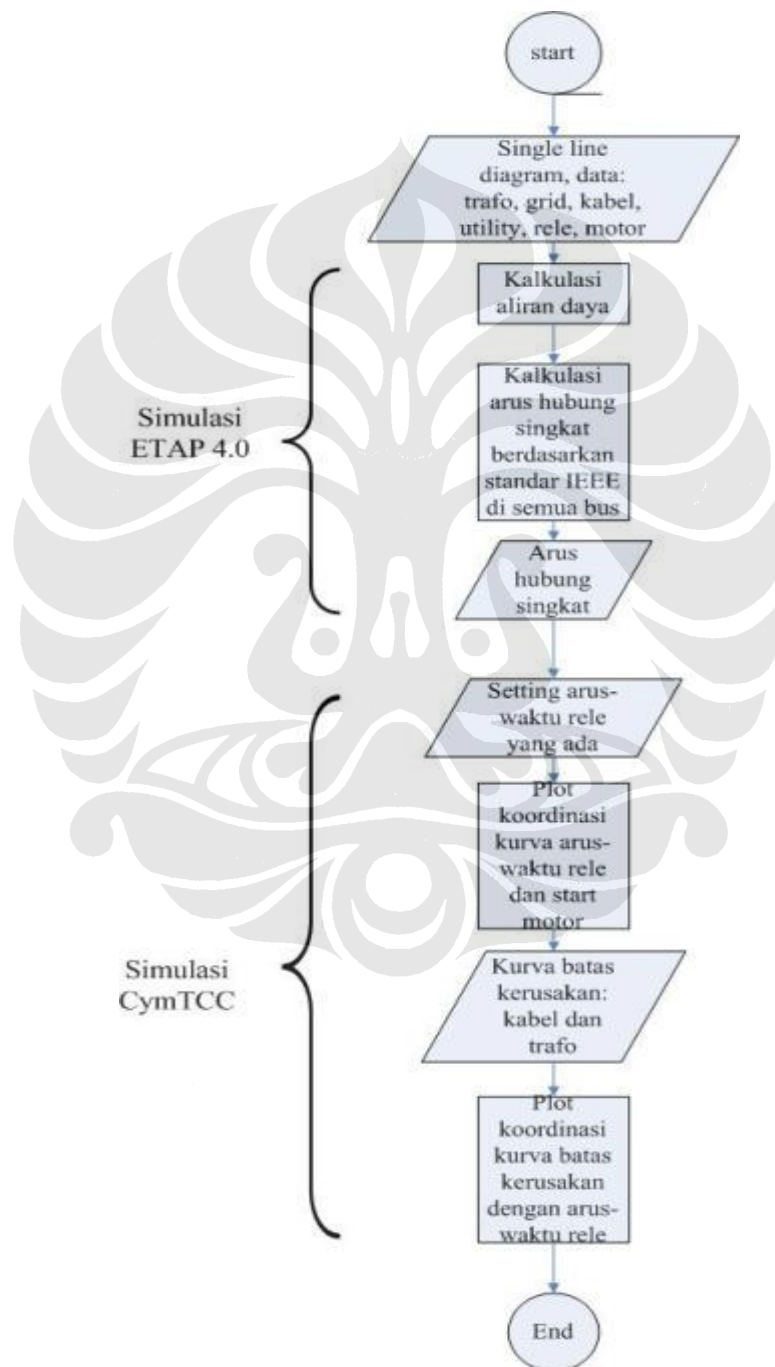
Dalam simulasi koordinasi rele arus lebih dan rele gangguan tanah ini digunakan acuan dalam standar ANSI/IEEE. Perancangan sistem proteksi dilakukan pada sisi 33 kV ke arah beban. Untuk memudahkan perhitungan digunakan sistem satuan per unit dengan base MVA sebesar 30 MVA dan base tegangan yang digunakan sesuai dengan tegangannya masing-masing. Perhitungan dilakukan dengan :

- 1) Perhitungan aliran daya yang masuk dan keluar dari satu bus penyulang (feeder bus) untuk mengetahui arus beban maksimum
- 2) Perhitungan arus hubung singkat maksimum untuk setiap lokasi gangguan yaitu :
 - a) Gangguan pada sisi tegangan 33 kV
 - b) Gangguan pada sisi 6.6 kV
- 3) Perhitungan setting arus dan waktu kerja rele dari kondisi arus pembangkitan maksimum sampai minimum dan juga penentuan jenis karakteristik rele yang digunakan
- 4) Gambar kurva karakteristik rele arus lebih dan rele gangguan tanah untuk perancangan koordinasinya dengan kurva start motor, kurva batas kerusakan kabel dan trafo

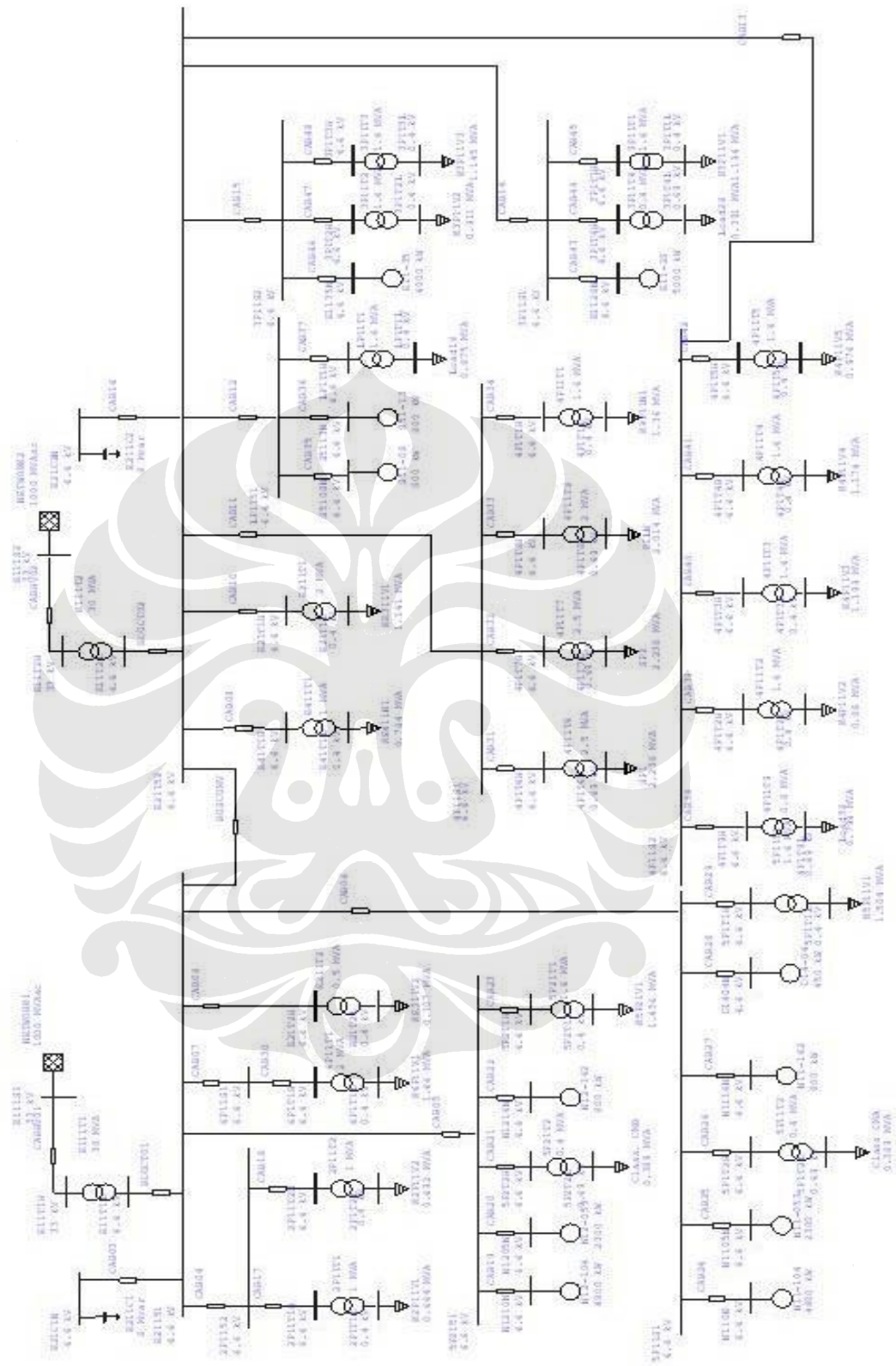
Algoritma yang merepresentasikan perhitungan seperti diatas dan Diagram satu garis yang digunakan untuk simulasi adalah dapat dilihat masing-masing seperti pada gambar 3.1 dan 3.2.

3.2 Perhitungan arus hubung singkat maksimum

Perhitungan arus hubung singkat ini dilakukan dengan perhitungan impedansi tiap-tiap elemen listrik. Impedansi yang dihitung merupakan impedansi dari sumber arus hubung singkat ke titik gangguan. Hal - hal yang harus diperhatikan dalam perhitungan arus hubung singkat adalah :



Gambar 3.1 Diagram alir proses koordinasi rele



Gambar 3.2 Diagram satu garis PT Indocement

- a. Sumber dari hubung singkat yaitu generator, motor sinkron dan motor induksi. Trafo bukan merupakan sumber dari arus hubung singkat ketika terjadi gangguan, trafo hanya menyalurkan arus yang melewatinya apabila bebannya motor. Pada simulasi ini yang merupakan sumber arus hubung singkat ketika terjadi gangguan adalah jala-jala sistem tenaga listrik dan kumpulan motor induksi pada masing-masing cabang.
- b. Untuk tegangan sistem di atas 6 kV, maka impedansi dari bus, trafo arus, pemutus tenaga dapat diabaikan

Langkah-langkah perhitungan arus hubung singkat sebagai berikut :

1. Penentuan spesifikasi peralatan yang ada
2. Penentuan impedansi masing-masing peralatan dalam satuan per unit
3. Perhitungan impedansi hubung singkat dari sumber-sumber yang mengontribusi arus hubung singkat
4. Penentuan titik gangguan hubung singkat dengan tempat yang spesifik terhadap kemungkinan terjadinya hubung singkat. Penentuan titik gangguan ini menentukan letak alat proteksi yang akan diterapkan dan kapasitasnya
5. Hasil perhitungan arus Gangguan hubung singkat yang terjadi selama 10 milidetik (0.5 cycle) digunakan untuk menganalisa unjuk kerja rele pengaman seketika (instantenous) sedangkan arus gangguan hubung singkat yang terjadi selama 600 milidetik (30 cycle) digunakan untuk menganalisa unjuk kerja rele pengaman arus lebih waktu terbalik (inverse)

Tabel 3.1 Hasil perhitungan arus hubung singkat dari sumber jala-jala listrik 1 dengan waktu gangguan 0.5 cycle

Jala-Jala Listrik 1					
Nama Bus	Tegangan (kV)	Macam Gangguan (dalam kA (rms))			
		3 Fasa	L - G	L - L	L - L - G
2P11T1H	6.6	17.255	4.960	14.951	15.334
2P11T2H	6.6	64.178	21.296	55.736	56.383

2P1152	6.6	71.633	24.596	62.238	63.332
5P1T1H	6.6	100.541	40.920	87.668	93.113
5P1T2H	6.6	84.752	34.486	73.784	76.240
5P2T1H	6.6	96.569	37.999	84.174	88.878
5P2T2H	6.6	95.491	37.337	83.227	88.035
5P11S1	6.6	117.456	57.695	102.556	112.715
5P2151	6.6	117.659	58.123	102.728	112.988
6P1T1H	6.6	28.976	8.807	25.118	25.717
6P11S1	6.6	30.825	9.429	26.723	27.343
D1404N	6.6	19.556	7.580	16.954	17.863
E21T2H	6.6	128.546	75.646	112.097	123.153
E21151	6.6	165.365	228.711	144.567	237.043
E11T1H	33	32.916	14.229	28.706	32.287
N110N	6.6	100.746	40.247	87.904	93.786
N1105N	6.6	83.450	28.683	72.722	76.194
N1116N	6.6	53.716	20.642	46.672	47.659
N1205N	6.6	81.633	27.685	71.129	74.409
N1210N	6.6	103.181	42.433	90.033	96.401
N1216N	6.6	79.028	27.217	68.807	71.478

Tabel 3.2 Hasil perhitungan arus hubung singkat dari sumber jala-jala listrik 2 dengan waktu gangguan 0.5 cycle

Jala-Jala Listrik 2					
Nama Bus	Tegangan (kV)	Macam Gangguan (dalam kA (rms))			
		3 Fasa	L - G	L - L	L - L - G
3P1T1H	6.6	96.233	40.629	83.839	88.016
3P1T2H	6.6	111.872	52.802	97.528	105.461
3P1T3H	6.6	104.651	48.608	91.169	96.429
3P1T4H	6.6	92.382	40.123	80.448	83.854
3P11S1	6.6	122.918	66.526	107.325	119.708
3P11S2	6.6	134.910	88.903	117.810	136.511
4P1T2H	6.6	80.578	30.194	70.052	72.610
4P1T3H	6.6	79.809	29.800	69.380	71.840
4P1T4H	6.6	84.179	32.106	73.202	76.246
4P1T5H	6.6	83.359	31.660	72.484	75.413
4P1T9H	6.6	76.719	29.800	66.672	68.633
4P1T6H	6.6	115.170	56.651	100.366	109.726
4P1T7H	6.6	114.949	56.157	100.171	109.493
4P1T8H	6.6	105.770	46.360	92.111	98.536
4P1T1H	6.6	106.696	47.797	92.919	99.062

4P11S1	6.6	135.957	92.673	118.641	138.506
4P11S2	6.6	106.785	47.924	93.016	100.916
E21T1H	6.6	112.122	53.689	97.665	103.631
E41T1H	6.6	123.248	67.407	107.438	116.462
E1128N	6.6	107.740	47.585	94.043	101.936
E1135N	6.6	119.896	60.241	104.640	114.492
E21152	6.6	165.351	228.694	144.556	237.026
E11T2H	33	32.919	14.250	28.709	32.296
LP1T1H	6.6	83.137	29.601	72.337	75.763
LP1151	6.6	99.328	40.880	86.526	92.919
S5108N	6.6	41.557	15.175	36.070	36.945
S5113N	6.6	39.671	14.513	34.429	35.339

Tabel 3.3 Hasil perhitungan arus hubung singkat dari sumber jala-jala listrik 1 dengan waktu gangguan 30 cycle

Jala-Jala Listrik 1					
Nama Bus	Tegangan (kV)	Macam Gangguan (dalam kA (rms))			
		3 Fasa	L - G	L - L	L - L - G
2P11T1H	6.6	17.140	4.952	14.844	15.215
2P11T2H	6.6	62.174	21.138	53.844	54.662
2P1152	6.6	69.073	24.384	59.819	61.119
5P1T1H	6.6	93.329	40.088	80.826	86.466
5P1T2H	6.6	79.816	33.907	69.123	71.895
5P2T1H	6.6	90.028	37.296	77.967	82.875
5P2T2H	6.6	89.096	36.666	77.160	82.167
5P11S1	6.6	107.669	56.028	93.244	103.522
5P2151	6.6	107.988	56.462	93.520	103.909
6P1T1H	6.6	28.636	8.780	24.799	25.365
6P11S1	6.6	30.436	9.399	26.359	26.941
D1404N	6.6	19.220	7.546	16.645	17.556
E21T2H	6.6	119.552	73.490	103.535	115.160
E21151	6.6	150.410	207.863	130.259	218.618
E11T1H	33	30.651	14.020	26.544	30.140
N110N	6.6	92.915	39.355	80.467	86.451
N1105N	6.6	77.932	28.222	67.491	71.064
N1116N	6.6	51.683	20.414	44.759	45.664
N1205N	6.6	76.385	27.257	66.151	69.529
N1210N	6.6	95.194	41.473	82.440	88.921
N1216N	6.6	74.479	26.841	64.501	67.326

Tabel 3.4 Hasil perhitungan arus hubung singkat dari sumber jala-jala listrik 2 dengan waktu gangguan 30 cycle

Jala-Jala Listrik 2					
Nama Bus	Tegangan (kV)	Macam Gangguan (dalam kA (rms))			
		3 Fasa	L - G	L - L	L - L - G
3P1T1H	6.6	90.645	39.943	78.501	83.010
3P1T2H	6.6	104.592	51.722	90.580	98.844
3P1T3H	6.6	98.446	47.691	85.257	90.949
3P1T4H	6.6	87.352	39.462	75.649	79.439
3P11S1	6.6	113.548	64.634	98.335	110.933
3P11S2	6.6	124.249	85.703	107.603	126.538
4P1T2H	6.6	77.226	29.881	66.880	69.682
4P1T3H	6.6	76.530	29.495	66.277	68.979
4P1T4H	6.6	80.476	31.751	69.694	72.993
4P1T5H	6.6	79.737	31.316	69.054	72.235
4P1T9H	6.6	73.796	29.500	63.910	66.138
4P1T6H	6.6	107.868	55.498	93.416	103.088
4P1T7H	6.6	107.682	55.032	93.256	102.891
4P1T8H	6.6	99.690	45.601	86.334	93.075
4P1T1H	6.6	100.537	46.979	87.068	93.563
4P11S1	6.6	125.749	89.455	108.902	129.063
4P11S2	6.6	100.483	47.114	87.020	95.165
E21T1H	6.6	105.391	52.633	91.271	97.706
E41T1H	6.6	115.022	65.713	99.612	109.177
E1128N	6.6	100.021	46.548	86.621	94.679
E1135N	6.6	111.145	58.712	96.254	106.372
E21152	6.6	150.410	207.863	130.259	218.619
E11T2H	33	30.656	14.040	26.549	30.150
LP1T1H	6.6	79.015	29.258	68.429	72.033
LP1151	6.6	93.353	40.220	80.846	87.427
S5108N	6.6	40.508	15.069	35.081	35.923
S5113N	6.6	38.718	14.416	33.530	34.409

Pada tabel 3.1 dan 3.2 di atas bus penyulang motor induksi seperti N110N, N1105N, N1116N, N1205N, N1210N, N1216N, D1404N, E1128N, E1135N, S5108N, dan S5113N menghasilkan arus hubung singkat yang bervariasi tergantung dari kapasitas daya terpasang (bus penyulang menghasilkan arus

hubung singkat yang besar apabila motor induksi memiliki daya yang besar pula) tetapi nilainya lebih besar daripada arus hubung singkat yang terjadi dengan waktu gangguan 600 milidetik (30 cycle) (seperti terlihat pada tabel 3.3 dan 3.4) karena pengaruh adanya kontribusi arus motor induksi saat terjadinya gangguan hubung singkat hanya terjadi pada periode subperalihan hubung singkat generator atau 10 milidetik (0.5 cycle). Sedangkan bus penyulang lain yang merupakan bus penyulang trafo dan bus penyulang cabang menghasilkan arus hubung singkat yang bervariasi pula tergantung kapasitas beban yang terhubung.

3.3 Perhitungan setting arus dan waktu kerja rele arus lebih dan rele gangguan tanah

Dalam perhitungan setting arus dan waktu kerja rele ini haruslah mendapatkan sistem koordinasi pengaman yang selektif. Hal ini berarti bahwa hanya rele yang paling dekat dengan gangguan yang bekerja. Apabila rele yang terdekat akibat sesuatu hal tidak bekerja maka rele cadangan harus bekerja. Hal ini dimungkinkan dengan menerapkan waktu interval masing-masing rele.

Acuan dalam perhitungan pengaturan rele adalah :

1. Penentuan karakteristik rele dimulai dari bagian yang paling dekat dengan beban (bagian hilir). Rele yang terletak pada bagian ini harus mempunyai penyetelan waktu yang paling singkat
2. Pemilihan karakteristik rele didasarkan pada letak rele tersebut, untuk rele yang berada paling hilir harus mempunyai karakteristik yang cepat dalam merespon adanya arus gangguan hubung singkat. Untuk sistem radial biasanya digunakan rele dengan karakteristik extremely inverse agar ketika ada gangguan maka waktu rele bekerja merupakan kuadrat arusnya sehingga bagian yang terganggu dapat secepatnya dipisahkan. Selanjutnya pemilihan kurva karakteristik tergantung dari hasil perhitungan dan koordinasi relenya.
3. Pemilihan faktor pengali waktu pada kurva rele (Time Multiplier Setting/TMS) dengan memilih TMS yang terkecil untuk bagian yang

paling hilir, sedangkan untuk daerah selanjutnya tergantung dari perhitungan dan koordinasi rele.

4. Waktu interval antar rele digunakan 0.4 dengan anggapan bahwa waktu overshoot, pembukaan pemutus tenaga, faktor kesalahan dan faktor keamanan telah diperhitungkan waktunya.
5. Sistem proteksi harus tetap stabil pada kondisi operasi normal terberat yang timbul. Kondisi operasi normal yang terberat yang diperhitungkan dalam analisa unjuk kerja sistem proteksi adalah pengasutan (start) motor induksi. Dalam studi ini nilai arus start diklasifikasikan dalam start tegangan penuh dan start dengan tegangan dikurangi. Dimana start tegangan penuh = $7 \times I_{n\text{motor}}$ dan start tegangan dikurangi = $4.5 \times I_{n\text{motor}}$. Untuk memastikan bahwa sistem proteksi akan tetap stabil pada operasi start motor, maka untuk analisa unjuk kerja dipilih arus start dengan tegangan penuh. Setting arus rele arus lebih harus lebih besar daripada arus start dengan tegangan penuh. Selisih waktu kerja rele pada waktu start dengan waktu start motor adalah 2 detik untuk motor dengan waktu start 5-10 detik dan 5 detik untuk motor dengan waktu start 40-50 detik.
6. Di mana setting pada rele arus lebih pada masing-masing penyulang adalah sebesar :

$$1.3I_{load} < I_{set} < 0.8I_{short\ min} \quad (3.1)$$

$I_{short\ min}$ adalah arus gangguan minimum pada gangguan fasa.

