



UNIVERSITAS INDONESIA

**PERANCANGAN SISTEM KOORDINASI RELE PROTEKSI
PADA PERENCANAAN JARINGAN DISTRIBUSI RING DI
EMP MALACCA STRAIT DENGAN MENGGUNAKAN RELE
ARUS LEBIH BERARAH**

SKRIPSI

diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

ARIF WIRAWAN

0606073770

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
DESEMBER 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Arif Wirawan

NPM : 0606073770

Tanda Tangan : 

Tanggal : 30 Desember 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Arif Wirawan
NPM : 0606073770
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : PERANCANGAN SISTEM KOORDINASI RELE PROTEKSI PADA PERENCANAAN JARINGAN DISTRIBUSI RING DI EMP MALACCA STRAIT DENGAN MENGGUNAKAN RELE ARUS LEBIH BERARAH

Telah berhasil dipertahankan di hadapan 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

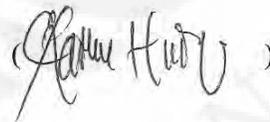
Pembimbing : Ir. Amien Rahardjo, MT



Penguji : Aji Nur Widyanto, ST, MT



Penguji : Chairul Hudaya, ST, M.Sc



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 30 Desember 2010

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya panjatkan hanya kepada Allah SWT, karena atas berkah dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak dari masa perkuliahan hingga saat penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk dapat menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ir. Amien Rahardjo, MT., selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk membimbing saya dalam penulisan skripsi ini.
2. Ibu, yang senantiasa mendoakan yang terbaik untuk anaknya ini agar mimpi-mimpinya bisa terwujud.
3. Bapak, Abang, Kakak, dan keponakanku Kayla yang telah memberikan dukungan baik moril maupun materiil.
4. Mas Agung Widyantoro, selaku mentor selama penulis melaksanakan Program Tugas Akhir di PT Energi Mega Persada.
5. Pak Subaga, Pak Tanjung, Pak Miftah, Mas Andhy, Mas Aji, Mas Hadi, Bang Kosmar, Mas Budi, Pak Agus, Pak Imam, dan seluruh karyawan PT Energi Mega Persada terutama Divisi Operation Engineering yang tidak bisa saya sebutkan satu-persatu.
6. Mbak Yunike dari HRD yang telah mengurus segala administrasi saya sehingga saya bisa mendapat kesempatan untuk TA dan KP di PT Energi Mega Persada.
7. Teman-teman asisten Lab TTPL: Chairy Wahyu Winanti (bandar duit yang dermawati, walau suka labil juga), Wilman (yang jarang ngaca karena takut nerima kenyataan), Andigan (pakar download segala macam file), Bestion (yg pinter niruin orang buat becandaan), Ari (tempat numpang kalo lagi males ke kontrakan), Daniel (tempat ngeprint gratis), Pungkie (sering nyetel lagu ama nyanyi2 sampe bikin pusing), Pandu

(yang sering bawa rombongan PES bikin lab jadi rame), dan Hermawan (kadang2 masih suka ke lab buat ngasi sedekahan). Terima kasih karena telah menjadi bagian dari keluarga Lab TTPL. Semoga kita semua bisa bertemu lagi di lain kesempatan.

8. Syukron Ma'mun, teman seperjuangan gatrik angkatan 45, tempat nebeng tiap pulang ke kontrakan yang menghabiskan waktu 30 menit kalo ditempuh dengan berjalan kaki.
9. Bu Iis beserta keluarga, tempat saya menumpang selama kuliah 5.5 tahun sejak masih di Matematika UI. Maafkan saya bu jika jarang bayar kontrakan. Nanti kalau saya sudah bekerja kapan-kapan akan main ke sana lagi.
10. Mbak Nur, yang telah memberikan saya laptop sehingga saya bisa mengerjakan tugas-tugas kuliah dan skripsi ini.

Dan semua pihak yang telah membantu saya dalam penulisan skripsi ini namun tidak dapat saya sebutkan satu persatu, saya ucapkan terima kasih dan semoga Allah SWT membalas kebaikan semuanya.