7. Persamaan kurva-kurva karakteristik rele arus lebih untuk mendapatkan waktu kerja rele menurut standar ANSI/IEEE adalah :

$$t = \left(\frac{A}{M^p - 1} + B \right) \cdot TMS \quad (3.2)$$

M adalah perkalian dari arus primer terhadap setting arus (MTVC – Multiple of Tap Value current). Sedangkan untuk konstanta A, B dan p untuk masing-masing karakteristik di atas dapat dilihat pada table berikut :

Tabel 3.5 Konstanta karakteristik rele arus lebih menurut standard ANSI/IEEE

Karakteristik	A	B	p
Short Time Inverse	0,019	0,113	0,04
Moderately Inverse	0,052	0,113	0,02
Inverse	8,93	0,179	2,09
Very Inverse	18,92	0,492	2
Exteremely Inverse	28,08	0,13	2
Long Time Inverse	5,61	2,18	2,09

untuk menghitung waktu setting perlu diperhatikan ketentuan sebagai berikut :

$$t_{sett} < t_{breakdown} \quad (3.3)$$

Di mana $t_{breakdown}$ dihitung berdasarkan arus gangguan hubung singkat maksimum gangguan fasa. Di mana komponen dari sistem akan rusak akibat gangguan maksimum selama waktu tersebut kurang dari waktu kerja rele. Untuk menghitung $t_{breakdown}$ digunakan persamaan :

$$\left(\frac{I}{1000A} \right)^2 t = K \log_{10} \left(\frac{T_2 + \lambda}{T_1 + \lambda} \right) \quad (3.4)$$

Di mana :

I = arus gangguan (A).

t = durasi gangguan (detik).

A = luas penampang kabel (Kcmil).

T₂ = temperatur konduktor ketika terjadi gangguan (°C).

T₁ = temperatur konduktor sebelum terjadi gangguan (°C).

λ = temperatur dugaan ketika konduktor memiliki resistensi nol, °C di bawah nol (lihat tabel 4.6).

K = konstanta konduktor.

Tabel 3.6 Data termal konduktor untuk batas kekuatan pada kondisi gangguan

Material konduktor	$\lambda, ^\circ\text{C}$	K
Tembaga (97%)	234.0	0.0289
Aluminium(62.1%)	228.1	0.0126
6201 (52.5%)	228.1	0.0107

Baja	180.0	0.00327
------	-------	---------

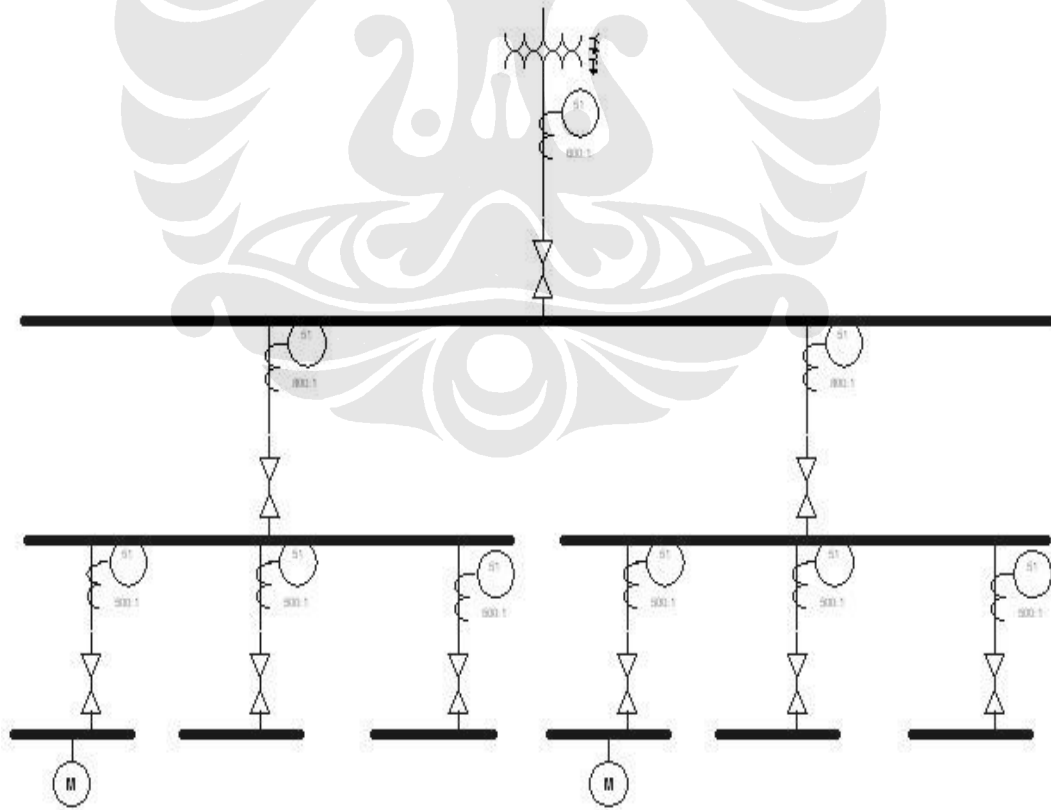
Untuk kabel XLPE dengan temperatur normal 50°C maka didapatkan persamaan:

$$I^2t = (54.45 \times A)^2 \quad (3.5)$$

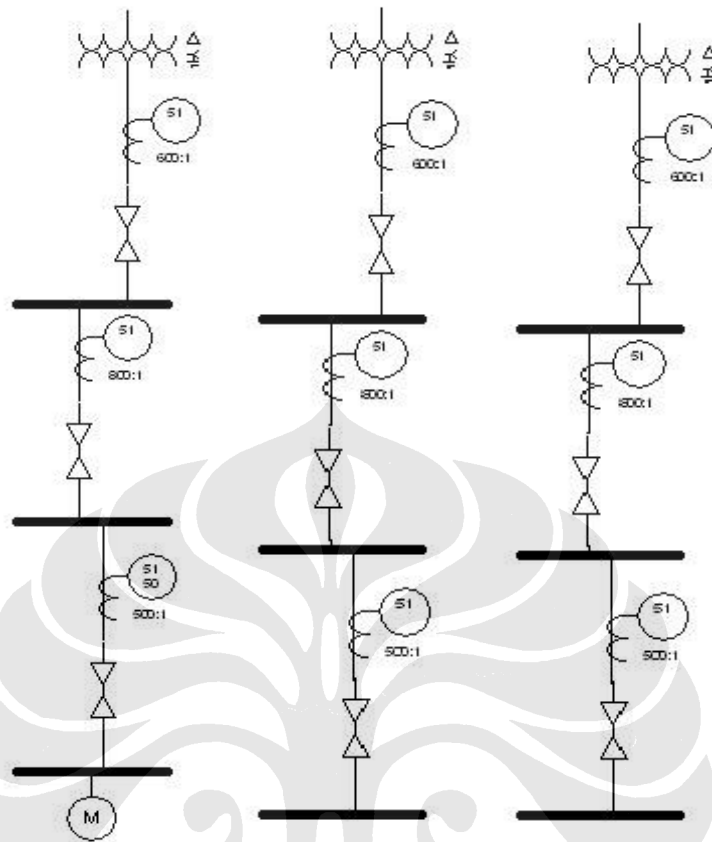
Pada setting rele gangguan tanah cara yang sama dilakukan seperti proses di atas hanya saja arus gangguan yang menjadi acuan adalah arus gangguan hubung singkat ke tanah.

Pada gambar 3.3 dan 3.4 dibawah dapat terlihat bahwa rele arus lebih di penyulang motor dikoordinasikan dengan rele arus lebih di penyulang kumpulan motor (motor control center) dan rele arus lebih di keluaran (outgoing) trafo serta dikoordinasikan pula dengan kurva start motor, kurva ketahanan kabel dari arus hubung singkat, dan kurva ketahanan trafo sehingga tujuan koordinasi yang menghasilkan selektivitas antar peralatan proteksi dapat tercapai dengan baik.

Pada skripsi ini disimulasikan koordinasi rele arus lebih pada masing-masing cabang penyulang motor dengan rele arus lebih pada level tegangan yang lebih tinggi seperti yang digambarkan di bawah ini.



Gambar 3.3 Diagram satu garis pada penyulang motor dengan kapasitas total arus hubung singkat terbesar dan kapasitas daya motor induksi terbesar



Gambar 3.4 Koordinasi rele arus lebih dari bagian hilir/penyulang motor sampai ke bagian hulu/penyulang keluaran(outgoing) trafo

3.4 Gambar kurva karakteristik rele arus lebih dan rele gangguan tanah

Untuk mensimulasikan koordinasi rele arus lebih seperti diatas maka digunakanlah software yang bernama CymTCC. Prosedur untuk menjalankan simulasi di CymTCC sebagai berikut :

1. Setelah diagram garis tunggal dengan kapasitas total arus hubung singkat terbesar pada penyulang kumpulan motor (motor control center) dibuat, selanjutnya masukkan nilai dari parameter-parameter yang ada di kurva start motor, kurva ketahanan kabel, kurva ketahanan trafo, rele proteksi dan semua bus yang ada.

Motor Starting Curve

Device
Number Id

General
Device Voltage [kV]

Rating [hp]
Full Load Current [A]
Locked Rotor Current [A]
Acceleration Time [s]

Hot Stall Time [s]
 Cold Stall Time [s]

SC & FLA ...
Coordination ...
Location ...
Color ...
Symbol ...
OLD Symbol ...
Edit Tag ...
Draw
Cancel

Gambar 3.5 karakteristik start motor

Cable Damage Curve

Device
Number Id

General
Device Voltage [kV]

Construction
Conductor Type Edit ...
Insulation Edit ...
Cable/Phase

Material
 Aluminium
 Copper

SC & FLA ...
Coordination ...
Location ...
Color ...
Symbol ...
OLD Symbol ...
Edit Tag ...
Draw
Cancel

Gambar 3.6 karakteristik kerusakan kabel

Relay

Device Number: 4 Id: []

Control Type: Electronic Relay

General

Device Voltage: 6.6 [kV] Protection: Phase

Company: ASEA BROWN BOVERI

Type: ABB SPAJ 140 EI

Time Dial: 0.200 Compute

Pick Up time: 0.01 [s]

Pick Up

Tap Range: 0.05 / 2.4 Edit ... Current Transformer Ratio

Tap L (long time): 2.25 P: 600 : S: 5

Primary Pick Up: 270 X 5 Compute Delta connection

Operation mode

Tap with tap range

Tap without tap range

Primary Amps

Instantaneous only

Multiple of Motor FLC 0.0 [A]

Options

Tap legend ...

Settings table ...

Short Time ...

Instantaneous ...

Auxiliary device ...

Company: ASEA BROWN BOVERI

Curve No.:

Description: EXTREMELY INVERSE

Buttons: Overtravel ..., SC & FLA ..., Coordination ..., Location ..., Color ..., Edit ..., Symbol ..., Multiple Relay..., OLD Symbol ..., Edit Tag ..., Add To Favorites..., Draw, Cancel

Gambar 3.7 karakteristik rele

Bus with Arc Flash Parameters

Device Number: 2 Id: []

Location ...

OLD Symbol ...

Bus Voltage

Voltage: 6.6 {kV}

Units: kv

Arc Flash Analysis

Bus Environment

Connected equipment Type: Open Air Exposed circuits: Movable Conductor

(Not used if voltage > 15 kV)

Bus Gap

25.40 [mm] 1.0 [in] Default

(Not used if voltage > 15 kV)

Working Distance

45.72 [cm] 18.0 [in] Default

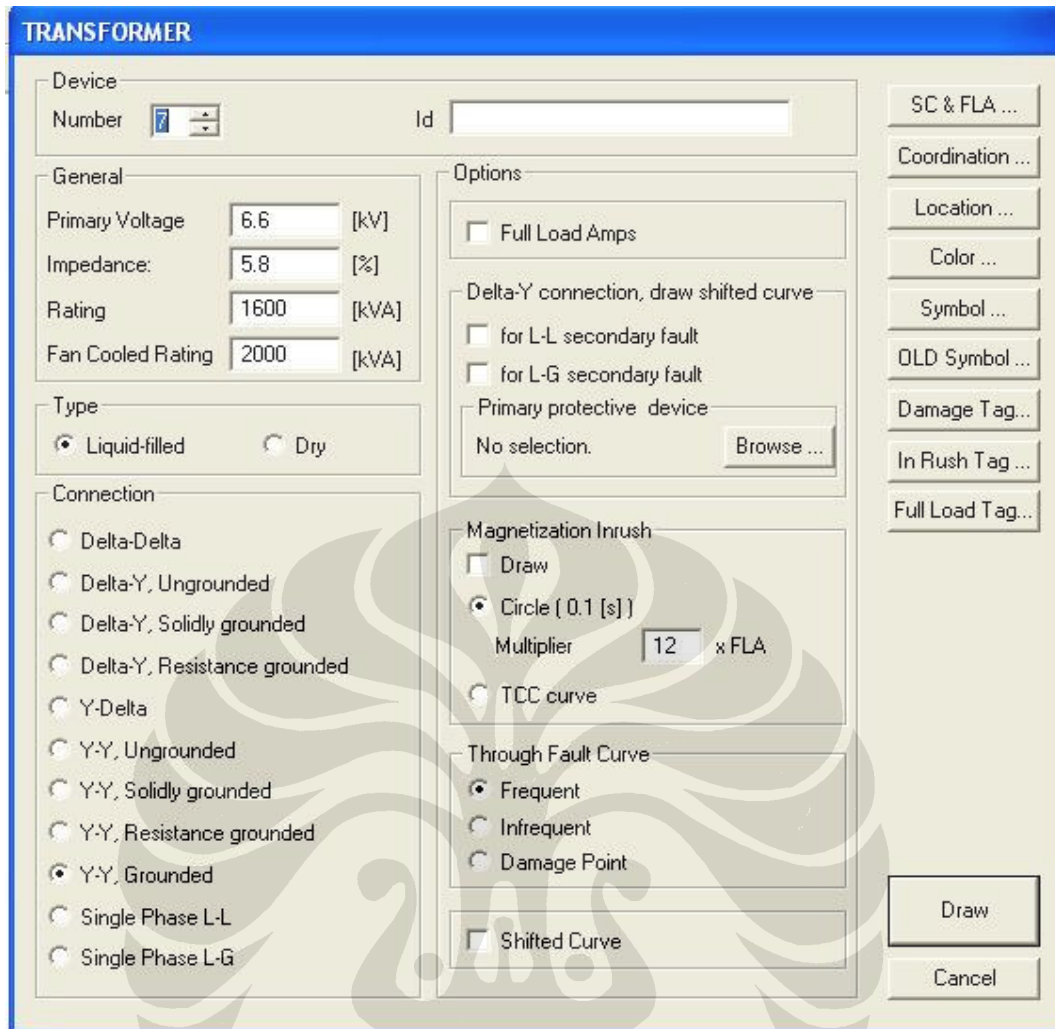
Bolted Fault Current

Take data from study

User Defined 10.0 [kA]

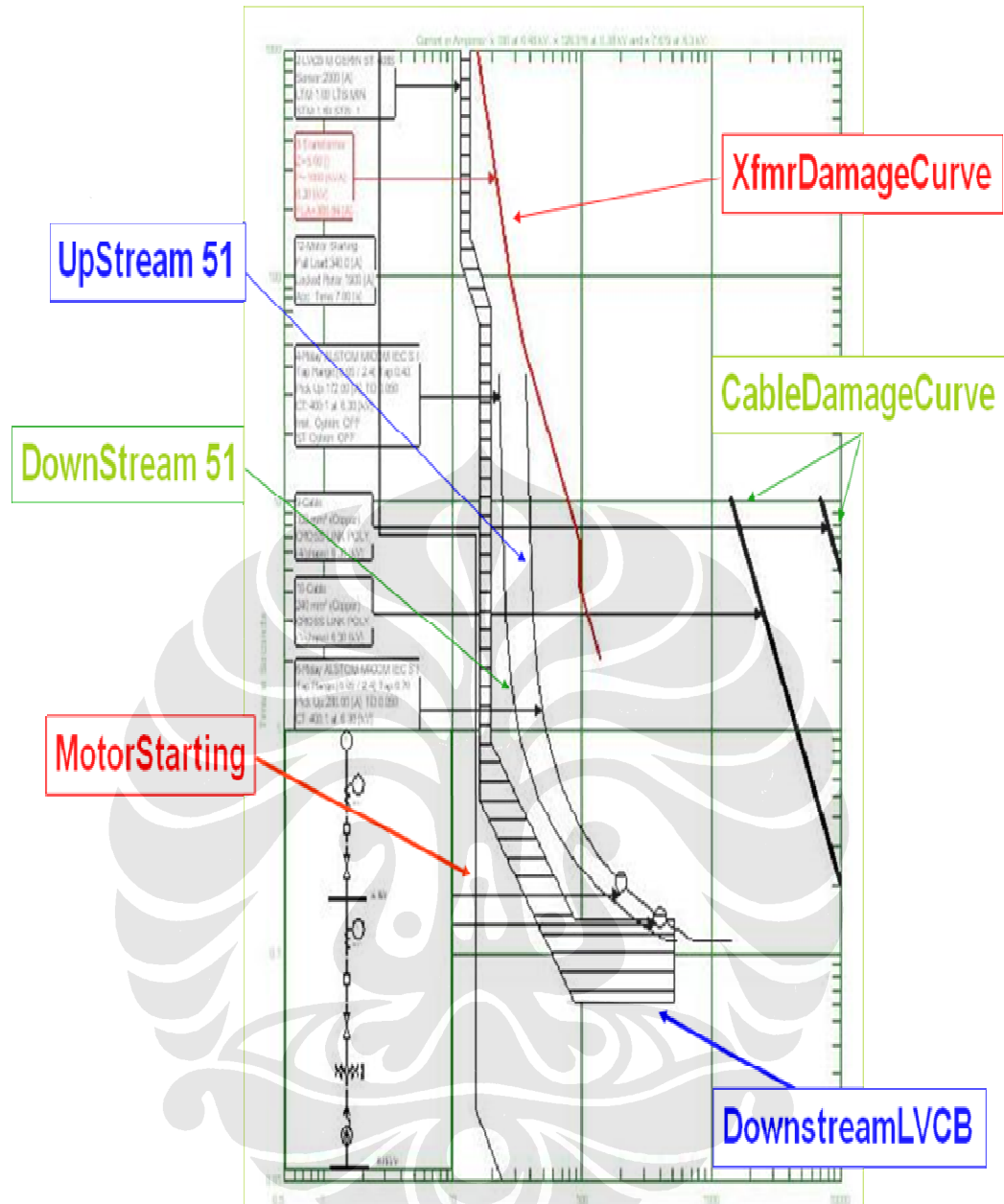
Buttons: Draw, Cancel

Gambar 3.8 karakteristik bus



Gambar 3.9 karakteristik trafo

2. Jalankan simulasi dan dapatkan hasilnya baik pada kertas kurva arus dan waktu (Time Current Curve) maupun laporan yang berbentuk rangkuman konfigurasi setting dari semua peralatan proteksi dan juga koordinasinya satu sama lain. Gambar 3.10 adalah contoh kurva karakteristik arus dan waktu pada kertas logaritmis. Kurva karakteristik rele arus lebih dan rele gangguan tanah tidak hanya berkoordinasi satu sama lain (tergantung letak rele apakah di bagian hulu atau bagian hilir) tetapi juga berkoordinasi dengan kurva pengasutan (start motor), kurva kerusakan kabel (cable damage curve), dan kurva kerusakan trafo (trafo damage curve).



Gambar 3.10 Kurva koordinasi arus dan waktu dari rele arus lebih, pengaman kabel, pengaman motor induksi, dan pengaman trafo

BAB 4

ANALISIS KOORDINASI RELE ARUS LEBIH DAN RELE GANGGUAN TANAH SEBAGAI PENGAMAN MOTOR INDUKSI, KABEL DAN TRAFKO PADA PLANT XI DI PT INDOCEMENT

4.1 Rele Arus Lebih

4.1.1 Setting dan Koordinasi Rele Arus Lebih

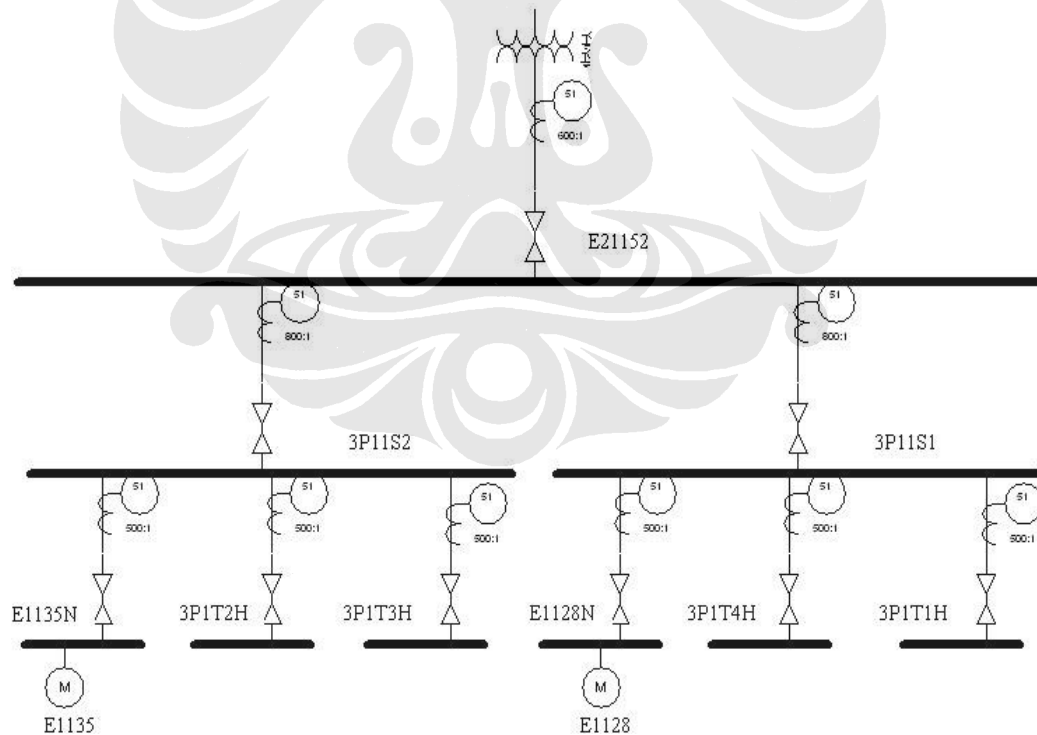
Pada skripsi ini daerah koordinasi rele arus lebih dibatasi oleh bus penyulang motor yang memiliki jumlah arus hubung singkat terbesar (3P11S2) dan memiliki motor induksi dengan kapasitas daya terbesar (3P11S1) seperti terlihat pada gambar 4.1. Dari hasil simulasi gangguan hubung singkat yang berlangsung selama 600 milidetik (30 cycle) dan 10 milidetik (0.5 cycle) masing-masing diperoleh besarnya arus gangguan hubung singkat untuk masing-masing bus sebagai berikut :

Tabel 4.1 Hasil perhitungan arus hubung singkat dari bus penyulang motor yang memiliki jumlah arus hubung singkat terbesar

Jala-Jala Listrik 2					
Nama Bus	Tegangan (kV)	Macam Gangguan (dalam kA (rms))			
		3 Fasa	L - G	L - L	L - L - G
3P1T1H	6.6	78.349	37.673	67.852	72.652
3P1T2H	6.6	87.943	47.904	76.161	84.318
3P1T3H	6.6	84.009	44.432	72.754	78.706
3P1T4H	6.6	76.202	37.280	65.993	70.190
3P11S1	6.6	93.810	58.589	81.242	93.046
3P11S2	6.6	100.873	75.023	87.359	104.186
E1128N	6.6	84.543	43.475	73.216	81.116
E1135N	6.6	92.327	53.723	79.958	89.691
E21152	6.6	117.197	149.394	101.496	146.593

Tabel 4.2 Hasil perhitungan arus hubung singkat dari bus penyulang motor

Jala-Jala Listrik 2						
Nama Bus	Tegangan (kV)	Macam Gangguan (dalam kA (rms))				
		3 Fasa	L - G	L - L	L - L - G	
3P1T1H	6.6	85.064	38.632	74.258	78.654	
3P1T2H	6.6	96.323	49.400	84.153	91.926	
3P1T3H	6.6	91.411	45.713	79.800	85.244	
3P1T4H	6.6	82.383	38.206	71.881	75.610	
3P11S1	6.6	104.052	61.062	91.054	102.604	
3P11S2	6.6	112.285	79.024	98.275	114.843	
E1128N	6.6	93.214	44.870	81.537	89.226	
E1135N	6.6	102.039	55.758	89.251	98.670	
E21152	6.6	132.145	166.903	115.794	161.206	



Gambar 4.1 Diagram satu garis penyulang 3P11S1 dan 3P11S2 di keluaran (outgoing) trafo jala-jala listrik 2 pada Plant XI PT Indocement Tunggal Prakarsa

Pada gambar 4.1, penyulang 3P11S2 mengalirkan daya ke beban motor induksi E1135 yang memiliki daya sebesar 4000 kW, arus start sebesar 1580 A, waktu start sebesar 30 detik dan faktor pelayanan (service factor) sebesar 1. Motor E1135 merupakan motor yang menggerakkan kipas pembuang debu/gas sisa (exhaust fan) hasil pembakaran bahan baku semen. Penyulang 3P11S1 mengalirkan daya ke beban motor induksi E1128 yang memiliki daya sebesar 5000 kW, arus start sebesar 1210 A, waktu start sebesar 25 detik dan faktor pelayanan sebesar 1. Motor E1128 merupakan motor yang menggerakkan penggilingan bahan baku semen. Penyulang 3P11S1 dan 3P11S2 juga mengalirkan daya ke masing-masing motor berkapasitas kecil melalui masing-masing trafo yang terhubung ke bus 3P1T2H, 3P1T3H, 3P1T4H, dan 3P1T1H. Rele arus lebih waktu terbalik bertipe ABB SPCJ 4D24 yang terpasang di setiap penyulang motor memiliki tambahan fungsi yaitu sebagai pengaman beban lebih. Pada skripsi ini, rele arus lebih waktu seketika yang disetting hanya rele yang terdapat pada penyulang motor saja. Pada rele arus lebih tipe ABB SPCJ, jangkauan tetapan setting arusnya yang digunakan bervariasi seperti 0.05 sampai 2.4 dengan tingkat (step) 0.05 dan 0.25 sampai 12 dengan tingkat (step) 0.25. Arus nominal (I_n) yang digunakan adalah 1 A. Ratio (perbandingan) arus primer dan sekunder dari trafo arus bermacam-macam seperti tabel berikut.

Tabel 4.3 Perbandingan sisi primer dan sekunder trafo arus pada masing-masing rele

Letak Rele (Bus Penyulang)	CT Ratio
3P1T1H	150/1
3P1T2H	150/1
3P1T3H	150/1
3P1T4H	50/1
3P11S1	800/1
3P11S2	800/1
E1128N	600/1
E1135N	500/1
E21152	600/1

Kondisi operasi normal yang dirasakan oleh rele sebagai adanya gangguan arus lebih adalah pada saat motor *start*. Kondisi operasi normal terberat yang diperhitungkan dalam analisis unjuk kerja sistem pengaman arus lebih adalah pada saat motor terbesar *start*.

Kondisi operasi start motor ini merupakan keadaan tiga fasa seimbang, oleh karena itu analisis unjuk kerja rele terhadap operasi start motor adalah untuk kerja rele arus lebih gangguan fasa. Jika motor mengalami start yang berat karena dikopel dengan beban yang memiliki torsi cukup besar, maka waktu start yang dibutuhkan untuk mencapai kecepatan nominal dapat menjadi lebih lama. Penyetelan waktu rele arus lebih di penyulang motor seharusnya 25 – 30 detik dengan kurva karakteristik rele arus lebih jenis *very inverse* atau *long time inverse* yang dikombinasikan dengan rele arus lebih jenis seketika (*instantaneous*) yang bekerja terlebih dahulu jika terjadi gangguan hubung singkat. Menurut IEEE Std C37.96-2000 memberikan standar bahwa selisih waktu kerja rele pada waktu start dengan waktu start motor adalah 2 detik untuk motor dengan waktu start 5-10 detik dan 5 detik untuk motor dengan waktu start lebih dari 10 detik. Dengan ketentuan ini, maka waktu kerja rele di penyulang motor E1128 dan E1135 yang diinginkan terhadap operasi start adalah masing-masing 30 dan 35 detik.

Rele arus lebih jenis waktu seketika digunakan sebagai pelindung dari gangguan hubung singkat di penyulang motor. Berdasarkan IEEE Std C37.96-2000, rele ini dapat diset antara 165% - 250% dari arus rotor terkunci (*Locked Rotor Current/LRA*). Namun biasanya ditambahkan sebesar 10% - 25% sebagai faktor aman (*safety factor*) ketika setting arus dihitung. Rele arus lebih waktu seketika jenis *High Drop Out (HDO)* mencegah rele arus lebih waktu terbalik agar tidak bekerja pada saat motor start. Dengan konfigurasi tersebut, rele arus lebih waktu seketika dapat disetting lebih sensitif tanpa adanya kekhawatiran pemutus tenaga terbuka karena beban lebih. Setting rele waktu seketika jenis HDO dapat diset 125%-200% dari arus beban penuh. Setting rele arus lebih seketika seharusnya juga lebih besar dari arus kontribusi maksimum dari motor di penyulang tersebut ketika terjadi gangguan hubung singkat di penyulang yang lain. Hal ini bertujuan agar tidak terjadi pemadaman di penyulang motor tersebut karena rele arus lebih

seketika menganggap arus kontribusi maksimum motor sebagai arus gangguan hubung singkat. Namun penyetelan arus tersebut diusahakan tidak terlalu jauh dibandingkan arus kontribusi maksimum motor ketika terjadi gangguan hubung singkat. Setting rele ini pada umumnya memiliki jangkauan seperti berikut.

$$I_{\text{instananeous}} = (1.2 \text{ s/d } 2) \times I_{\text{maksimum}} \quad (4.1)$$

Dimana I_{maksimum} adalah arus kontribusi maksimum motor ketika terjadi gangguan hubung singkat.

Pada skripsi ini menggunakan standar ANSI/IEEE sehingga untuk mendapatkan baik waktu kerja rele maupun nilai TMS tiap kurva rele dapat menggunakan rumus berikut :

$$t = \left(\frac{A}{M^p - 1} + B \right) \cdot TMS \quad (4.2)$$

M adalah pembagian dari arus gangguan hubung singkat pada sisi sekunder trafo arus (CT) terhadap setting arus (MTVC – Multiple of Tap Value current). Sedangkan untuk konstanta A, B dan p untuk masing-masing karakteristik di atas dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 4.4 Konstanta karakteristik rele arus lebih waktu terbalik menurut standar IEEE

Karakteristik	A	B	p
Short Time Inverse	0,019	0,113	0,04
Moderately Inverse	0,052	0,113	0,02
Inverse	8,93	0,179	2,09
Very Inverse	18,92	0,492	2
Exteremely Inverse	28,08	0,13	2
Long Time Inverse	5,61	2,18	2,09

Perhitungan arus setting dan TMS masing-masing rele arus lebih waktu terbalik yang dikombinasikan dengan rele arus lebih waktu seketika di penyulang motor E1128N dan E1135N diuraikan sebagai berikut.

Untuk motor E1128, $I_{\text{beban penuh}} = 523.2 \text{ A}$

Ratio (perbandingan) trafo arus (Current Transformer/CT) = 600/1

$$I_{set} (I_{sek} CT) = 1.3 \times I_{beban\ penuh} \times 1/CT = 1.3 \times 523.2 \times (1/600) = 1.1336 \text{ A}$$

Maka rele arus lebih dapat diset pada tap = 1.2 atau arus primer pickup rele adalah 720 A. Besarnya arus start motor adalah 1210 A pada sisi primer trafo arus dan 2.02 A pada sisi sekunder trafo arus. Waktu kerja rele di penyulang E1128N yang diinginkan terhadap operasi start motor adalah 30 detik sehingga nilai TMS dengan menggunakan kurva karakteristik rele arus lebih jenis long time inverse diperoleh :

$$TMS = \frac{t}{\left[\frac{5.61}{\left(\frac{I_{start}}{I_{set}} \right)^{2.09} - 1} + 2.18 \right]}$$

$$TMS = \frac{30}{\left[\frac{5.61}{\left(\frac{2.02}{1.2} \right)^{2.09} - 1} + 2.18 \right]}$$

$$TMS = 5.96.$$

Sedangkan rele arus lebih seketika diset 200% (175% + faktor keamanan 25%) dari arus rotor terkunci yang bernilai 2420 A. Rele arus lebih waktu seketika jenis HDO diset 150% dari arus beban penuh yang bernilai 637.95 A.

Perhitungan setting rele arus lebih waktu terbalik dan seketika seperti diatas sudah memenuhi selektivitas koordinasi kurva rele dengan kurva start motor yang dapat dilihat pada gambar 4.4. Rele arus lebih seketika mengamankan rele arus lebih waktu terbalik untuk tidak bekerja ketika motor sedang start.

Untuk motor E1135, $I_{beban\ penuh} = 425.3 \text{ A}$

Ratio (perbandingan) trafo arus (Current Transformer/CT) = 500/1

$$I_{set} (I_{sek} CT) = 1.3 \times I_{beban\ penuh} \times 1/CT = 1.3 \times 425.3 \times (1/500) = 1.105 \text{ A}$$

Maka rele arus lebih dapat diset pada tap = 1.2 atau arus primer pick up rele adalah 600 A. Besarnya arus start motor adalah 1580 A pada sisi primer trafo arus

dan 3.16 A pada sisi sekunder trafo arus. Waktu kerja rele di penyulang E1135N yang diinginkan terhadap operasi start motor adalah 35 detik sehingga nilai TMS dengan menggunakan kurva karakteristik rele arus lebih jenis long time inverse diperoleh :

$$TMS = \frac{t}{\left[\frac{5.61}{\left(\frac{I_{start}}{I_{set}} \right)^{2.09} - 1} + 2.18 \right]}$$

$$TMS = \frac{35}{\left[\frac{5.61}{\left(\frac{3.16}{1.2} \right)^{2.09} - 1} + 2.18 \right]}$$

$$TMS = 11.53.$$

Sedangkan rele arus lebih seketika diset 200% (175% + faktor kemanan 25%) dari arus rotor terkunci yang bernilai 3160 A. Rele arus lebih waktu seketika jenis HDO diset 150% dari arus beban penuh yang bernilai 784.8 A.

Perhitungan setting rele arus lebih waktu terbalik dan seketika seperti diatas sudah memenuhi selektivitas koordinasi kurva rele dengan kurva start motor yang dapat dilihat pada gambar 4.7. Rele arus lebih seketika mengamankan rele arus lebih waktu terbalik untuk tidak bekerja ketika motor sedang start.

Untuk menghitung setting rele arus lebih maka perlu diperhatikan jangkauan arus untuk membagi fungsi rele baik sebagai pengaman utama di penyulangnya maupun pengaman cadangan di penyulang berikutnya yang dirumuskan sebagai berikut :

$$1.3I_{load} < I_{set} < 0.8I_{short\ min} \quad (4.3)$$

Dimana arus setting rele lebih besar daripada 1.3 X arus beban penuh (I_{load}) sehingga rele tidak memerintahkan pemutus tenaga terbuka (trip) ketika sistem dalam kondisi beban puncak dan lebih kecil daripada 0.8 kali arus gangguan hubung singkat 2 fasa dalam kondisi pembangkitan minimum. Rumus diatas dapat

ditetapkan sebagai penentu batas atas dan batas bawah untuk menentukan arus setting rele arus lebih. Sementara perhitungan arus setting adalah sebagai berikut :

$$I_{\text{setting}} = \frac{I_{\text{pickup}}}{CT_{\text{ratio}} \times I_n} \quad (4.4)$$

Besarnya arus beban penuh di tiap bus adalah :

Tabel 4.5 Arus beban penuh tiap bus dari penyulang keluaran trafo jala-jala listrik 2

Nama Bus	Arus Beban Penuh (A)
3P1T1H	103.56
3P1T2H	79.19
3P1T3H	99.4
3P1T4H	33.82
3P11S1	662.06
3P11S2	604.63
E1128N	525.25
E1135N	426.59
E21152	2800.96

Perhitungan arus setting rele arus lebih waktu terbalik menggunakan data gangguan hubung singkat dengan waktu gangguan selama 600 milidetik pada simulasi di ETAP 4.0 karena impedansi yang digunakan adalah impedansi peralihan generator sedangkan rele arus lebih waktu seketika menggunakan data gangguan hubung singkat dengan waktu gangguan selama 10 milidetik pada simulasi di ETAP 4.0 karena impedansi yang digunakan adalah impedansi subperalihan generator dan motor.

Dengan menggunakan persamaan 3.3, kita menghitung arus setting rele pada semua penyulang seperti pada gambar 4.1 dalam sebuah jangkauan arus pickup seperti berikut.

Arus pickup rele arus lebih dengan mengambil contoh pada penyulang 3P1T1H adalah :

$$1.3 \times 103.56 \text{ A} < I_{\text{pickup}} < 0.8 \times 67852 \text{ A (arus gangguan hubung singkat 2 fasa)}$$

$$134.628 \text{ A} < I_{\text{pickup}} < 54281 \text{ A}$$

Sehingga tetapan rele arus lebih menjadi :

$$\frac{134.628}{\left(\frac{150}{1}\right) \times 1} < I_{\text{set}} < \frac{54281}{\left(\frac{150}{1}\right) \times 1}$$

$$0.8975 \text{ A} < I_{\text{set}} < 361.87 \text{ A}$$

Dengan cara yang sama dengan diatas maka didapatkan jangkauan setting arus seperti tabel di bawah ini :

Tabel 4.6 Arus setting rele arus lebih waktu terbalik dengan jangkauan arus batas bawah dan batas atas

nama penyulang	setting rele arus lebih (A)	
	arus batas bawah	arus batas atas
3P1T1H	0.8975	361.87
3P1T2H	0.686	406.192
3P1T3H	0.8615	388.02
3P1T4H	0.879	1055.888
3P11S1	1.076	81.242
3P11S2	0.9825	87.359
E1128N	1.138	97.621
E1135N	1.109	127.933
E21152	6.0687	135.328

Dalam koordinasi rele arus lebih, rele harus dapat bekerja sesuai dengan cakupan daerah pengamanannya dan adanya rele cadangan dengan beda interval waktu tertentu yang harus bekerja bila rele yang bersangkutan gagal bekerja. Penentuan karakteristik rele dapat berubah sesuai dengan kebutuhan koordinasi dengan batasan bahwa waktu kerja rele harus lebih kecil dibandingkan waktu maksimum kabel dan trafo dalam menahan arus gangguan hubung singkat yang berlangsung. Di plant XI PT Indocement ini, antara bus penyulang menggunakan konduktor tembaga berisolasi XLPE 120 mm², 185 mm² dan 240 mm² dengan tegangan maksimum 12 kV. Konduktor XLPE 120 mm² terdapat di penyulang 3P1T1H, 3P1T2H, 3P1T3H, 3P1T4H, E1128N, dan E1135N. Konduktor XLPE 185 mm² terdapat di penyulang 3P11S1 dan 3P11S2. Konduktor XLPE 185 mm² terdapat di penyulang E21152. Temperatur konduktor sebelum terjadi gangguan hubung

singkat sebesar 90° C dan temperatur konduktor maksimum ketika terjadi gangguan sebesar 250° C. Untuk koordinasi rele yang berada pada awal penyulang yang dalam skripsi ini di penyulang E21152, TMSnya harus paling besar agar tetap selektif terhadap semua penyulang motor.

Dari hasil perhitungan dan simulasi koordinasi peralatan pengaman di kurva arus dan waktu, diperoleh hasil penyettingan rele arus lebih waktu terbalik dan rele arus lebih seketika yang akan diuraikan sebagai berikut.

1. Rele 3P1T1H

Kurva Karakteristik : Extremely Inverse

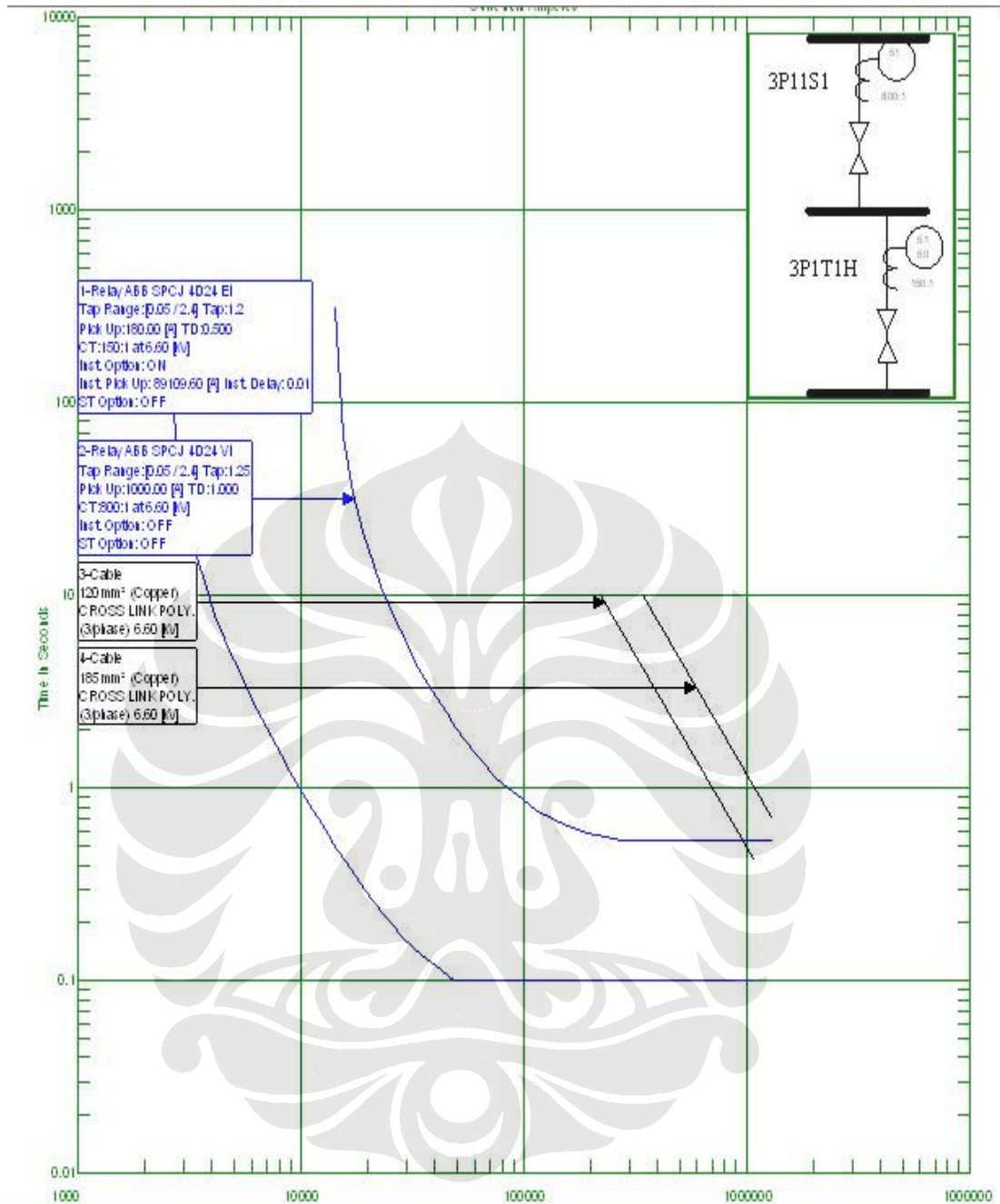
Arus setting : 1.2 A

TMS : 0.5

t_{operasi} : 0.12 detik

$I_{\text{instananeous}}$: 89109.6 A

TMS dipilih dengan nilai yang cukup terkecil karena letaknya yang paling hilir. Untuk mengamankan kabel di penyulang ini, maka waktu kerja rele ini harus lebih rendah dibandingkan dengan waktu kegagalan (*breakdown*) kabel. Pada gambar 4.2, waktu kerja rele 3P1T1H sudah dibawah waktu kegagalan (*breakdown*) kabel di penyulang tersebut yang interval waktunya sebesar 0.3255 detik.