Penulis

**HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI SKRIPSI UNTUK
KEPENTINGAN AKADEMIS**

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

Nama : Arif Wirawan
NPM : 0606073770
Program Studi : Teknik Elektro
Departemen : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

**PERANCANGAN SISTEM KOORDINASI RELE PROTEKSI PADA
PERENCANAAN JARINGAN DISTRIBUSI RING DI EMP MALACCA
STRAIT DENGAN MENGGUNAKAN RELE ARUS LEBIH BERARAH**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non-eksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan skripsi 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: 17 Desember 2010

Yang menyatakan,



(Arif Wirawan)

ABSTRAK

Nama : Arif Wirawan
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : PERANCANGAN SISTEM KOORDINASI RELE PROTEKSI PADA PERENCANAAN JARINGAN DISTRIBUSI RING DI EMP MALACCA STRAIT DENGAN MENGGUNAKAN RELE ARUS LEBIH BERARAH

Perubahan bentuk jaringan distribusi dari radial menjadi ring mengakibatkan perubahan setting koordinasi rele proteksi. Salah satu akibat perubahan tersebut adalah penggunaan rele arus lebih berarah. Untuk menentukan setting rele arah ini, langkah-langkah yang dilakukan adalah dengan melakukan studi aliran daya untuk menentukan arus beban maksimum yang melewati rele. Kemudian dilakukan perhitungan arus gangguan hubung singkat untuk menentukan setting arus pada rele. Selanjutnya adalah menentukan arah kerja rele. Skripsi ini akan membahas perancangan sistem koordinasi rele proteksi pada perencanaan jaringan distribusi ring di EMP Malacca Strait dengan menggunakan rele arus lebih berarah. Dari hasil simulasi didapatkan bahwa koordinasi antar rele telah bekerja sesuai dengan kriteria, yaitu waktu kerja antar rele berkisar 0.3 – 0.4 detik.

Kata kunci: rele arus lebih berarah, sistem koordinasi proteksi, jaringan distribusi ring

ABSTRACT

Name : Arif Wirawan
Major : Electrical Engineering
Title : DESIGN OF PROTECTIVE RELAYING
COORDINATION SYSTEM FOR RING DISTRIBUTION
NETWORK PLANNING IN EMP MALACCA STRAIT
BY USING DIRECTIONAL OVERCURRENT RELAY

Changes in the form of radial distribution network into the ring resulted in changes in the coordination of relay protection settings. One result of these changes is the use of directional relay. To determine the directional relay settings, the steps taken is to conduct power flow studies to determine the maximum load current passing through the relay. We then performed a short circuit fault current calculation to determine the current settings on the relay. Further work is to determine the direction of relay. This thesis will discuss the coordination of relay protection system design on the ring distribution network planning in EMP Malacca Strait by using the directional relay. From the simulation results is found that coordination between the relay has been working in accordance with the criteria, i.e. work time between the relay range 0.3 - 0.4 seconds.

Keyword: directional overcurrent relay, protection coordination system, ring distribution network

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan.....	2
1.3 Pembatasan Masalah.....	2
1.4 Metode Penulisan.....	3
1.5 Sistematika Penulisan.....	3
BAB 2 DASAR TEORI	
2.1 Gangguan Hubung Singkat.....	4
2.1.1 Hubung Singkat.....	4
2.1.2 Komponen Simetri.....	7
2.1.3 Jenis dan Analisa Gangguan.....	11
2.2 Proteksi Sistem Tenaga Listrik.....	16
2.2.1 Pengertian Dasar.....	16
2.2.2 Daerah Pengamanan.....	17

2.3	Komponen Dasar pada Sistem Proteksi.....	18
2.4	Trafo Pengukuran.....	19
2.4.1	Trafo Arus.....	19
2.4.2	Trafo Tegangan.....	22
2.5	Rele Arus Lebih Berarah.....	24
2.5.1	Umum.....	24
2.5.2	Prinsip Kerja Rele Arus Lebih Berarah.....	25
2.5.3	Hubungan 90 – 60 untuk Rele Fasa.....	30
2.5.4	Hubungan 90 – 60 untuk Rele Tanah.....	32
2.5.5	Koordinasi Rele.....	33
2.6	Studi Aliran Daya.....	34
2.6.1	Umum.....	34
2.6.2	Metode Perhitungan Aliran Beban pada ETAP.....	35