Gambar 4.2 Kurva koordinasi arus terhadap waktu rele 3P1T1H dan 3P11S1

2. Rele 3P1T2H

Kurva Karakteristik : Extremely Inverse

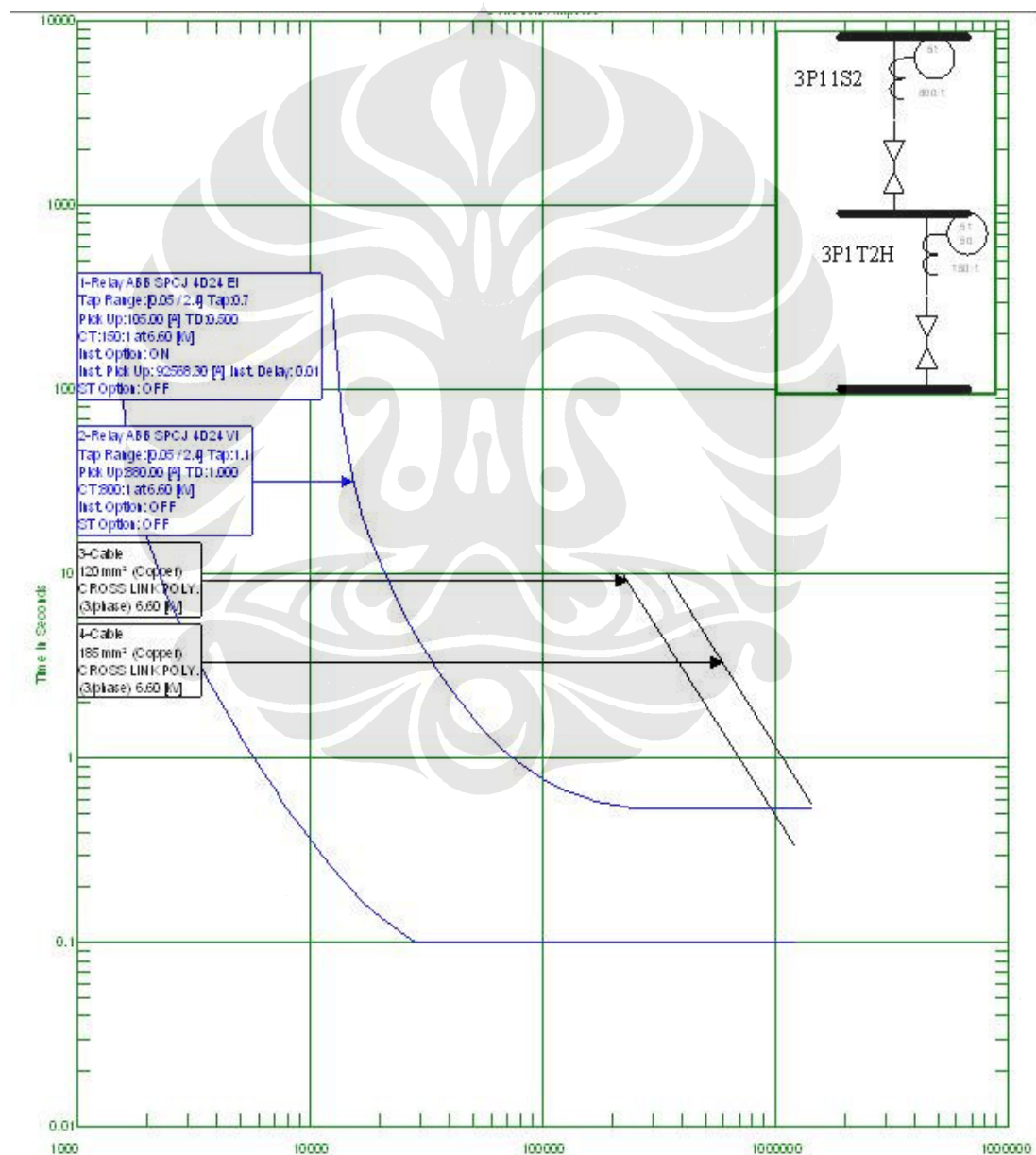
Arus setting : 0.7 A

TMS : 0.5

$t_{operasi}$: 0.12 detik

$I_{instananeous}$: 92568.3 A

TMS dipilih dengan nilai yang cukup terkecil karena letaknya yang paling hilir. Untuk mengamankan kabel di penyulang ini, maka waktu kerja rele ini harus lebih rendah dibandingkan dengan waktu kegagalan (*breakdown*) kabel. Pada gambar 4.3, waktu kerja rele 3P1T2H sudah dibawah waktu kegagalan (*breakdown*) kabel di penyulang tersebut yang interval waktunya sebesar 0.2377 detik.



Gambar 4.3 Kurva koordinasi arus terhadap waktu rele 3P1T2H dan 3P11S2

3. Rele 3P1T3H

Kurva Karakteristik : Extremely Inverse

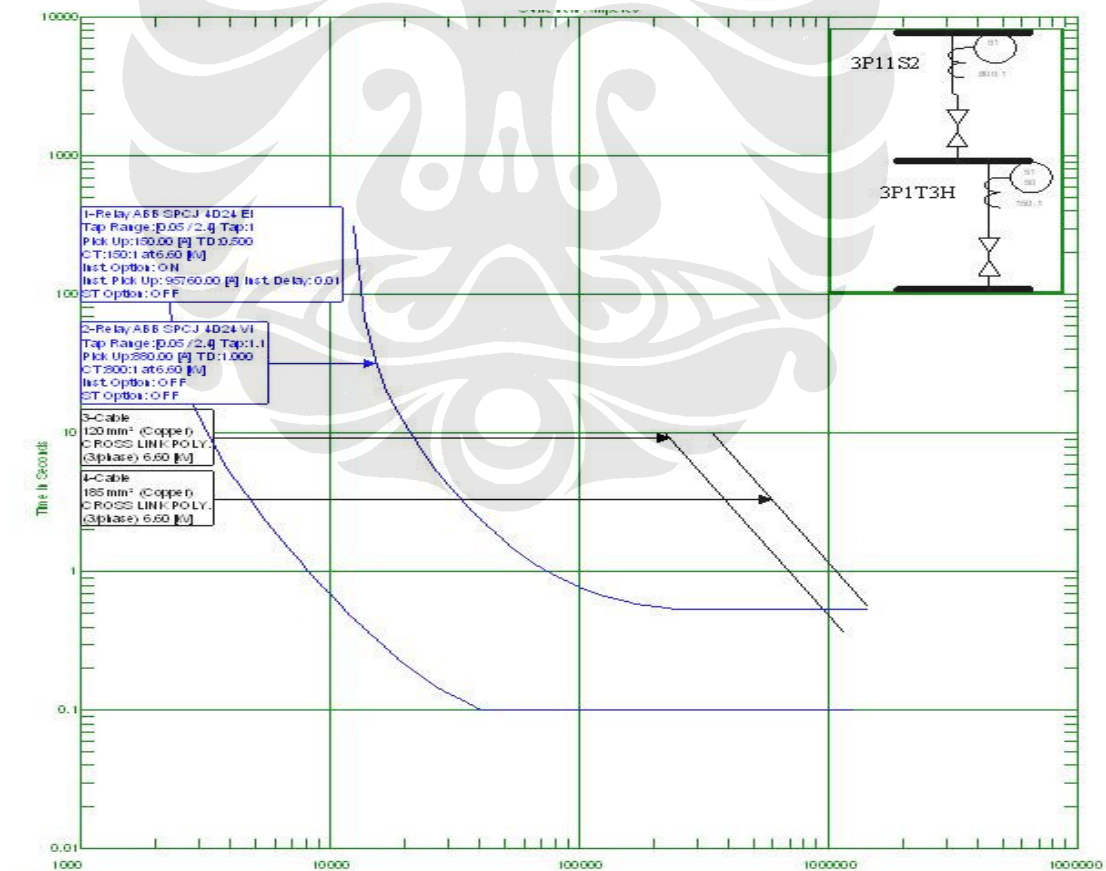
Arus setting : 1 A

TMS : 0.5

$t_{operasi}$: 0.12

$I_{instananeous}$: 95760 A

TMS dipilih dengan nilai yang cukup terkecil karena letaknya yang paling hilir. Untuk mengamankan kabel di penyulang ini, maka waktu kerja rele ini harus lebih rendah dibandingkan dengan waktu kegagalan (*breakdown*) kabel. Pada gambar 4.4, waktu kerja rele 3P1T3H sudah dibawah waktu kegagalan (*breakdown*) kabel di penyulang tersebut yang interval waktunya sebesar 0.2701 detik.



Gambar 4.4 Kurva koordinasi arus terhadap waktu rele 3P1T3H dan 3P11S2

4. Rele 3P1T4H

Kurva Karakteristik : Extremely Inverse

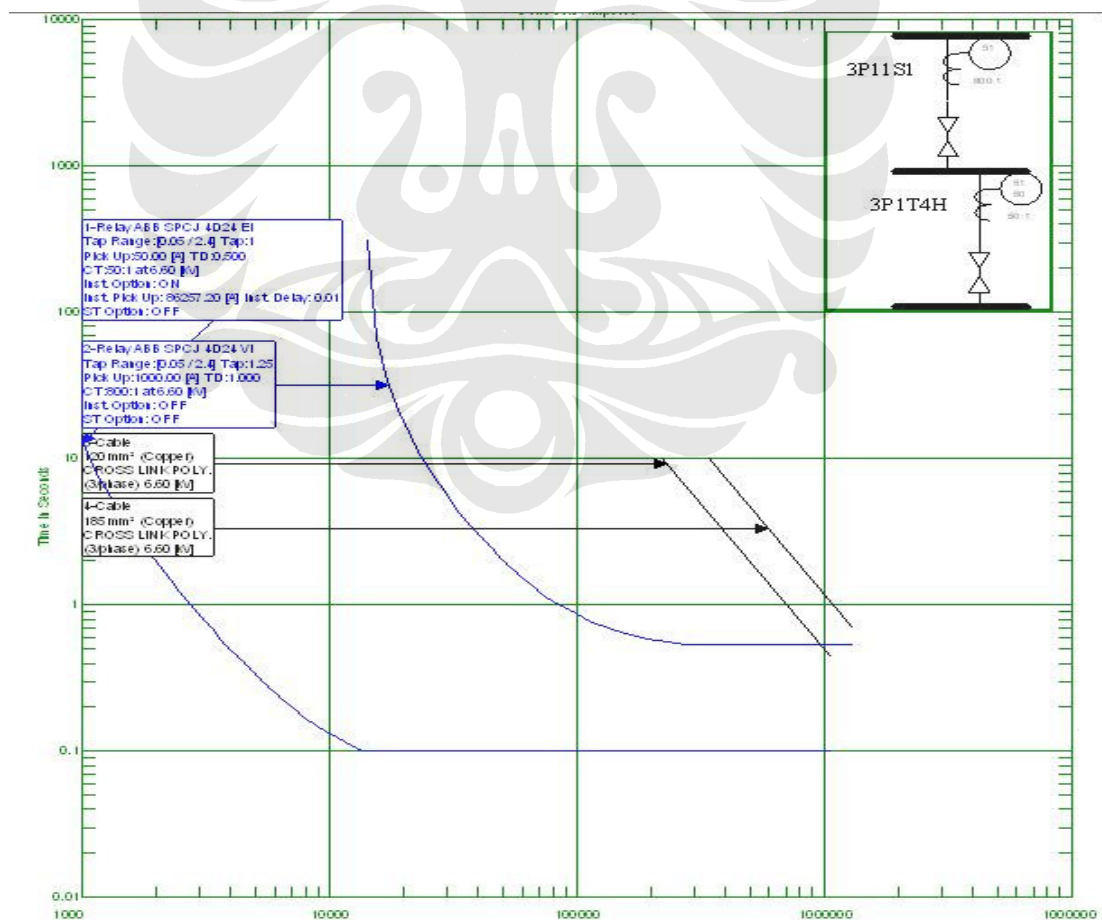
Arus setting : 1 A

TMS : 0.5

$t_{operasi}$: 0.12 detik

$I_{instananeous}$: 86257.2 A

TMS dipilih dengan nilai yang cukup terkecil karena letaknya yang paling hilir. Untuk mengamankan kabel di penyulang ini, maka waktu kerja rele ini harus lebih rendah dibandingkan dengan waktu kegagalan (*breakdown*) kabel. Pada gambar 4.5, waktu kerja rele 3P1T4H sudah dibawah waktu kegagalan (*breakdown*) kabel di penyulang tersebut yang interval waktunya sebesar 0.3498 detik.



Gambar 4.5 Kurva koordinasi arus terhadap waktu rele 3P1T4H dan 3P11S1

5. Rele E1128N

Kurva Karakteristik : Long Time Inverse

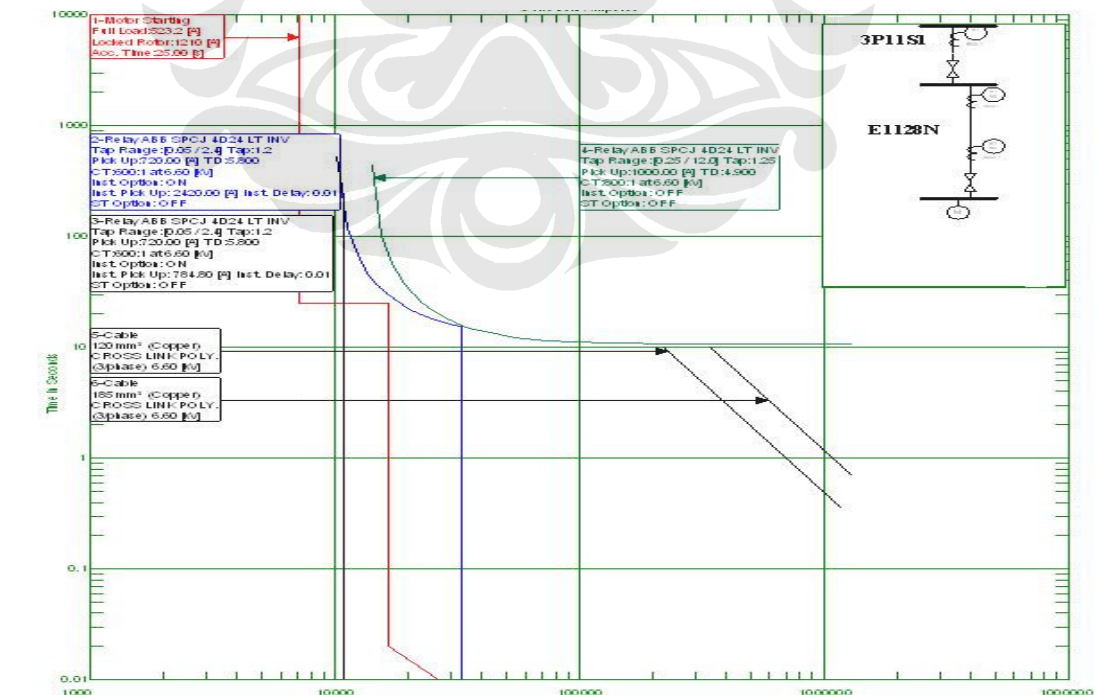
Arus setting : 1.2 A

TMS : 5.8

$t_{operasi}$: 30.1816 detik

$I_{instananeous}$: 2420 A

Pada perhitungan sebelumnya diperoleh TMS sebesar 5.96 yang kemudian diset menjadi 5.8. Dengan menggunakan kurva karakteristik long time inverse dan waktu kerja rele seperti di atas maka sudah cukup memberikan kesempatan motor untuk start karena selisih (margin) antara waktu kerja rele dengan waktu start motor sebesar 5.1816 detik. Untuk mengamankan kabel di penyulang ini, maka waktu kerja rele ini harus lebih rendah dibandingkan dengan waktu kegagalan (*breakdown*) kabel. Pada gambar 4.6, waktu kerja rele E1128N sudah dibawah waktu kegagalan (*breakdown*) kabel di penyulang tersebut yang interval waktunya sebesar 0.3556 detik.



Gambar 4.6 Kurva koordinasi arus terhadap waktu rele E1128N dan 3P11S1

6. Rele E1135N

Kurva Karakteristik : Long Time Inverse

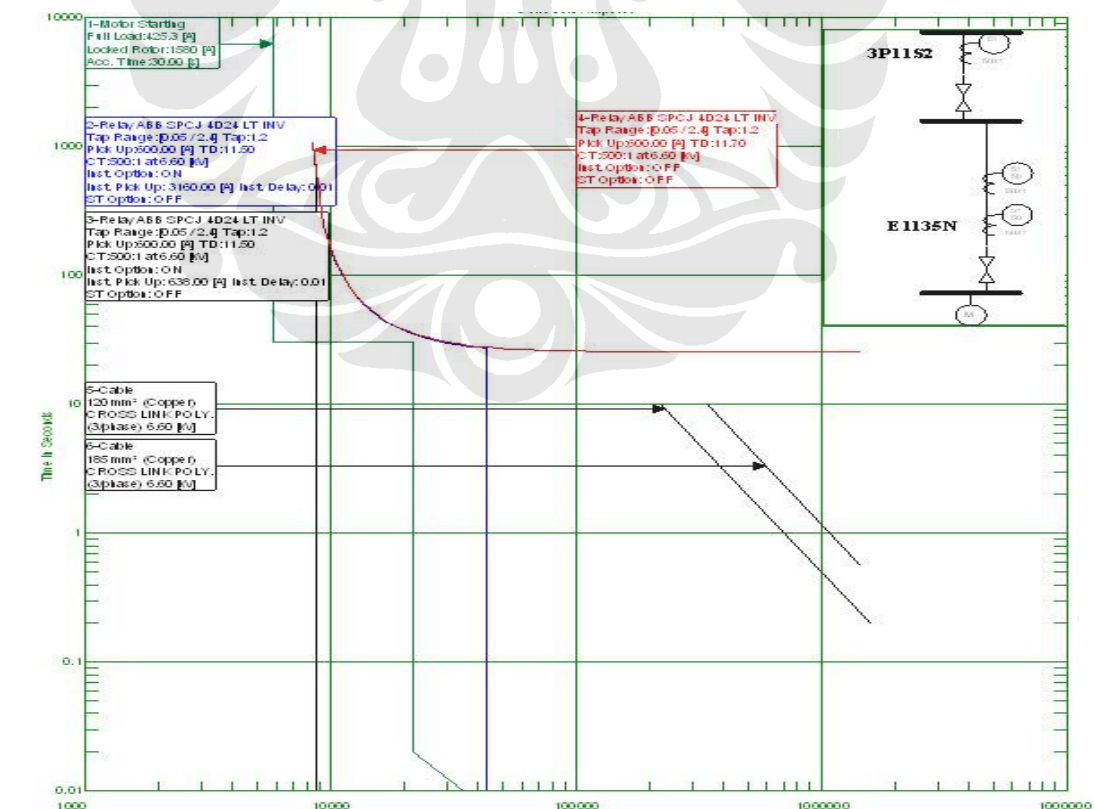
Arus setting : 1.2 A

TMS : 11.5

$t_{operasi}$: 35.0549 detik

$I_{instananeous}$: 3160 A

Pada perhitungan sebelumnya TMS bernilai 11.53 yang diset menjadi 11.5 sudah cukup memberikan kesempatan motor untuk start karena selisih (margin) antara waktu kerja rele dengan waktu start motor sebesar 5.0549 detik. Untuk mengamankan kabel di penyulang ini, maka waktu kerja rele ini harus lebih rendah dibandingkan dengan waktu kegagalan (*breakdown*) kabel. Pada gambar 4.7, waktu kerja rele E1135N sudah dibawah waktu kegagalan (*breakdown*) kabel di penyulang tersebut yang interval waktunya sebesar 0.2966 detik.



Gambar 4.7 Kurva koordinasi arus terhadap waktu rele E1135N dan 3P11S2

7. Rele 3P11S1

Kurva Karakteristik : Normally inverse

Arus setting : 2 A

TMS : 2.5

$t_{operasi}$: 0.588 detik

Arus gangguan hubung singkat 3 fasa ($I_{hs3fasa}$) pada penyulang ini adalah 93810 A dan $I_{hs3fasa}$ pada sisi sekunder trafo arus adalah 117.2625 A.

Untuk mendapatkan setting rele 3P11S1 yang berkoordinasi dengan rele 3P1T1H dan 3P1T4H dijelaskan sebagai berikut :

Total waktu kerja rele 3P1T1H dan 3P1T4H adalah 0.12 detik. Arus setting rele 3P11S1 sebesar 1.25 A. Dengan menggunakan persamaan 4.2 diperoleh TMS rele 3P11S1 yang diset menjadi 1. Pada gambar 4.2 dan 4.5, koordinasi antara rele 3P11S1 dengan rele 3P1T1H dan 3P1T4H sudah baik dengan menggunakan kurva karakteristik very inverse yang dibuktikan dengan tidak adanya perpotongan kurva antar rele. Interval waktu kerja rele 3P11S1 dengan rele 3P1T1H dan 3P1T4H berdasarkan gambar 4.2 dan 4.5 masing-masing sebesar 0.4392 detik. Pada gambar 4.2 dan 4.5, waktu kerja rele 3P11S1 sudah dibawah waktu kegagalan (*breakdown*) kabel di penyulang tersebut yang interval waktunya masing-masing sebesar 0.1664 detik.