BAB 3 PERANCANGAN SETTING RELE ARUS LEBIH BERARAH

3.1	Umum.....	39
3.2	Spesifikasi Kabel yang Digunakan pada Rencana Jaringan Ring.....	41
3.3	Langkah- langkah Perancangan Sistem Proteksi.....	41
3.4	Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat.....	44
3.5	Perhitungan Setting Arus dan Waktu Kerja Rele Arus Lebih.....	45
3.6	Rencana Konfigurasi Rele Proteksi.....	46
3.7	Perhitungan Arus Beban Maksimum.....	47
3.8	Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat untuk Setting Rele.....	48
3.9	Arus Hubung Singkat Maksimum dan Minimum untuk Setting Rele... ..	50
3.10	Penentuan Setting Trafo Arus dan Trafo Tegangan.....	51
3.11	Penyetelan Nilai Arus untuk Rele Fasa dan Rele Tanah.....	51
3.12	Penentuan Time Multiplier Setting.....	53

BAB 4 HASIL SIMULASI KOORDINASI RELE ARUS LEBIH BERARAH.....	55
10.1 Penyetelan Rele pada Jaringan Radial (Existing).....	55
10.2 Penyetelan Rele pada Jaringan Ring.....	56
10.3 Hasil Simulasi Koordinasi Rele Proteksi.....	57
4.3.1 Titik Gangguan pada Cable A.....	57
4.3.2 Titik Gangguan pada Cable B.....	59
4.3.3 Titik Gangguan pada Cable C.....	61
4.3.4 Titik Gangguan pada Cable D.....	63
4.4 Perbandingan Kualitas Tegangan Jaringan Radial dan Ring.....	65
4.4.1 Kualitas Tegangan pada Jaringan Existing (radial).....	65
4.4.2 Kualitas Tegangan pada Jaringan Planning (ring).....	66
4.5 Studi Aliran Daya Saat Terjadi Gangguan pada Cable D.....	68
BAB 5 KESIMPULAN.....	71
DAFTAR ACUAN.....	72
DAFTAR PUSTAKA.....	73
LAMPIRAN.....	75

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Rangkaian tiga fasa seimbang dengan jalur pentanahan.....	4
Gambar 2.2 Arus Hubung Singkat.....	7
Gambar 2.3 Komponen urutan positif.....	8
Gambar 2.4 Komponen urutan negatif.....	8
Gambar 2.5 Komponen urutan nol.....	9
Gambar 2.6 Sistem tak seimbang yang dibangun dari komponen simetri....	11
Gambar 2.7 Rangkaian generator tanpa beban dengan netral ditanahkan melalui impedansi Z_n dan gangguan terjadi pada fasa A ke tanah melalui impedansi Z_f	12
Gambar 2.8 Rangkaian urutan untuk hubung singkat 1 fasa ke tanah.....	12
Gambar 2.9 Rangkaian generator tanpa beban dengan netral ditanahkan melalui impedansi Z_n dan gangguan terjadi antara fasa A dan fasa B melalui impedansi Z_f	13
Gambar 2.10 Rangkaian urutan untuk hubung singkat 2 fasa.....	13
Gambar 2.11 Rangkaian generator tanpa beban dengan netral ditanahkan melalui impedansi Z_n dan gangguan terjadi antara fasa A dan fasa B ke tanah melalui impedansi Z_f	14
Gambar 2.12 Rangkaian urutan untuk hubung singkat dua fasa ke tanah...	14
Gambar 2.13 Rangkaian generator tanpa beban dengan netral yang ditanahkan langsung dan terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa.....	15
Gambar 2.14 Rangkaian urutan untuk hubung singkat 3 fasa.....	15
Gambar 2.15 Pembagian zona proteksi.....	18
Gambar 2.16 Rangkaian CT.....	20
Gambar 2.17 Diagram vektor CT.....	21
Gambar 2.18 Rangkaian VT.....	23
Gambar 2.19 Diagram vektor VT.....	23
Gambar 2.20 Arah arus gangguan pada jaringan dengan sumber dari kedua ujung saluran.....	24