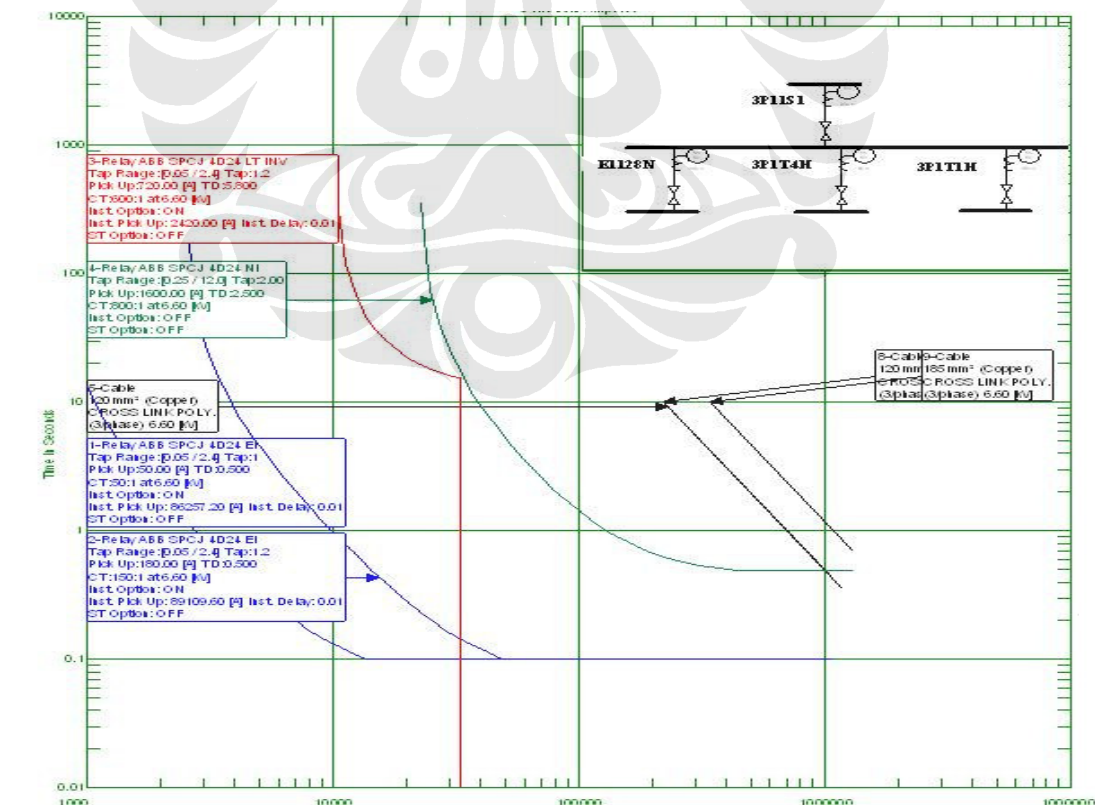
Untuk mendapatkan setting rele 3P11S1 yang berkoordinasi dengan rele E1128N dijelaskan sebagai berikut :

Total waktu kerja rele E1128N adalah 30.1816 detik. Arus setting rele 3P11S1 sebesar 1.25 A. Dengan menggunakan persamaan 4.2 diperoleh TMS rele 3P11S1 yang diset menjadi 4.9. Pada gambar 4.4, koordinasi antara rele 3P11S1 dengan rele E1128N sudah baik dengan menggunakan kurva karakteristik Long Time inverse yang dibuktikan dengan tidak adanya perpotongan kurva antar rele. Interval waktu kerja rele 3P11S1 dengan rele E1128N berdasarkan gambar 4.4 sebesar 0.4821 detik. Pada gambar 4.6, waktu kerja rele 3P11S1 diatas waktu

kegagalan (*breakdown*) kabel di penyulang tersebut yang interval waktunya sebesar 0.9962 detik. Dengan kondisi seperti ini, kabel akan rusak akibat waktu ketahanan maksimum setelah terjadinya gangguan hubung singkat terlewati.

Dengan settingan tersebut diatas, maka koordinasi antara rele 3P11S1 dengan rele 3P1T1H, 3P1T4H dan E1128N tidak baik karena menghasilkan interval waktu kerja antara rele 3P11S1 dengan rele 3P1T1H dan 3P1T4H menjadi sangat besar dan tidak sesuai dengan interval waktu yang seharusnya antara 0.3 s/d 0.5 detik.

Untuk mengatasi masalah tersebut, perlu perubahan kurva karakteristik rele 3P11S1 dengan menggunakan kurva karakteristik normally inverse. Arus setting dan total waktu kerja rele masing-masing sebesar 2 A dan 0.588 detik sehingga TMS diset pada nilai 2.5. Dengan settingan tersebut, maka dihasilkan interval waktu kerja antara rele 3P11S1 dengan rele 3P1T1H dan 3P1T4H sebesar 0.39 detik sedangkan antara rele 3P11S1 dengan rele E1128N sebesar 0.4802 detik. Pada gambar 4.8, waktu kerja rele 3P11S1 dibawah waktu kegagalan (*breakdown*) kabel yang interval waktunya sebesar 0.2156 detik.



Gambar 4.8 Kurva koordinasi arus terhadap waktu rele 3P11S1, E1128N, 3P1T4H, 3P1T1H

8. Rele 3P11S2

Kurva Karakteristik : Normally inverse

Arus setting : 3 A

TMS : 2.5

$t_{operasi}$: 0.588 detik

Arus gangguan hubung singkat 3 fasa ($I_{hs3fasa}$) pada penyulang ini adalah 100.873 A dan $I_{hs3fasa}$ pada sisi sekunder trafo arus adalah 126.09125 A.

Untuk mendapatkan setting rele 3P11S2 yang berkoordinasi dengan rele 3P1T2H dan 3P1T3H dijelaskan sebagai berikut :

Total waktu kerja rele 3P1T2H dan 3P1T3H adalah 0.12 detik. Arus setting rele 3P11S2 sebesar 1.1 A. Dengan menggunakan persamaan 4.2 diperoleh TMS rele 3P11S2 yang diset menjadi 1. Pada gambar 4.3 dan 4.4, koordinasi antara rele 3P11S2 dengan rele 3P1T2H dan 3P1T3H sudah baik dengan menggunakan kurva karakteristik very inverse yang dibuktikan dengan tidak adanya perpotongan kurva antar rele. Interval waktu kerja rele 3P11S2 dengan rele 3P1T2H dan 3P1T3H berdasarkan gambar 4.3 dan 4.4 masing-masing sebesar 0.4392 detik. Pada gambar 4.3 dan 4.4, waktu kerja rele 3P11S2 sudah dibawah waktu kegagalan (*breakdown*) kabel di penyulang tersebut yang interval waktunya masing-masing sebesar 0.0328 detik.

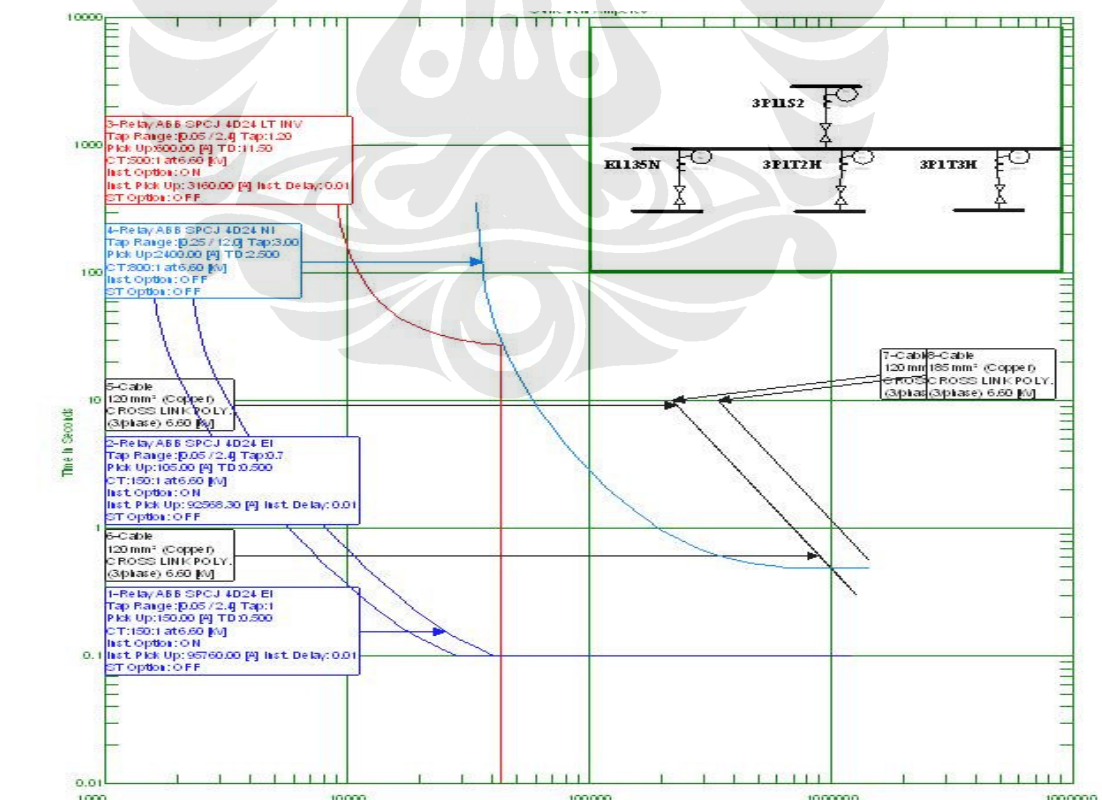
Untuk mendapatkan setting rele 3P11S2 yang berkoordinasi dengan rele E1135N dijelaskan sebagai berikut :

Total waktu kerja rele E1135N adalah 35.0549 detik. Arus setting rele 3P11S2 sebesar 1.2 A. Dengan menggunakan persamaan 4.2 diperoleh TMS rele 3P11S2 yang diset menjadi 11.7. Pada gambar 4.7, koordinasi antara rele 3P11S2 dengan rele E1135N sudah baik dengan menggunakan kurva karakteristik Long Time inverse yang dibuktikan dengan tidak adanya perpotongan kurva antar rele. Interval waktu kerja rele 3P11S2 dengan rele E1135N berdasarkan gambar 4.7 sebesar 0.4739 detik. Pada gambar 4.7, waktu kerja rele 3P11S1 diatas waktu

kegagalan (*breakdown*) kabel di penyulang tersebut yang interval waktunya sebesar 15.9135 detik. Dengan kondisi seperti ini, kabel akan rusak akibat waktu ketahanan maksimum setelah terjadinya gangguan hubung singkat terlewati.

Dengan setingan tersebut, maka koordinasi antara rele 3P11S2 dengan rele 3P1T2H, 3P1T3H dan E1135N tidak baik karena menghasilkan interval waktu kerja antara rele 3P11S2 dengan rele 3P1T2H dan 3P1T3H menjadi sangat besar dan tidak sesuai dengan interval waktu yang seharusnya antara 0.3 s/d 0.5 detik.

Untuk mengatasi masalah tersebut, perlu perubahan kurva karakteristik rele 3P11S2 dengan menggunakan kurva karakteristik normally inverse. Arus setting dan total waktu kerja rele masing-masing sebesar 3 A dan 0.588 detik sehingga TMS diset pada nilai 2.5. Dengan setingan tersebut, maka dihasilkan interval waktu kerja antara rele 3P11S2 dengan rele 3P1T2H dan 3P1T3H sebesar 0.39 detik sedangkan antara rele 3P11S2 dengan rele E1135N sebesar 0.4802 detik. Pada gambar 4.9, waktu kerja rele 3P11S2 dibawah waktu kegagalan (*breakdown*) kabel yang interval waktunya sebesar 0.082 detik.



Gambar 4.9 Kurva koordinasi arus terhadap waktu rele 3P11S2, E1135N, 3P1T2H, 3P1T3H

9. Rele E21152

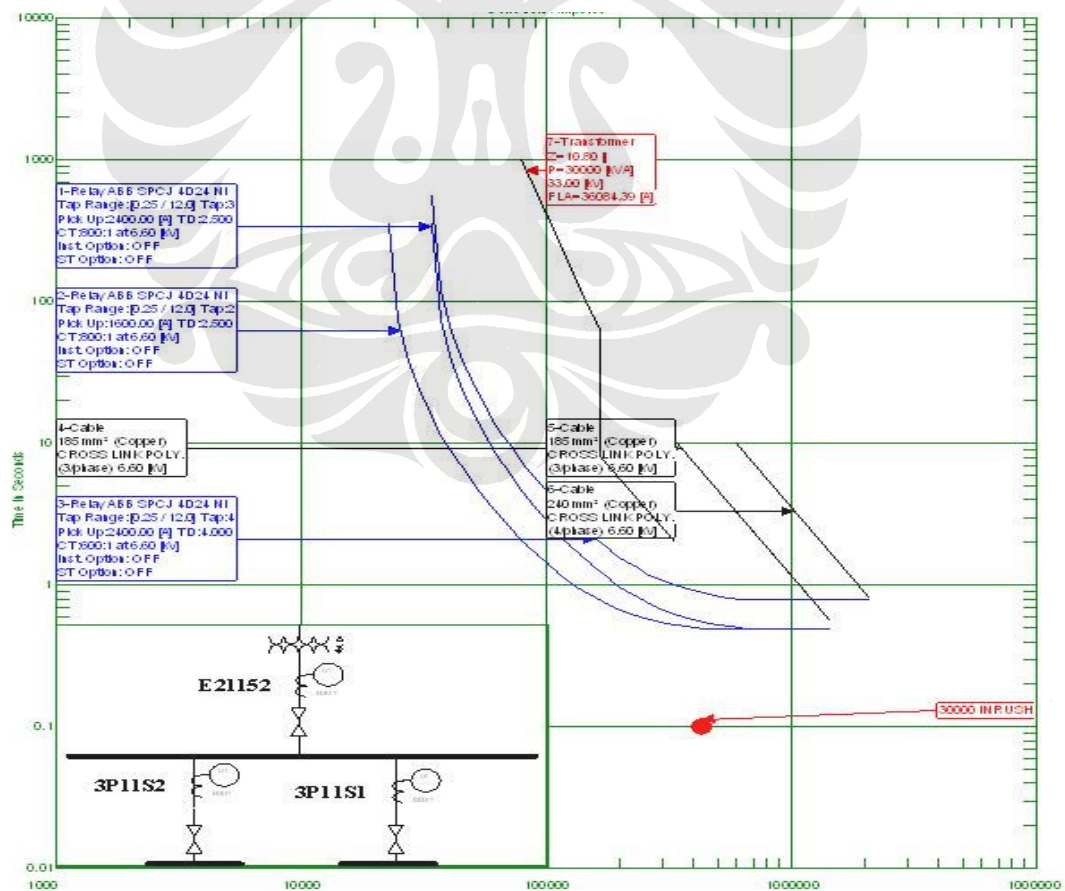
Kurva Karakteristik : Normally inverse

Arus setting : 4 A

TMS : 4

$t_{operasi}$: 0.942 detik

Dengan nilai-nilai seperti diatas koordinasi rele sudah cukup baik antara rele E21152 dengan rele 3P11S1 dan 3P11S2 yang menghasilkan interval waktu kerja 0.2941 detik. Pada gambar 4.10, waktu kerja rele E21152 dibawah waktu kegagalan (*breakdown*) kabel yang interval waktunya sebesar 0.0483 detik dan juga dibawah waktu kerusakan (*damage*) trafo yang interval waktunya sebesar 0.9987 detik. Hal ini membuktikan bahwa setting rele seperti diatas sudah mengamankan kabel dan trafo dari kerusakan di penyulang E21152.



Gambar 4.10 Kurva koordinasi arus terhadap waktu rele E21152, 3P11S1, 3P11S2

4.2 Rele Gangguan Tanah

4.2.1 Setting dan Koordinasi Rele Gangguan Tanah

Rele gangguan tanah hanya bekerja apabila terjadi gangguan hubung singkat yang melibatkan tanah. Hal ini disebabkan rele gangguan tanah mendeteksi adanya arus sisa (residual current). Arus sisa ini muncul jika terdapat adanya arus urutan nol yang mengalir di saluran. Seperti diketahui bahwa rele gangguan tanah tidak akan bekerja pada kondisi normal, maka penyetelan waktu kerja di bagian paling hilir adalah paling cepat. Hal ini dapat dicapai dengan rele waktu seketika dan atau rele waktu terbalik dengan memilih kurva karakteristik yang terendah. Selanjutnya dikoordinasikan dengan rele di penyulang berikutnya dengan interval waktu 0.4 – 0.5 detik. Penentuan tetapan setting pada rele gangguan tanah sama seperti pada rele arus lebih tetapi yang menjadi acuan penentuan besaran setting adalah besarnya gangguan hubung singkat ke tanah. Pada PT Indocement plant XI ini, rele gangguan tanah selalu ada di setiap rele pengaman bertipe ABB SPCJ yang disatukan dengan fungsi pengaman arus lebih waktu terbalik dan waktu seketika.

Dari hasil simulasi gangguan hubung singkat yang berlangsung selama 600 milidetik (30 cycle) diperoleh besarnya arus gangguan hubung singkat ke tanah untuk masing-masing bus sebagai berikut :

Tabel 4.7 Hasil perhitungan arus hubung singkat ke tanah dari bus penyulang motor yang memiliki jumlah arus hubung singkat terbesar

Jala-Jala Listrik 2					
Nama Bus	Tegangan (kV)	Macam Gangguan (dalam kA (rms))			
			L - G		L - L - G
3P1T1H	6.6		37.673		72.652
3P1T2H	6.6		47.904		84.318
3P1T3H	6.6		44.432		78.706
3P1T4H	6.6		37.280		70.190
3P11S1	6.6		58.589		93.046
3P11S2	6.6		75.023		104.186
E1128N	6.6		43.475		81.116

E1135N	6.6	53.723	89.691
E21152	6.6	149.394	146.593

Dari tabel 4.7 diperoleh besarnya arus menuju tanah pada saat gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah dan 2 fasa ke tanah. Arus yang menuju tanah ini biasa juga disebut arus residual. Hal ini dikarenakan arus gangguan ke tanah lebih kecil daripada gangguan fasa akibat impedansi yang tinggi pada tanah tempat konduktor jatuh sehingga arus terus-menerus mengalir dan tidak terdeteksi oleh rele jika rele diset dengan nilai yang tinggi. Oleh karena itu setting pickup paling kecil yang harus digunakan dalam mensetting rele. Menurut IEEE Std C37.96-2000 menyatakan bahwa pickup untuk rele ini adalah kira-kira 2 A. Jika rele tidak sensitif maka arus yang terus mengalir dapat membahayakan bagi manusia yang berada disekitarnya. Setting yang umum dari rele gangguan tanah adalah sebesar 30%-50% (pentanahan solid) dari arus beban maksimum atau arus minimum gangguan hubung singkat ke tanah. Dengan rasio $CT = 150/1$ dan $I_n = 1$ A maka dengan setting rele = 30% dari arus hubung singkat satu fasa ke tanah (arus residual minimum) maka tetapan setting rele adalah (ambil contoh pada penyulang 3P1T1H) : $0.207 \text{ A} < I_{\text{pickup}} < 75.346 \text{ A}$

Dengan cara yang sama dengan diatas maka didapatkan jangkauan setting arus seperti tabel di bawah ini :

Tabel 4.8 Arus setting rele gangguan tanah dengan jangkauan arus batas bawah dan batas atas

nama penyulang	setting rele gangguan tanah (A)	
	arus batas bawah	arus batas atas
3P1T1H	0.207	75.346
3P1T2H	0.15838	95.808
3P1T3H	0.1988	88.864
3P1T4H	0.20292	223.68
3P11S1	0.2483	21.97
3P11S2	0.2267	28.133
E1128N	0.2616	21.7375
E1135N	0.2552	32.2338
E21152	1.4	74.697

Dari hasil perhitungan dan simulasi koordinasi peralatan pengaman di kurva arus dan waktu, diperoleh hasil penyettingan rele gangguan tanah yang akan diuraikan sebagai berikut.

1. Rele 3P1T1H

Kurva Karakteristik : Extremely Inverse

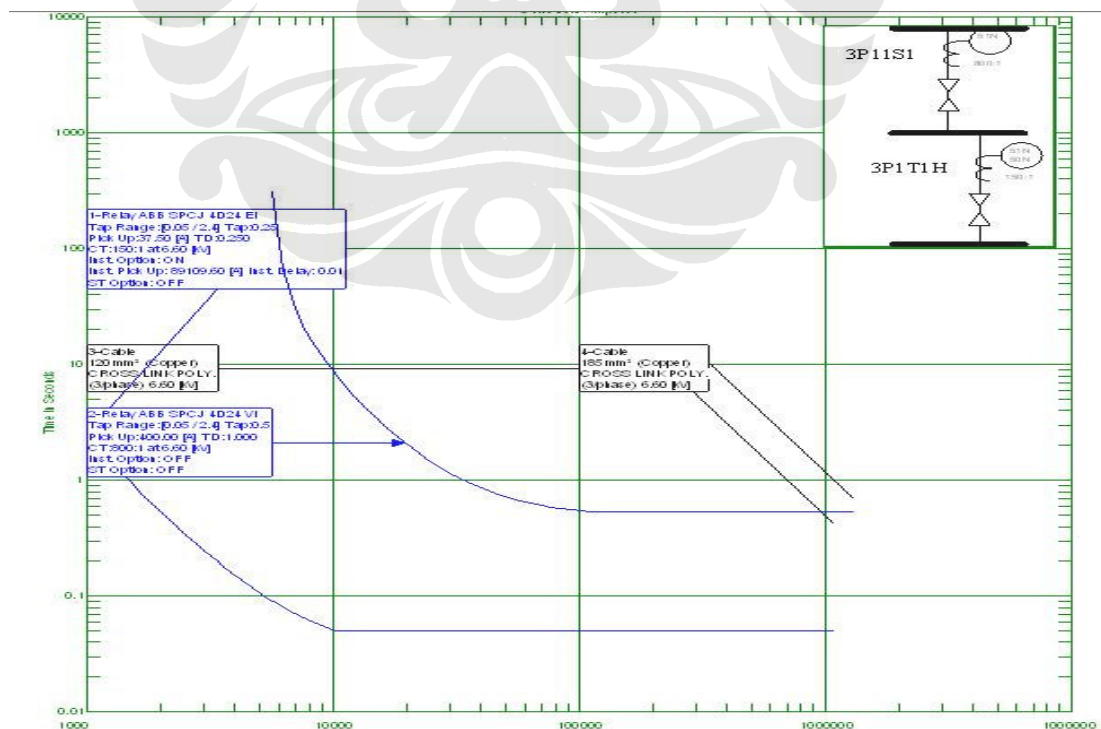
Arus setting : 0.25 A

TMS : 0.25

$t_{operasi}$: 0.06 detik

$I_{instananeous}$: 89109.6 A

TMS dipilih dengan nilai yang cukup terkecil karena letaknya yang paling hilir. Untuk mengamankan kabel di penyulang ini, maka waktu kerja rele ini harus lebih rendah dibandingkan dengan waktu kegagalan (*breakdown*) kabel. Pada gambar 4.11, waktu kerja rele 3P1T1H sudah dibawah waktu kegagalan (*breakdown*) kabel di penyulang tersebut yang interval waktunya sebesar 0.3756 detik.



Gambar 4.11 Kurva koordinasi arus dan waktu rele 3P1T1H dan 3P11S1

2. Rele 3P1T2H

Kurva Karakteristik : Extremely Inverse

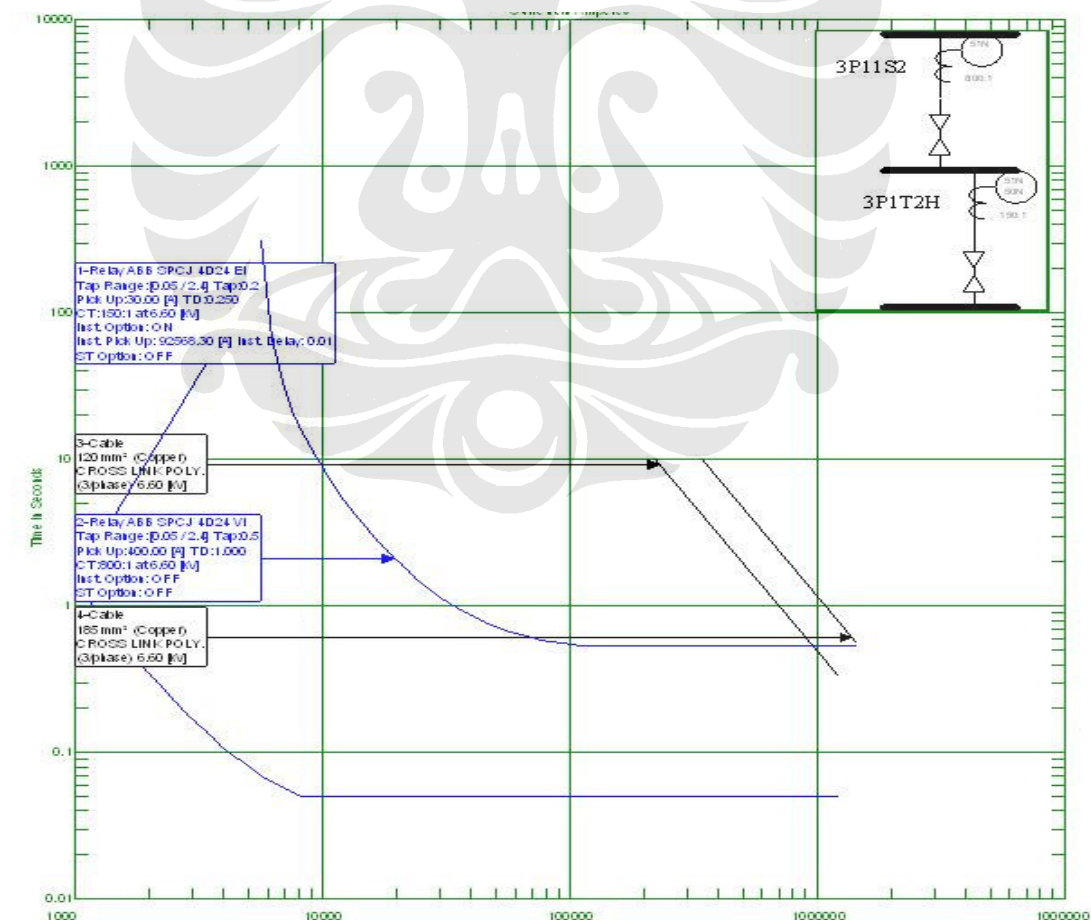
Arus setting : 0.2 A

TMS : 0.25

$t_{operasi}$: 0.06 detik

$I_{instananeous}$: 92568.3 A

TMS dipilih dengan nilai yang cukup terkecil karena letaknya yang paling hilir. Untuk mengamankan kabel di penyulang ini, maka waktu kerja rele ini harus lebih rendah dibandingkan dengan waktu kegagalan (*breakdown*) kabel. Pada gambar 4.12, waktu kerja rele 3P1T2H sudah dibawah waktu kegagalan (*breakdown*) kabel di penyulang tersebut yang interval waktunya sebesar 0.2878 detik.



Gambar 4.12 Kurva koordinasi arus dan waktu rele 3P1T2H dan 3P11S2

3. Rele 3P1T3H

Kurva Karakteristik : Extremely Inverse

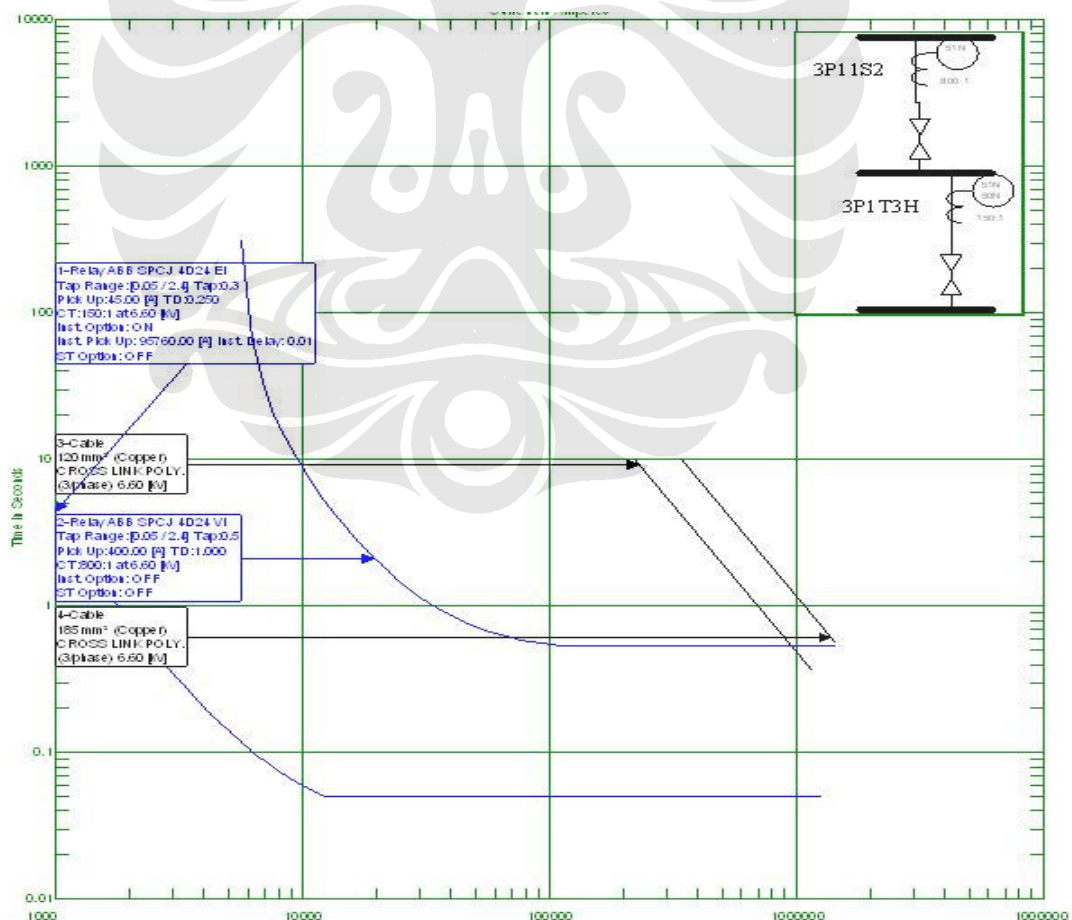
Arus setting : 0.3 A

TMS : 0.25

$t_{operasi}$: 0.06 detik

$I_{instananeous}$: 95760 A

TMS dipilih dengan nilai yang cukup terkecil karena letaknya yang paling hilir. Untuk mengamankan kabel di penyulang ini, maka waktu kerja rele ini harus lebih rendah dibandingkan dengan waktu breakdown kabel. Pada gambar 4.13, waktu kerja rele 3P1T3H sudah dibawah waktu kegagalan (*breakdown*) kabel di penyulang tersebut yang interval waktunya sebesar 0.3202 detik.



Gambar 4.13 Kurva koordinasi arus dan waktu rele 3P1T3H dan 3P11S2

4. Rele 3P1T4H

Kurva Karakteristik : Extremely Inverse

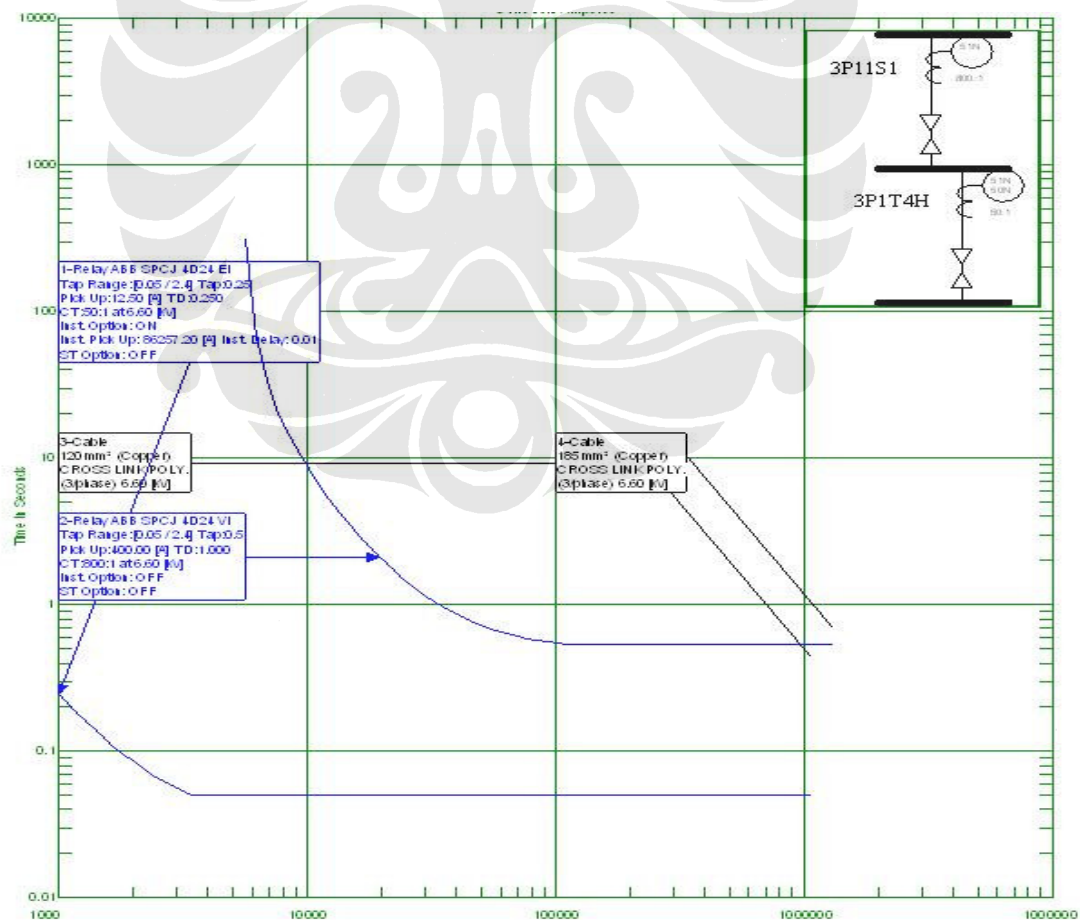
Arus setting : 0.25 A

TMS : 0.25

$t_{operasi}$: 0.06 detik

$I_{instananeous}$: 86257.2 A

TMS dipilih dengan nilai yang cukup terkecil karena letaknya yang paling hilir. Untuk mengamankan kabel di penyulang ini, maka waktu kerja rele ini harus lebih rendah dibandingkan dengan waktu kegagalan (*breakdown*) kabel. Pada gambar 4.14, waktu kerja rele 3P1T4H sudah dibawah waktu kegagalan (*breakdown*) kabel di penyulang tersebut yang interval waktunya sebesar 0.3999 detik.



Gambar 4.14 Kurva koordinasi arus dan waktu rele 3P1T4H dan 3P11S1

5. Rele E1128N

Kurva Karakteristik : Long Time Inverse

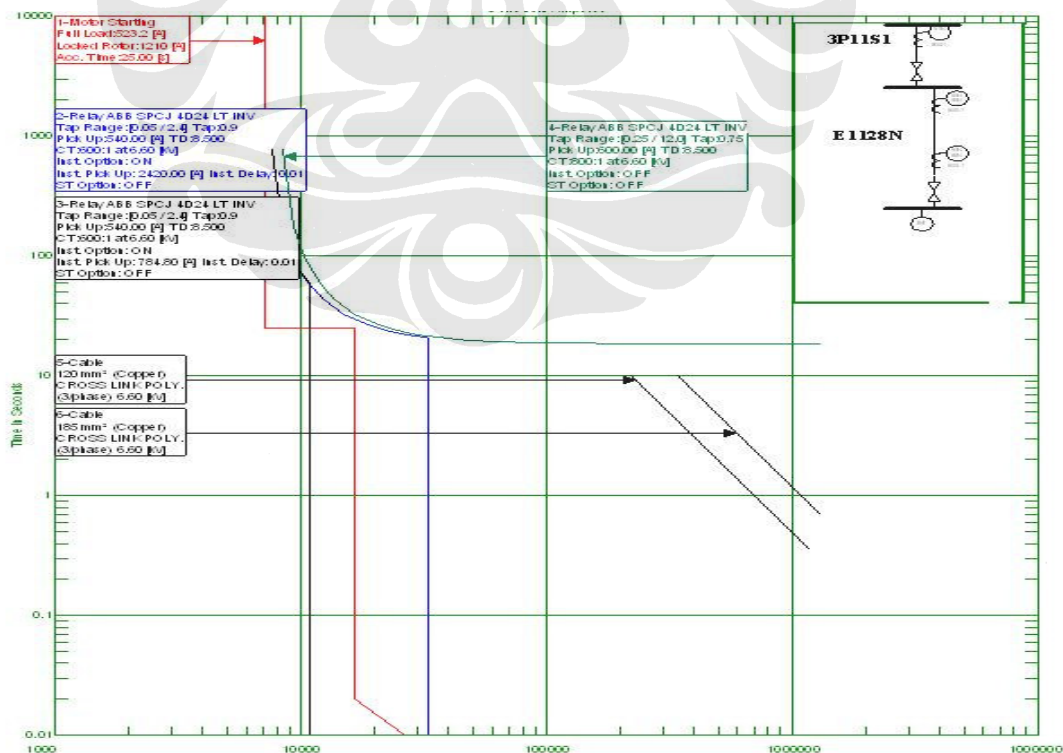
Arus setting : 0.9 A

TMS : 8.5

$t_{operasi}$: 30.1033 detik

$I_{instananeous}$: 2420 A

Dengan menggunakan kurva karakteristik long time inverse dan waktu kerja rele seperti di atas maka sudah cukup memberikan kesempatan motor untuk start karena selisih (margin) antara waktu kerja rele dengan waktu start motor sebesar 5.1033 detik. Untuk mengamankan kabel di penyulang ini, maka waktu kerja rele ini harus lebih rendah dibandingkan dengan waktu kegagalan (*breakdown*) kabel. Pada gambar 4.15, waktu kerja rele E1128N sudah dibawah waktu kegagalan (*breakdown*) kabel di penyulang tersebut yang interval waktunya sebesar 0.3556 detik.



Gambar 4.15 Kurva koordinasi arus dan waktu rele E1128N dan 3P11S1

6. Rele E1135N

Kurva Karakteristik : Long Time Inverse

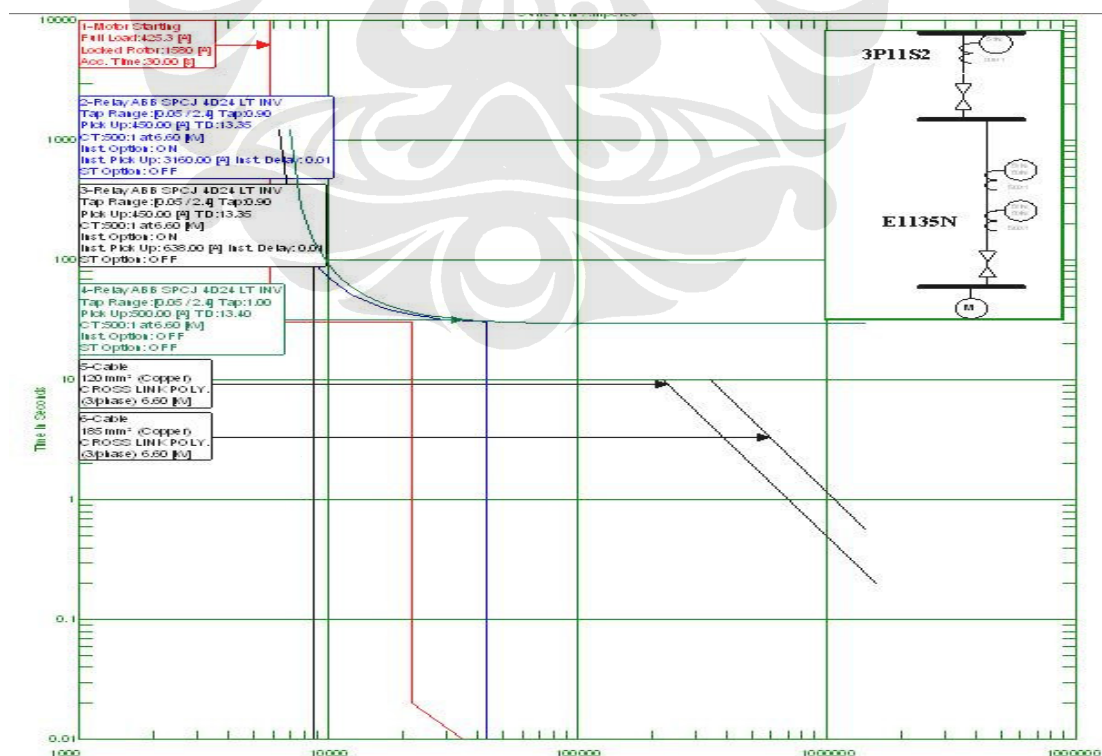
Arus setting : 0.9 A

TMS : 13.35

$t_{operasi}$: 35.0998 detik

$I_{instananeous}$: 3160 A

Dengan menggunakan kurva karakteristik long time inverse dan waktu kerja rele seperti di atas maka sudah cukup memberikan kesempatan motor untuk start karena selisih (margin) antara waktu kerja rele dengan waktu start motor sebesar 5.0998 detik. Untuk mengamankan kabel di penyulang ini, maka waktu kerja rele ini harus lebih rendah dibandingkan dengan waktu kegagalan (*breakdown*) kabel. Pada gambar 4.16, waktu kerja rele E1128N sudah dibawah waktu kegagalan (*breakdown*) kabel di penyulang tersebut yang interval waktunya sebesar 0.2966 detik.



Gambar 4.16 Kurva koordinasi arus dan waktu rele E1135N dan 3P11S2

7. Rele 3P11S1

Kurva Karakteristik : Very inverse

Arus setting : 2.5 A

TMS : 0.8

t_{operasi} : 0.518 detik

Arus gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah pada penyulang ini adalah 58589 A dan arus pada sisi sekunder trafo arus adalah 73.23625 A.

Untuk mendapatkan setting rele 3P11S1 yang berkoordinasi dengan rele 3P1T1H dan 3P1T4H dijelaskan sebagai berikut :

Total waktu kerja rele 3P1T1H dan 3P1T4H berdasarkan hasil simulasi adalah sebesar 0.06 detik. Arus setting rele 3P11S1 sebesar 0.5 A. Dengan menggunakan persamaan 4.2 diperoleh TMS rele 3P11S1 yang diset menjadi 1. Pada gambar 4.11 dan 4.14, koordinasi antara rele 3P11S1 dengan rele 3P1T1H dan 3P1T4H sudah baik dengan menggunakan kurva karakteristik very inverse yang dibuktikan dengan tidak adanya perpotongan kurva antar rele. Interval waktu kerja rele 3P11S1 dengan rele 3P1T1H dan 3P1T4H berdasarkan gambar 4.11 dan 4.14 masing-masing sebesar 0.4893 detik. Pada gambar 4.11 dan 4.14, waktu kerja rele 3P11S1 sudah dibawah waktu kegagalan (*breakdown*) kabel di penyulang tersebut yang interval waktunya masing-masing sebesar 0.1664 detik.