Gambar 2.21 Prinsip dasar elemen arah pada rele.....	26
Gambar 2.22 Rele arah tipe induksi.....	27
Gambar 2.23 Rele arah hubungan 30^0	28
Gambar 2.24 Rele arah hubungan 60^0	28
Gambar 2.25 Rele arah hubungan 90^0 (30^0 AMT).....	29
Gambar 2.26 Rele arah hubungan 90^0 (45^0 AMT).....	30
Gambar 2.27 Rele arah hubungan $90^0 - 60^0$	31
Gambar 2.28 Rele arah hubungan $90^0 - 60^0$ untuk gangguan tanah.....	32
Gambar 2.29 Karakteristik rele definite.....	33
Gambar 2.30 Karakteristik rele inverse.....	34
Gambar 3.1 Rencana perubahan sistem jaringan distribusi di Kurau.....	39
Gambar 3.2 Diagram alir perancangan rele proteksi.....	43
Gambar 3.3 Bentuk jaringan dan rencana konfigurasi rele.....	47
Gambar 3.4 Arus beban maksimum yang melewati rele pada jaringan ring	48
Gambar 3.5 Titik terjadinya gangguan hubung singkat.....	50
Gambar 4.1 Konfigurasi rele arus lebih jaringan existing.....	55
Gambar 4.2 Rencana konfigurasi rele arus lebih pada jaringan ring.....	56
Gambar 4.3 Titik gangguan antara SWGR201 dan PS3AC2.....	58
Gambar 4.4 Titik gangguan antara PS3AC2 dan PS4AC3.....	60
Gambar 4.5 Titik gangguan antara PS4AC3 dan PS5BG1.....	62
Gambar 4.6 Titik gangguan antara PS5BG1 dan SWGR201.....	64
Gambar 4.7 Diagram satu garis jaringan existing.....	65
Gambar 4.8 Diagram satu garis planning sistem jaringan ring.....	67
Gambar 4.9 Diagram satu garis saat terjadi gangguan pada Cable D.....	68

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Frekuensi gangguan pada sistem tenaga listrik.....	4
Tabel 3.1 Konstanta ANSI/IEEE dan IEC untuk standar rele arus lebih.....	46
Tabel 3.2 Arus beban maksimum yang melewati rele.....	48
Tabel 3.3 Arus gangguan minimum 30 cycle yang melewati rele.....	50
Tabel 3.4 Penyetelan arus pada rele fasa.....	52
Tabel 3.5 Penyetelan arus pada rele tanah.....	52
Tabel 3.6 Penyetelan TMS pada rele fasa.....	53
Tabel 3.7 Penyetelan TMS pada rele tanah.....	54
Tabel 4.1 Setting rele pada jaringan radial.....	55
Tabel 4.2 Setting rele pada perencanaan jaringan ring.....	57
Tabel 4.3 Hasil simulasi koordinasi rele fasa pada kasus F_{1a}	59
Tabel 4.4 Hasil simulasi koordinasi rele tanah pada kasus F_{1a}	59
Tabel 4.5 Hasil simulasi koordinasi rele fasa pada kasus F_{2a}	60
Tabel 4.6 Hasil simulasi koordinasi rele tanah pada kasus F_{2a}	61
Tabel 4.7 Hasil simulasi koordinasi rele fasa pada kasus F_{2b}	61
Tabel 4.8 Hasil simulasi koordinasi rele tanah pada kasus F_{2b}	61
Tabel 4.9 Hasil simulasi koordinasi rele fasa pada kasus F_{3a}	62
Tabel 4.10 Hasil simulasi koordinasi rele tanah pada kasus F_{3a}	62
Tabel 4.11 Hasil simulasi koordinasi rele fasa pada kasus F_{3b}	63
Tabel 4.12 Hasil simulasi koordinasi rele tanah pada kasus F_{3b}	63
Tabel 4.13 Hasil simulasi koordinasi rele fasa pada kasus F_{4a}	64
Tabel 4.14 Hasil simulasi koordinasi rele tanah pada kasus F_{4a}	64
Tabel 4.15 Hasil aliran daya untuk jaringan existing.....	66
Tabel 4.16 Hasil aliran daya untuk planning jaringan ring.....	67