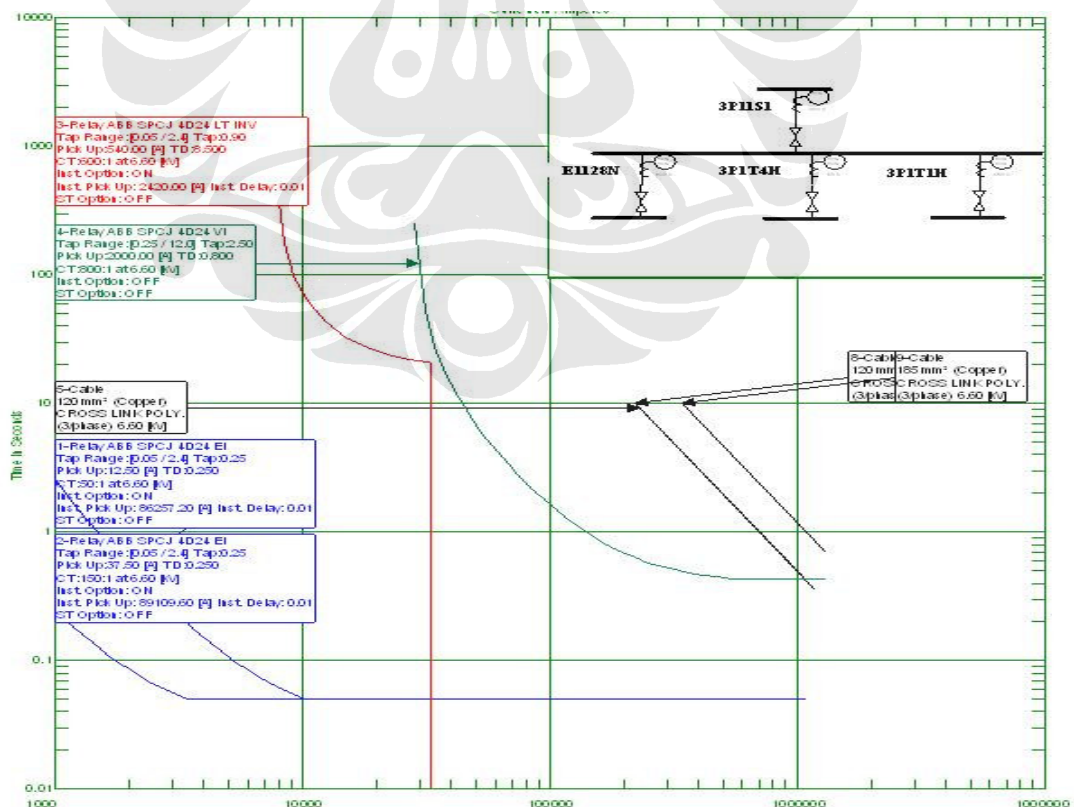
Untuk mendapatkan setting rele 3P11S1 yang berkoordinasi dengan rele E1128N dijelaskan sebagai berikut :

Total waktu kerja rele E1128N adalah 30.1033 detik. Arus setting rele 3P11S1 sebesar 0.75 A. Dengan menggunakan persamaan 4.2 diperoleh TMS rele 3P11S1 yang diset menjadi 8.5. Pada gambar 4.15, koordinasi antara rele 3P11S1 dengan rele E1128N sudah baik dengan menggunakan kurva karakteristik Long Time inverse yang dibuktikan dengan tidak adanya perpotongan kurva antar rele. Interval waktu kerja rele 3P11S1 dengan rele E1128N berdasarkan gambar 4.15 sebesar 0.5734 detik. Pada gambar 4.15, waktu kerja rele 3P11S1 diatas waktu

kegagalan (*breakdown*) kabel di penyulang tersebut yang interval waktunya sebesar 8.8828 detik. Dengan kondisi seperti ini, kabel akan rusak akibat waktu ketahanan maksimum setelah terjadinya gangguan hubung singkat terlewati.

Dengan settingan tersebut, maka koordinasi antara rele 3P11S1 dengan rele 3P1T1H, 3P1T4H dan E1128N tidak baik karena menghasilkan interval waktu kerja antara rele 3P11S1 dengan rele 3P1T1H dan 3P1T4H menjadi sangat besar dan tidak sesuai dengan interval waktu yang seharusnya antara 0.3 s/d 0.5 detik.

Untuk mengatasi masalah tersebut, perlu perubahan kurva karakteristik rele 3P11S1 dengan menggunakan kurva karakteristik very inverse. Arus setting dan total waktu kerja rele masing-masing sebesar 2.5 A dan 0.518 detik sehingga TMS diset pada nilai 0.8. Dengan settingan tersebut, maka dihasilkan interval waktu kerja antara rele 3P11S1 dengan rele 3P1T1H dan 3P1T4H sebesar 0.3814 detik sedangkan antara rele 3P11S1 dengan rele E1128N sebesar 0.4215 detik. Pada gambar 4.17, waktu kerja rele 3P11S1 dibawah waktu kegagalan (*breakdown*) kabel yang interval waktunya sebesar 0.2743 detik.



Gambar 4.17 Kurva koordinasi arus dan waktu rele 3P11S1, E1128N, 3P1T4H, 3P1T1H

8. Rele 3P11S2

Kurva Karakteristik : Very inverse

Arus setting : 3.25 A

TMS : 1

t_{operasi} : 0.648 detik

Arus gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah pada penyulang ini adalah 75023 A dan arus pada sisi sekunder trafo arus adalah 93.77875 A.

Untuk mendapatkan setting rele 3P11S2 yang berkoordinasi dengan rele 3P1T2H dan 3P1T3H dijelaskan sebagai berikut :

Total waktu kerja rele 3P1T2H dan 3P1T3H berdasarkan hasil simulasi adalah sebesar 0.06 detik. Arus setting rele 3P11S2 sebesar 0.5 A. Dengan menggunakan persamaan 4.2 diperoleh TMS rele 3P11S2 yang diset menjadi 1. Pada gambar 4.12 dan 4.13, koordinasi antara rele 3P11S2 dengan rele 3P1T2H dan 3P1T3H sudah baik dengan menggunakan kurva karakteristik very inverse yang dibuktikan dengan tidak adanya perpotongan kurva antar rele. Interval waktu kerja rele 3P11S2 dengan rele 3P1T2H dan 3P1T3H berdasarkan gambar 4.12 dan 4.13 masing-masing sebesar 0.4893 detik. Pada gambar 4.12 dan 4.13, waktu kerja rele 3P11S2 sudah dibawah waktu kegagalan (*breakdown*) kabel di penyulang tersebut yang interval waktunya masing-masing sebesar 0.0328 detik.

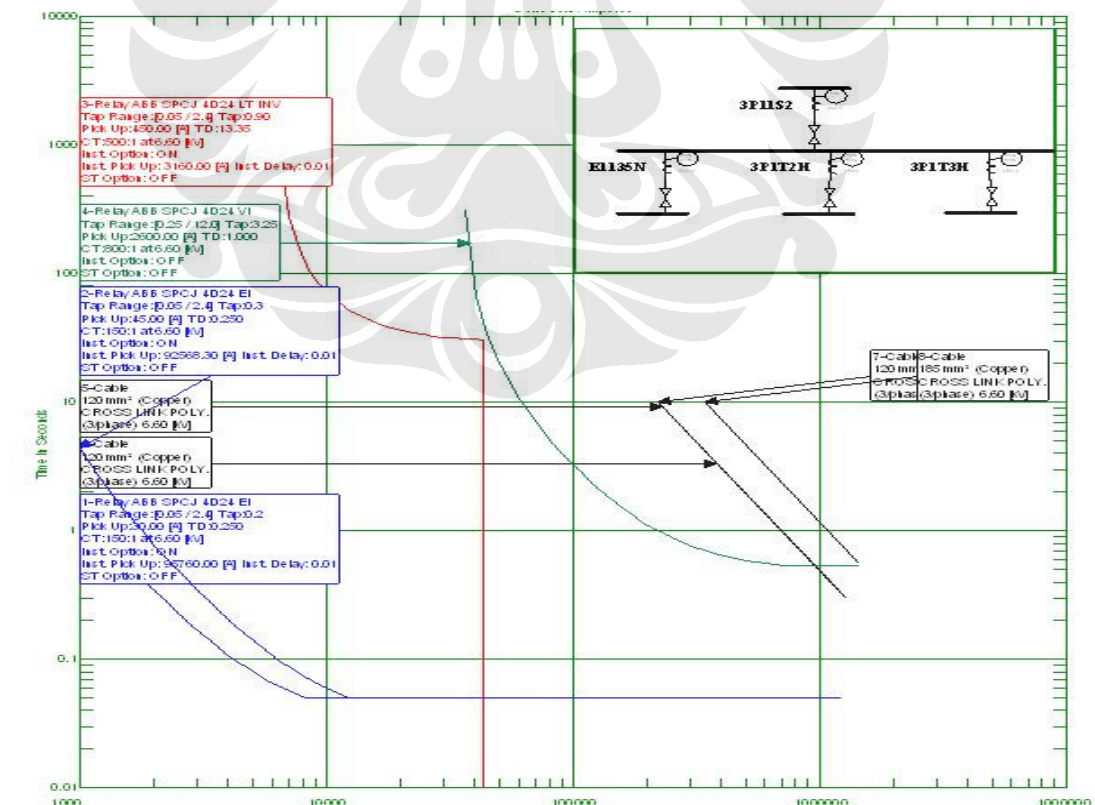
Untuk mendapatkan setting rele 3P11S2 yang berkoordinasi dengan rele E1135N dijelaskan sebagai berikut :

Total waktu kerja rele E1135N adalah 35.0998 detik. Arus setting rele 3P11S2 sebesar 1 A. Dengan menggunakan persamaan 4.2 diperoleh TMS rele 3P11S2 yang diset menjadi 13.4. Pada gambar 4.16, koordinasi antara rele 3P11S2 dengan rele E1135N sudah baik dengan menggunakan kurva karakteristik Long Time inverse yang dibuktikan dengan tidak adanya perpotongan kurva antar rele. Interval waktu kerja rele 3P11S2 dengan rele E1135N berdasarkan gambar 4.16 sebesar 0.4504 detik. Pada gambar 4.16, waktu kerja rele 3P11S2 diatas waktu

kegagalan (*breakdown*) kabel di penyulang tersebut yang interval waktunya sebesar 19.6377 detik. Dengan kondisi seperti ini, kabel akan rusak akibat waktu ketahanan maksimum setelah terjadinya gangguan hubung singkat terlewati.

Dengan settingan tersebut, maka koordinasi antara rele 3P11S2 dengan rele 3P1T2H, 3P1T3H dan E1135N tidak baik karena menghasilkan interval waktu kerja antara rele 3P11S2 dengan rele 3P1T2H dan 3P1T3H menjadi sangat besar dan tidak sesuai dengan interval waktu yang seharusnya antara 0.3 s/d 0.5 detik.

Untuk mengatasi masalah tersebut, perlu perubahan kurva karakteristik rele 3P11S2 dengan menggunakan kurva karakteristik very inverse. Arus setting dan total waktu kerja rele masing-masing sebesar 3.25 A dan 0.648 detik sehingga TMS diset pada nilai 1. Dengan settingan tersebut, maka dihasilkan interval waktu kerja antara rele 3P11S2 dengan rele 3P1T2H dan 3P1T3H sebesar 0.4893 detik sedangkan antara rele 3P11S2 dengan rele E1135N sebesar 0.5294 detik. Pada gambar 4.18, waktu kerja rele 3P11S2 dibawah waktu kegagalan (*breakdown*) kabel yang interval waktunya sebesar 0.0328 detik.



Gambar 4.18 Kurva koordinasi arus dan waktu rele 3P11S2, E1135N, 3P1T2H, 3P1T3H

9. Rele E21152

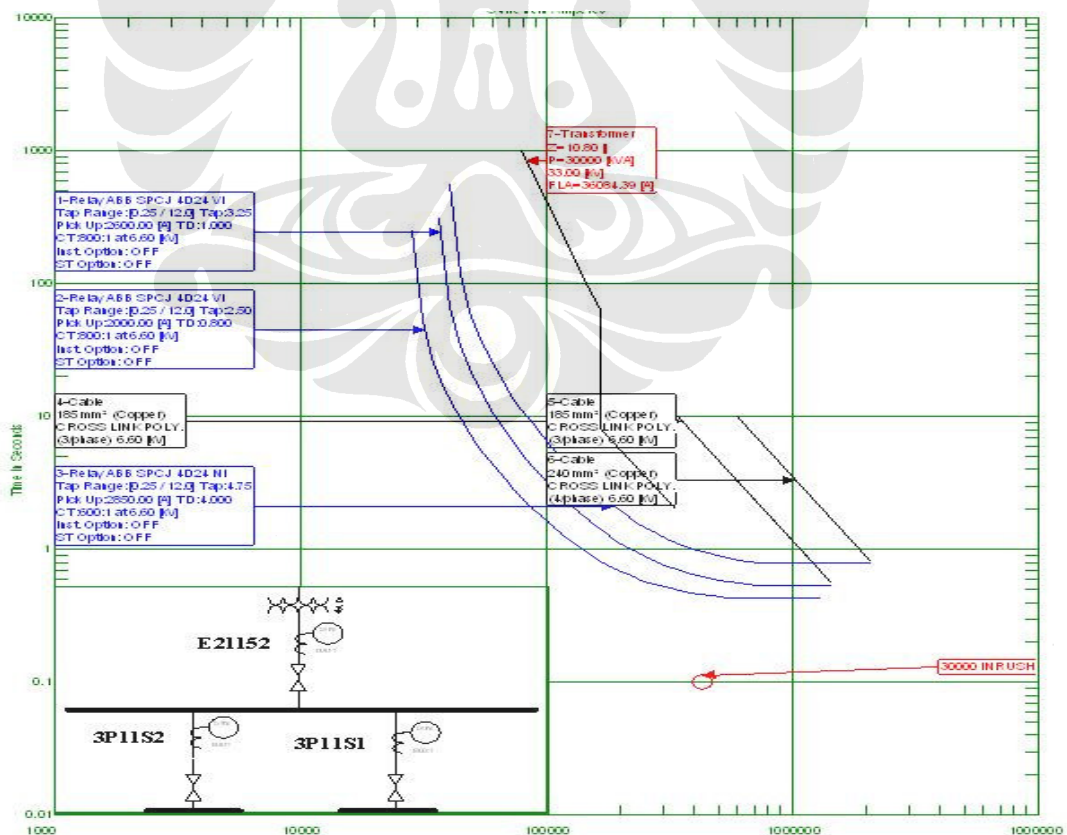
Kurva Karakteristik : Normally inverse

Arus setting : 4.75 A

TMS : 4

$t_{operasi}$: 0.942 detik

Dengan nilai-nilai seperti diatas koordinasi rele sudah cukup baik antara rele E21152 dan rele 3P11S1 menghasilkan interval waktu kerja 0.3528 detik sedangkan antara rele E21152 dan rele 3P11S2 menghasilkan interval waktu kerja sebesar 0.2449 detik. Pada gambar 4.19, waktu kerja rele E21152 dibawah waktu kegagalan (*breakdown*) kabel yang interval waktunya sebesar 0.0483 detik dan juga dibawah waktu kerusakan (*damage*) trafo yang interval waktunya sebesar 0.8743 detik. Hal ini membuktikan bahwa setting rele seperti diatas sudah mengamankan kabel dan trafo dari kerusakan di penyulang E21152.



Gambar 4.19 Kurva koordinasi arus dan waktu rele E21152, 3P11S1, 3P11S2

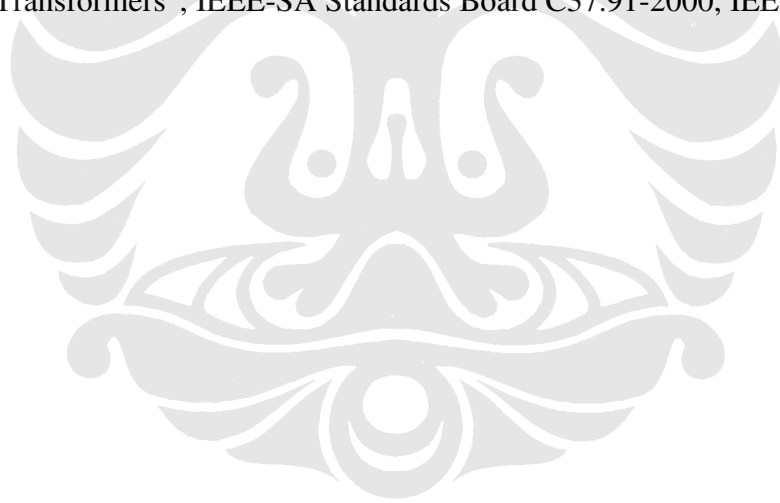
BAB 5

KESIMPULAN

1. Rele arus lebih waktu terbalik jenis *long time inverse* pada rele E1128N dan E1135N digunakan untuk mendapatkan pengaman rotor terkunci yang sensitif dan selisih waktu kerja rele pada waktu start motor dengan waktu start motor sebesar 5 detik. Ini sesuai dengan standar IEEE C37.96-2000.
2. Rele arus lebih waktu seketika jenis *high dropout* mencegah rele arus lebih waktu terbalik bekerja ketika motor start.
3. Rele arus lebih waktu terbalik jenis *normally inverse* pada rele 3P11S1 dan 3P11S2 digunakan untuk mendapatkan diskriminasi waktu sebesar 0.4 s/d 0.5 detik antara rele tersebut dengan rele penyulang motor yang berjenis *long time inverse* dan rele penyulang trafo yang berjenis *extremely inverse*
4. Rele gangguan tanah waktu terbalik jenis *very inverse* pada rele 3P11S1 dan 3P11S2 digunakan untuk mendapatkan diskriminasi waktu sebesar 0.4 s/d 0.5 detik antara rele tersebut dengan rele penyulang motor yang berjenis *long time inverse* dan rele penyulang trafo yang berjenis *extremely inverse*.
5. Usulan setting dan koordinasi rele arus lebih dan rele gangguan tanah yang sensitif dan selektif dapat diterapkan di PT Indocement Plant XI untuk mengamankan motor induksi, kabel dan trafo.

DAFTAR ACUAN

- [1] T.A. Short, *Electric Power Distribution Handbook* (New York : CRC Press, 2004).
- [2] Stephen J. Chapman, *Electric Machinery And Power System Fundamentals* (New York : Mcgraw Hill, 1999).
- [3] GEC Measurements, “*Protective Relay Application Guide*”, Stafford England
- [4] P.M. Anderson, *Power System Protection* (New York: IEEE Press, 1999).
- [5] Luces M. Faulkenberry, Walter Coffey, *Electrical Power Distribution and Transmission* (New Jersey : Prentice-Hall Inc. 1996).
- [6] Industrial and Commercial Power Systems Department of the IEEE Industry Application Society, “IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems”, IEEE-SA Standards Board 242-2001, IEEE, 2001
- [7] Power System Relaying Committee of the IEEE Power Engineering Society, “IEEE Guide for AC Motor Protection”, IEEE-SA Standards Board C37.96-2000, IEEE, 2000
- [8] Power System Relaying Committee of the IEEE Power Engineering Society, “IEEE Guide for Protective Relay Applications to Power Transformers”, IEEE-SA Standards Board C37.91-2000, IEEE, 2000



DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, P.M., “*Power System Protection*”, IEEE Press, New York, 1999.
- Chapman, Stephen J., “*Electric Machinery And Power System Fundamentals*”, Mcgraw Hill, New York, 1999.
- Faulkenberry, Luces M., Coffey, Walter., “*Electrical Power Distribution and Transmission.*”, Prentice-Hall Inc, New Jersey, 1996.
- Industrial and Commercial Power Systems Department of the IEEE Industry Application Society, “IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems”, IEEE-SA Standards Board 242-2001, IEEE, 2001
- Power System Relaying Committee of the IEEE Power Engineering Society, “IEEE Guide for AC Motor Protection”, IEEE-SA Standards Board C37.96-2000, IEEE, 2000
- Power System Relaying Committee of the IEEE Power Engineering Society, “IEEE Guide for Protective Relay Applications to Power Transformers”, IEEE-SA Standards Board C37.91-2000, IEEE, 2000
- Short, T.A. , “*Electric Power Distribution Handbook.*”, CRC Press, New York, 2004.
- Reinhard, Welly, “Studi Koordinasi Sistem Pengaman Motor Induksi dan Pengembangannya Studi Kasus Cooling Water Pump (CWP) di PT. Badak NGL, Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2006.
- Rinaldy D and Agung Firmansyah, “Studi Koordinasi Rele Proteksi di Pengeboran Minyak Mudi Field – Tuban”, Paper, Jurusan Elektro FTUI, Depok, 1999.
- Yanto, Teddy., “Evaluasi Sistem Proteksi Dan Keandalan JTM Kota Jakarta.”, Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 1986.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Spesifikasi Motor E1135

ABB		Title		Draw No.	
		Tech. Specification Liquid Starters		HIBA 402 300	
Issued by department:	Date:	Language:	Register No.:	Revision:	Page:
CHIND / IBPM	16.04.98	en	00K AB 34	B	6/16

LIQUID STARTER FOR THE MOTOR ITEM No.: E11-35 Asset Code: K322-1R1
Service: Exhaust Fan

2.2 Design:

type of starter	:	6260.026/7-SP
speed variation (%)	:	none
z - number of consecutive starts from cold	:	13 - 4 [9] [with preset t_s]
h - permissible number of starts (1/h)	:	2,1 - 0,64 [1,3] [with preset t_s]
f - severity of start	:	1,0
capacity of electrolyte (l)	:	2.870
maximum electrode voltage (V)	:	1.600
maximum electrode current (A)	:	1.600
starting work at ambient temp. of 40°C (kJ)	:	60.000 ($t_s = 30s, f = 1,0$)
t_s - starting time range (s)	:	20 - 60 [30s] [preset]
resistance ratio R_{min} / R_{max}	:	1 / 60
continuous dissipation losses (kW)	:	24
data of setting drive	:	3 x 400 V, 50 Hz, 0,75 kW
data of space heater	:	220 VAC, 200 W
data of electrolyte heater	:	-
main dimensions		
max. length (mm)	:	2.700
max. width (mm)	:	1.720
max. height (mm)	:	2.350
weight		
without electrolyte (kg)	:	2.200
electrolyte (l = kg)	:	2.870
dimension drawing	:	6260.026/7-SP
Paint coating	:	RAL 7032, min. 80µm

Accessories:

- start - stop sequence control
- timing relay for starting time supervision
- frequency converter to adjust starting time
- thermostat for electrolyte temperatur supervision, alarm and trip setting
- proximity switch / limit switch for setting range
- limit switch for interlocking emergency hand wheel
- short-circuit contactor with necessary control circuitry
- space heater
- drain cock
- sodium carbonate for two fillings

Motor data:

nominal power (kW)	:	4.000
nominal speed (rpm)	:	1.000
rotor voltage (V)	:	1.500
rotor current (A)	:	1.580
rotor + load inertia J (kgm ²)	:	6.500

(lanjutan)

Lampiran 2 Spesifikasi Motor E1128

ABB		Title		Draw No.	
		Tech. Specification Liquid Starters		HIBA 402 300	
Issued by department:	Date:	Language:	Register No.:	Revision:	Page:
CHIND / IBPM	16.04.98	en	00K AB 34	B	5/16

2. TYPE SPECIFICATIONS
LIQUID STARTER FOR THE MOTOR ITEM No.: E11-28 Asset Code: K361-1R1
Service: Raw Mill Main Drive

2.1 Design:

type of starter	:	6260.026/7-SP
speed variation (%)	:	none
z - number of consecutive starts from cold	:	10 - 2 [5] [with preset t_a]
h - permissible number of starts (1/h)	:	1,6 - 0,33 [1,0] [with preset t_a]
f - severity of start	:	1,4
capacity of electrolyte (l)	:	2.870
maximum electrode voltage (V)	:	4.000
maximum electrode current (A)	:	1.600
starting work at ambient temp. of 40°C (kJ)	:	87.500 ($t_a = 25s, f = 1,4$)
t_a^* - starting time range (s)	:	15 - 60 [25s] [preset]
resistance ratio R_{min} / R_{max}	:	1 / 60
continuous dissipation losses (kW)	:	24
data of setting drive	:	3 x 400 V, 50 Hz, 0,75 kW
data of space heater	:	220 VAC, 200 W
data of electrolyte heater	:	-
main dimensions		
max. length (mm)	:	2.700
max. width (mm)	:	1.720
max. height (mm)	:	2.350
weight		
without electrolyte (kg)	:	2.200
electrolyte (l = kg)	:	2.870
dimension drawing	:	6260.026/7-SP
Paint coating	:	RAL 7032, min. 80µm
Accessories:		
start - stop sequence control		
timing relay for starting time supervision		
frequency converter to adjust starting time		
thermostate for electrolyte temperatur supervision, alarm and trip setting		
proximity switch / limit switch for setting range		
limit switch for interlocking emergency hand wheel		
short-circuit contactor with necessary control circuitry		
space heater		
drain cock		
sodium carbonate for two fillings		
Motor data:		
nominal power (kW)	:	5,000
nominal speed (rpm)	:	750
rotor voltage (V)	:	2.500
rotor current (A)	:	1.210
rotor + load inertia J (kgm ²)	:	1.653

(lanjutan)

Lampiran 3 Spesifikasi Kabel

Three-core power cable with insulation of cross-linked polyethylene Type N2XSEY 6/10kV Umax 12kV

The cross-section to specification VDE 0273 of Union of Europe countries and IEC 602, taking into account our works in carried out according to values depending on frequency refer to U₀ = 10 MV/3.

Nominal cross-section	35	50	70	95	120	150	185	240
Form of conductor	circular strands							
Form of conductor	3x...	3x...	3x...	3x...	3x...	3x...	3x...	3x...
Number of conductors	3	3	3	3	3	3	3	3
Thickness of insulation (mm)	7,0	8,2	9,9	11,5	13,0	14,5	16,1	18,6
Thickness of insulation (mm)	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4
Diameter of minimum wire (mm)	14,6	16,0	17,7	19,3	20,8	22,3	23,9	26,4
Diameter of maximum wire (mm)	17,3	18,5	20,2	21,8	23,8	25,3	26,9	29,4
Geometric cross section (mm ²)	19	19	19	19	19	19	19	19
Thickness of PVC-sheath of conductor (mm)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Outer diameter approx. (mm)	47	49	53	57	61	65	69	73
Bending radius min. (m)	0,70	0,75	0,85	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15
Weight of cable approx. (kg/km)	3050	3250	3450	3650	3850	4050	4250	4450
Weight of cable approx. (kg/km)	3050	3250	3450	3650	3850	4050	4250	4450
Material	Copper	Copper	Copper	Copper	Aluminum	Aluminum	Aluminum	Aluminum
Material weight (kg/km)	1200	1450	1750	2050	2350	2650	2950	3250
Material weight (kg/km)	450	550	650	750	850	950	1050	1150
Normal manufacturing length (m)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Break diameter of drum (m)	2,24	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Width of drum (m)	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48

Maximum voltage U ₀ /U _m (kV)	35	50	70	95	120	150	185	240
Maximum voltage U ₀ /U _m (kV)	12	12	12	12	12	12	12	12
Maximum voltage U ₀ /U _m (kV)	0,183	0,207	0,248	0,289	0,330	0,371	0,412	0,453
Maximum direct current, conductor resistance (Ω/km)	0,594	0,594	0,594	0,594	0,594	0,594	0,594	0,594
Maximum direct current, conductor resistance (Ω/km)	0,041	0,041	0,041	0,041	0,041	0,041	0,041	0,041
Maximum direct current, conductor resistance (Ω/km)	0,22	0,25	0,28	0,31	0,34	0,37	0,41	0,45
Maximum direct current, conductor resistance (Ω/km)	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Loss current to earth of three-phase system (A/km)	1,2	1,4	1,5	1,7	1,9	2,0	2,2	2,4
Inductance (mH/km)	0,38	0,38	0,34	0,32	0,31	0,30	0,29	0,28
Charging power of three-phase system (kVA/km)	7	8	9	10	11	12	13	14
I _{abc} short-circuit current per phase (kA)	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
I _{abc} short-circuit current per phase after cable laying, beam isolated with Pmax (kA)	5,0	7,3	10,1	13,7	17,3	20,9	24,5	28,1
Current capacity (A)	178	210	258	306	354	402	450	498
Current capacity (A)	178	210	258	306	354	402	450	498
Current capacity (A)	178	210	258	306	354	402	450	498
Current capacity (A)	178	210	258	306	354	402	450	498
Current capacity (A)	178	210	258	306	354	402	450	498
Current capacity (A)	178	210	258	306	354	402	450	498

* only with copper conductor

Depth of laying	0,7 m
Air temperature	30° C
Soil temperature	30° C
Specific thermal resistivity of soil	1 K·m/W
Admissible conductor temperature	90 °C
Admissible short-circuit conductor temperature	250 °C
Admissible short-circuit system temperature	350° C
Laying in air, load factor	m = 0,7
Laying in air, load factor	m = 0,0

The given values refer to the following conditions:

(lanjutan)

Lampiran 4 Spesifikasi Trafo

INDOCEMENT HEIDELBERGCEMENT Group		Database Electrical Equipment			
		Electrical Department - Plant.11 PT Indocement Tungal Prakarsa tbk			
Trafo		Motor	Panel	Hoist	Ups
		AC			
		Save	Delete	New	Print Form
		Dga		Print History	
IAC	K_E111T2	Vector Group	Dyn11	Year	1997
Item No		Cooling Methode	ONAN	Manufacturer	ABB
Description	Feeder Transformer No 2 for Raw Mill, Kiln Area				
Power-kVA	33000	Impedance Voltage	10.8 %	Total Weight	42800
Primary Voltage-V	33000	Secondary Voltage-V	6600	Weight of Oil	8850
Primary Ampere-I	466.5	Secondary Ampere-I	2624	Type of Oil	Shell Diela D
Primary Cable Size	400mm ² -1Cx3	Secondary Cable Size	Bus Duct	Serial No	801 120.ABB
Type of Trafo	TCHK	Load-kW		Bucholz Relay	
Insulation Level	LI 170AC70	Load Factor		Temperature	
Connection Diagram		Form Factor		Location	MSS
Incoming MCC		Rated - A		Actual Current - A	
HISTORY					
1 - 05-2006 Baut cover trafo dan cover bushing besch (cek by Quaddro) -06-2006 Ganti Gasket HV = 3 set Ganti Gasket LV = 4 set Ganti Gasket Bushing Arde = 1 set Ganti Gasket Freezer Trafo = 1 set Ganti oil Tap changer OLTC & Flushing = 300 Ltr Counter tap changer = 006421					

(lanjutan)

Lampiran 5 Data Impedansi Kabel

***** P O S C O D A M *****									
P 11 - INDOCEMENT		HIBA 402 355/21-REV.2			File : INDOCEM2.PEE				
LINE/BUS COUPLER DATA				Date : 17-04-98 Time : 09:54:25					
act	elem name	node 1	Un	Sr	X1	R1	Cy	length	
pu	line	node 2		Is	X0	RO	Cy0	temp 0	
			(kV)	MVA; kA	[Ω/km]	[Ω/km]	[μF/km]	km; °C	
Y	CABV01	E111S1	33.000	30.000	0.094	0.046	0.570	0.052	
N	Y	E111H		0.00	0.062	1.000	0.570	145.000	
Y	CABV02	E111S2	33.000	30.000	0.094	0.046	0.570	0.044	
N	Y	E111H		0.00	0.062	1.000	0.570	145.000	
Y	BDUCT01	E111L	6.600	30.000	0.020	0.012	2.250	0.010	
N	Y	E211S1		0.00	0.144	0.218	2.250	145.000	
Y	BDUCT02	E111L	6.600	30.000	0.020	0.012	2.250	0.010	
N	Y	E211S2		0.00	0.144	0.218	2.250	145.000	
Y	BUSCUMV	E211S1	6.600	30.000	0.020	0.012	2.250	0.004	
N	Y	E211S2		0.00	0.144	0.218	2.250	145.000	
Y	CAB03	E211S1	6.600	8.000	0.044	0.037	0.900	0.039	
N	Y	E211H		0.00	0.435	0.550	0.900	145.000	
Y	CAB04	E211S1	6.600	2.000	0.097	0.153	0.340	0.203	
N	Y	2P11S2		0.00	1.280	1.250	0.340	145.000	
Y	CAB05	E211S1	6.600	12.000	0.022	0.019	1.800	0.397	
N	Y	5P21S1		0.00	0.220	0.275	1.800	145.000	
Y	CAB06	E211S1	6.600	12.000	0.022	0.019	1.800	0.401	
N	Y	5P11S1		0.00	0.220	0.275	1.800	145.000	
Y	CAB07	E211S1	6.600	2.000	0.101	0.193	0.310	0.520	
N	Y	6P11S1		0.00	1.380	1.300	0.310	145.000	
Y	CAB08	E211S1	6.600	0.500	0.097	0.153	0.340	0.052	
N	Y	E211H		0.00	1.280	1.250	0.340	145.000	
Y	CAB09	E211S2	6.600	1.000	0.097	0.153	0.340	0.061	
N	Y	E411H		0.00	1.280	1.250	0.340	145.000	
Y	CAB10	E211S2	6.600	2.000	0.097	0.153	0.340	0.082	
N	Y	E211H		0.00	1.280	1.250	0.340	145.000	
Y	CAB11	E211S2	6.600	8.600	0.029	0.025	1.350	0.154	
N	Y	4P11S1		0.00	0.290	0.370	1.350	145.000	
Y	CAB12	E211S2	6.600	3.600	0.088	0.075	0.450	0.152	
N	Y	LP11S1		0.00	0.870	1.100	0.450	145.000	
Y	CAB13	E211S2	6.600	7.200	0.044	0.037	0.900	0.250	
N	Y	4P11S2		0.00	0.440	0.550	0.900	145.000	
Y	CAB14	E211S2	6.600	8.000	0.044	0.037	0.900	0.166	
N	Y	3P11S1		0.00	0.440	0.550	0.900	145.000	

(lanjutan)

Lampiran 6 Data Impedansi Kabel

***** P O S C O D A M *****									
P 11 - INDOCEMENT		HIBA 402 355/21-REV.2		File : INDOCER2.PEE					
LINE/BUS COUPLER DATA				Date : 17-04-98 Time : 09:54:26					
act	elem name	node 1	Un	Sr	X1	R1	Cy	length	
pu	line	node 2		Is	X0	R0	Cy0	temp	
			[kV]	MVA; kA	[Ω /km]	[Ω /km]	[μ F/km]	km; °C	
Y	CAB15	E211S2	6.600	8.200	0.029	0.025	1.350	0.165	
N	Y	3P11S2		0.00	0.290	0.370	1.350	145.000	
Y	CAB16	E211S2	6.600	12.000	0.029	0.025	1.350	0.031	
N	Y	E21C2N		0.00	0.290	0.370	1.350	145.000	
Y	CAB17	2P11S2	6.600	1.000	0.101	0.193	0.310	0.816	
N	Y	2P1T1H		0.00	1.380	1.300	0.310	145.000	
Y	CAB18	2P11S2	6.600	1.000	0.101	0.193	0.310	0.032	
N	Y	2P1T2H		0.00	1.380	1.300	0.310	145.000	
Y	CAB19	5P21S1	6.600	5.000	0.045	0.049	0.820	0.083	
N	Y	N1210N		0.00	0.52	0.580	0.820	145.000	
Y	CAB20	5P21S1	6.600	2.900	0.091	0.099	0.410	0.123	
N	Y	N1205N		0.00	1.030	1.160	0.410	145.000	
Y	CAB21	5P21S1	6.600	0.400	0.097	0.153	0.340	0.053	
N	Y	5P2T2H		0.00	1.180	1.340	0.340	145.000	
Y	CAB22	5P21S1	6.600	1.000	0.097	0.153	0.340	0.108	
N	Y	N1216N		0.00	1.180	1.340	0.340	145.000	
Y	CAB23	5P21S1	6.600	1.600	0.097	0.153	0.340	0.050	
N	Y	5P2T1H		0.00	1.280	1.250	0.340	145.000	
Y	CAB24	5P11S1	6.600	6.000	0.045	0.049	0.820	0.098	
N	Y	N1110N		0.00	0.520	0.580	0.820	145.000	
Y	CAB25	5P11S1	6.600	2.900	0.091	0.099	0.410	0.114	
N	Y	N1105N		0.00	1.030	1.160	0.410	145.000	
Y	CAB26	5P11S1	6.600	0.400	0.113	0.387	0.250	0.047	
N	Y	5P1T2H		0.00	1.610	1.540	0.250	145.000	
Y	CAB27	5P11S1	6.600	1.000	0.113	0.387	0.250	0.125	
N	Y	N1116N		0.00	1.610	1.540	0.250	145.000	
Y	CAB28	5P11S1	6.600	0.600	0.113	0.387	0.250	0.458	
N	Y	D1404N		0.00	1.610	1.540	0.250	145.000	
Y	CAB29	5P11S1	6.600	1.600	0.097	0.153	0.340	0.039	
N	Y	5P1T1H		0.00	1.280	1.250	0.340	145.000	
Y	CAB30	6P11S1	6.600	2.000	0.101	0.193	0.310	0.038	
N	Y	6P1T1H		0.00	1.380	1.300	0.310	145.000	
Y	CAB31	4P11S1	6.600	2.500	0.091	0.099	0.410	0.045	
N	Y	4P1T6H		0.00	1.030	1.160	0.410	145.000	

(lanjutan)

Lampiran 7 Data Impedansi Kabel

***** P O S C O D A M *****									
P 11 - INDOCEMENT HIBA 402 355/21-REV.2 File : INDOCER2.PEE									
LINE/BUS COUPLER DATA Date : 17-04-98 Time : 09:54:26									

act	elem name	node 1	Un	Sr	X1	R1	Cy	length	
pu	line	node 2	[kV]	Is	X0	R0	Cy0	temp 0	
				MVA; kA	[Ω/km]	[Ω/km]	[μF/km]	km; °C	
Y	CAB32	4P11S1	6.600	2.500	0.091	0.099	0.410	0.045	
N	Y	4P1T7H		0.00	1.030	1.160	0.410	145.000	
Y	CAB33	4P11S1	6.600	2.000	0.094	0.124	0.370	0.063	
N	Y	4P1T8H		0.00	1.160	1.210	0.370	145.000	
Y	CAB34	4P11S1	6.600	1.600	0.097	0.153	0.340	0.056	
N	Y	4P1T1H		0.00	1.280	1.250	0.340	145.000	
Y	CAB35	LP11S1	6.600	1.000	0.113	0.387	0.250	0.166	
N	Y	SS108N		0.00	1.610	1.540	0.250	145.000	
Y	CAB36	LP11S1	6.600	1.000	0.113	0.387	0.250	0.178	
N	Y	SS113N		0.00	1.610	1.540	0.250	145.000	
Y	CAB37	LP11S1	6.600	1.600	0.097	0.153	0.340	0.051	
N	Y	LP1T1H		0.00	1.280	1.250	0.340	145.000	
Y	CAB38	4P11S2	6.600	0.800	0.113	0.387	0.250	0.051	
N	Y	4P1T9H		0.00	1.610	1.540	0.250	145.000	
Y	CAB39	4P11S2	6.600	1.600	0.107	0.268	0.280	0.056	
N	Y	4P1T2H		0.00	1.490	1.400	0.280	145.000	
Y	CAB40	4P11S2	6.600	1.600	0.107	0.268	0.280	0.058	
N	Y	4P1T3H		0.00	1.490	1.400	0.280	145.000	
Y	CAB41	4P11S2	6.600	1.600	0.107	0.268	0.280	0.047	
N	Y	4P1T4H		0.00	1.490	1.400	0.280	145.000	
Y	CAB42	4P11S2	6.600	1.600	0.107	0.268	0.280	0.049	
N	Y	4P1T5H		0.00	1.490	1.400	0.280	145.000	
Y	CAB43	3P11S1	6.600	6.000	0.044	0.038	0.900	0.086	
N	Y	E1120N		0.00	0.435	0.550	0.900	145.000	
Y	CAB44	3P11S1	6.600	0.400	0.113	0.387	0.250	0.040	
N	Y	3P1T4H		0.00	1.610	1.540	0.250	145.000	
Y	CAB45	3P11S1	6.600	1.600	0.107	0.268	0.280	0.044	
N	Y	3P1T1H		0.00	1.490	1.400	0.280	145.000	
Y	CAB46	3P11S2	6.600	5.000	0.042	0.062	0.740	0.065	
N	Y	E1135N		0.00	0.580	0.605	0.740	145.000	
Y	CAB47	3P11S2	6.600	1.600	0.097	0.153	0.340	0.043	
N	Y	3P1T2H		0.00	1.180	1.340	0.340	145.000	
Y	CAB48	3P11S2	6.600	1.600	0.107	0.268	0.280	0.043	
N	Y	3P1T3H		0.00	1.495	1.400	0.280	145.000	

(lanjutan)

Lampiran 8 Diagram Satu Garis

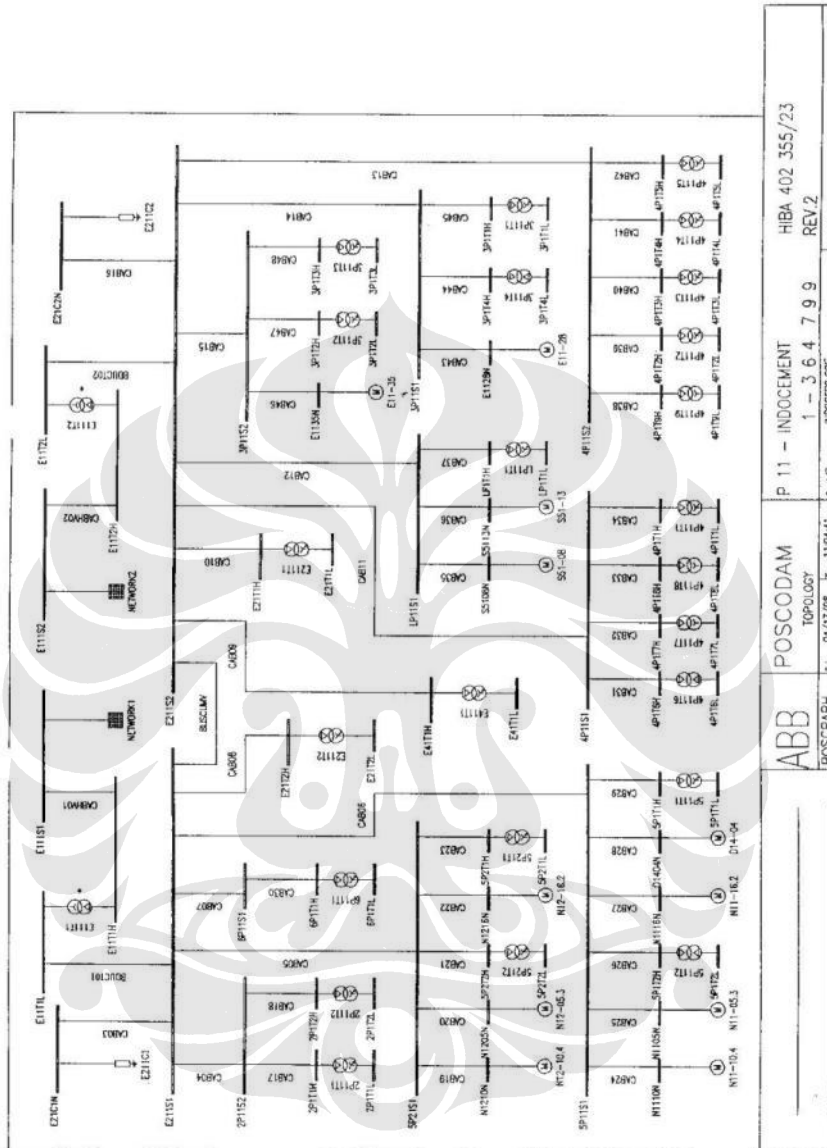


ABB	POSCODAM TOPOLOGY	P 11 - INDOCEMENT 1 - 3.6.4. 7.9.9 INDOCEMENT	HIBA 402.355/23 REV.2