Tabel 4.17 Hasil aliran daya saat terjadi gangguan pada Cable D.....69

Tabel 4.18 Perbandingan hasil aliran daya setelah rekomendasi.....69



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Suatu sistem tenaga listrik biasanya terdiri dari tiga bagian utama, yaitu pembangkitan, transmisi, dan distribusi daya listrik. Energi listrik dibangkitkan di pembangkit tenaga listrik, lalu ditransmisikan untuk kemudian didistribusikan ke beban-beban. Namun dalam pelaksanaannya, sistem tenaga listrik sangat rentan terhadap gangguan. Sumber gangguan ini bisa berupa gangguan dari luar, misalnya petir, dan gangguan dari dalam sistem, misalnya overload atau beban lebih.

Peralatan yang digunakan dalam suatu sistem tenaga listrik kebanyakan merupakan peralatan yang sangat mahal. Oleh karena itu, keamanan dan keandalan dari sistem tenaga listrik merupakan hal yang sangat penting. Sistem tenaga listrik harus mampu beroperasi dalam kondisi yang aman setiap waktu. Hal ini bertujuan untuk melindungi keselamatan personel dan melindungi peralatan dari kerusakan.

Namun, sebaik apa pun suatu sistem tenaga listrik dibangun, gangguan akan selalu terjadi pada sistem, dan gangguan ini membawa risiko bagi keselamatan personel dan juga peralatan. Mencegah terjadinya gangguan merupakan hal yang tidak mungkin bisa sepenuhnya dilakukan. Oleh karena itu salah satu cara untuk melindungi sistem tenaga listrik adalah dengan cara meminimalkan dampak/kerusakan yang terjadi akibat gangguan.

Untuk itulah maka dalam suatu sistem tenaga listrik, sistem proteksi merupakan hal yang mutlak untuk diperhatikan. Salah satu bagian dalam sistem proteksi adalah penggunaan rele untuk pengamanan dari arus gangguan berlebih. Arus lebih bisa menimbulkan kerusakan pada peralatan akibat panas yang ditimbulkannya. Rele ini akan bekerja jika terjadi arus berlebih akibat gangguan.

Untuk meningkatkan keandalan, fleksibilitas operasi, dan mutu suplai listrik ke beban cluster, maka EMP Malacca Strait akan menerapkan sistem jaringan

distribusi ring pada jaringan 13.8 kV di Kurau. Bus yang akan dihubungkan agar sistem menjadi ring adalah antara bus PS3-AC2 dan bus PS4-AC3.

Oleh karena itu, diperlukan peninjauan ulang mengenai setting dari sistem proteksi rele saat ini yang digunakan dalam jaringan radial. Penambahan saluran baru tentu akan memberikan pengaruh terhadap analisa aliran daya dan arus hubung singkat yang mungkin terjadi. Studi arus hubung singkat yang didapat dari sistem ring kemudian digunakan untuk menyetel rele pada sistem baru.

Skripsi ini akan membahas mengenai perancangan koordinasi sistem proteksi pada perencanaan jaringan distribusi ring di EMP Malacca Strait dengan menggunakan rele arus lebih berarah. Lalu kemudian akan dianalisa mengenai pengaruh dari perubahan bentuk jaringan terhadap aliran daya pada sistem.

1.2 Tujuan Skripsi

Adapun tujuan dari penulisan skripsi ini adalah untuk merancang setting rele arus berarah yang akan digunakan dalam perencanaan jaringan distribusi ring di EMP Malacca Strait.

1.3 Pembatasan Masalah

Skripsi ini difokuskan pada simulasi saluran distribusi ring 13.8 kV yang ada dalam sistem distribusi di Kurau dengan asumsi sebagai berikut:

1. Analisa aliran daya, gangguan hubung singkat, dan koordinasi rele proteksi dilakukan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak ETAP 6
2. Standar yang digunakan adalah ANSI/IEEE Standard.
3. Pembahasan difokuskan pada sistem distribusi di Kurau, yaitu meliputi bus PS3AC2, PS4AC3, dan PS5BG1
4. Saluran distribusi yang akan dihubungkan sehingga menjadi sistem ring adalah antara bus PS3AC2 dan PS4AC3 dengan menggunakan kabel bawah tanah sepanjang 1.2 km
5. Simulasi dilakukan pada kondisi pembangkitan maksimum yaitu dengan pembangkitan dan beban seluruhnya beroperasi
6. Gangguan hubung singkat difokuskan pada jenis gangguan hubung singkat tiga fasa dan satu fasa ke tanah

7. Rele yang akan digunakan dalam konfigurasi sistem proteksi adalah rele SEL 351 yang diproduksi oleh Schweitzer Engineering Laboratories
8. Rele yang digunakan merupakan rele dengan karakteristik waktu terbalik (inverse)

1.4 Metode Penulisan

Penulisan skripsi ini dilakukan dengan metode studi literatur, yaitu dengan mengumpulkan bahan yang berkaitan dengan sistem proteksi pada jaringan ring. Kemudian dilakukan simulasi aliran daya dan hubung singkat untuk mendapatkan nilai yang diperlukan dalam menentukan setting rele. Hasil setting pada rele kemudian akan disimulasikan kembali untuk mengevaluasi koordinasi sistem proteksi.

1.5 Sistematika Penulisan

Skripsi ini dalam penyusunannya terbagi ke dalam lima bab. Bab 1 merupakan pendahuluan yang berisi latar belakang dan tujuan penulisan yang hendak dicapai. Bab 2 merupakan dasar teori yang akan digunakan dalam penulisan skripsi ini, antara lain mengenai gangguan hubung singkat, cara kerja rele arah, dan aliran daya. Bab 3 berisi perancangan sistem proteksi yang akan disimulasikan dengan ETAP. Bab 4 merupakan hasil dari simulasi koordinasi rele dan aliran daya untuk tiap kasus gangguan. Semua itu akan ditutup dengan Bab 5 yang berisi kesimpulan.

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 Gangguan Hubung Singkat [4]

Gangguan hubung singkat merupakan peristiwa bertemunya kontak antara satu atau lebih konduktor ke tanah atau ke konduktor lainnya. Gangguan hubung singkat merupakan jenis gangguan yang paling sering terjadi pada sistem tenaga listrik. Hal ini dikarenakan konduktor biasanya yang paling banyak kontak dengan lingkungan sekitar, sehingga sangat rentan mengalami gangguan. Gangguan ini bisa berupa yang berasal dari alam, misalnya petir, angin, es, gempa bumi, kebakaran, objek-objek terbang, kontak dengan hewan liar, dan lain sebagainya. Berikut merupakan kisaran banyaknya gangguan hubung singkat yang terjadi berdasarkan tipe gangguan:

Tabel 2.1 Frekuensi gangguan pada sistem tenaga listrik

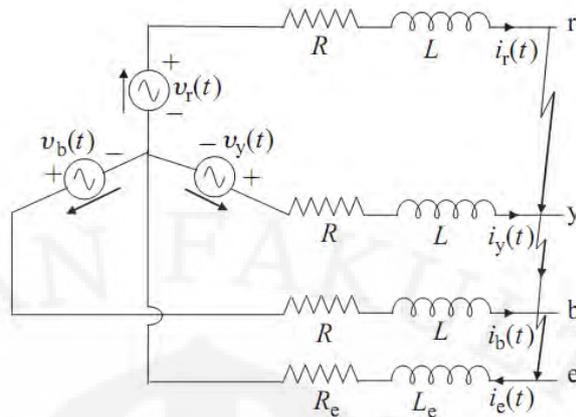
Jenis gangguan	Frekuensi kejadian
Satu fasa ke tanah (L – G)	70% - 80%
Fasa ke fasa ke tanah (L – L – G)	17% - 10%
Fasa ke fasa	10% - 8%
Tiga fasa	3% - 2%

Sumber: Protective Relaying: Principles and Application. Blackburn (2007, hal. 34)

Penjelasan mengenai jenis gangguan ini akan diterangkan pada bagian selanjutnya pada sub bab jenis gangguan hubung singkat.

2.1.1 Hubung singkat [11]

Gambar 2.1 adalah sebuah rangkaian tiga fasa sederhana di mana L dan R merupakan induktansi dan resistansi rangkaian per fasa, dan L_e dan R_e merupakan induktansi dan resistansi pada jalur pentanahan.



Gambar 2.1 Rangkaian tiga fasa seimbang dengan jalur pentanahan

Sumber: Power System Modelling and Fault Analysis. Tleis (2008, hal. 8)

Sumber tegangan rangkaian tiga fasa seimbang ini adalah:

$$v_i(t) = \sqrt{2}V_{rms} \sin(\omega t + \varphi_i) \quad i = r, y, b \quad (2.1)$$

dengan V_{rms} adalah besar tegangan rms

$\omega = 2\pi f$ dalam rad/s, dengan f = frekuensi sistem dalam Hz

φ_i = sudut fasa tegangan dalam rad, untuk fasa Y dan fasa B adalah

$$\varphi_y = \varphi_r - 2\pi / 3 \quad \varphi_b = \varphi_r + 2\pi / 3 \quad (2.2)$$

Jika terjadi hubung singkat antara ketiga fasa dan ground, yaitu antara fasa r, y, b dan ground pada saat $t = 0$, maka dapat kita tuliskan

$$L \frac{di_i(t)}{dt} + Ri_i(t) + L_e \frac{di_e(t)}{dt} + R_e i_e(t) = v_i(t) \quad i = r, y, b \quad (2.3)$$

dengan mensubstitusikan $i = r, y, b$ ke dalam persamaan (2.3), maka persamaan menjadi

$$\begin{aligned} L \frac{d}{dt} [i_r(t) + i_y(t) + i_b(t)] + R [i_r(t) + i_y(t) + i_b(t)] \\ + 3L_e \frac{di_e(t)}{dt} + 3R_e i_e(t) = v_r(t) + v_y(t) + v_b(t) \end{aligned} \quad (2.4)$$

karena rangkaian seimbang, maka

$$v_r(t) + v_y(t) + v_b(t) = 0 \quad (2.5)$$

dari Gambar 2.1 juga terlihat bahwa

$$i_r(t) + i_y(t) + i_b(t) = 0 \quad (2.6)$$

dengan mensubstitusikan persamaan (2.5) dan (2.6) ke persamaan (2.4), maka didapatkan

$$(L + 3L_e) \frac{di_e(t)}{dt} + (R + 3R_e)i_e(t) = 0 \quad (2.7)$$

Solusi dari persamaan (2.7) adalah

$$i_e(t) = K \times \exp \left[\frac{-t}{\left(\frac{L + 3L_e}{R + 3R_e} \right)} \right] \quad (2.8)$$

di mana K adalah konstanta yang memenuhi kondisi awal. Karena rangkaian merupakan sistem yang seimbang, maka $i_e(t = 0) = 0$. Sehingga persamaan (2.8) menghasilkan $K = 0$ dan $i_e(t) = 0$. Dengan kata lain, pada gangguan tiga fasa tidak ada arus yang mengalir pada jalur pentanahan dan ketiga arus gangguan $i_i(t)$ akan mengalir pada rangkaian fasanya sendiri-sendiri. Dengan nilai $i_e(t) = 0$, maka solusi dari persamaan (2.3) adalah

$$i_i(t) = \sqrt{2}I_{rms} \left\{ \sin \left[\omega t + \varphi_i - \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right) \right] - \sin \left[\varphi_i - \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right) \right] \times \exp \left[\frac{-t}{(L/R)} \right] \right\} \quad (2.9)$$

dengan

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \quad (2.10)$$

Persamaan (2.9) dapat ditulis kembali sebagai penjumlahan dari komponen AC dan komponen DC satu arah sebagai berikut:

$$i_i(t) = i_{i(ac)}(t) + i_{i(dc)}(t) \quad i = r, y, b \quad (2.11)$$

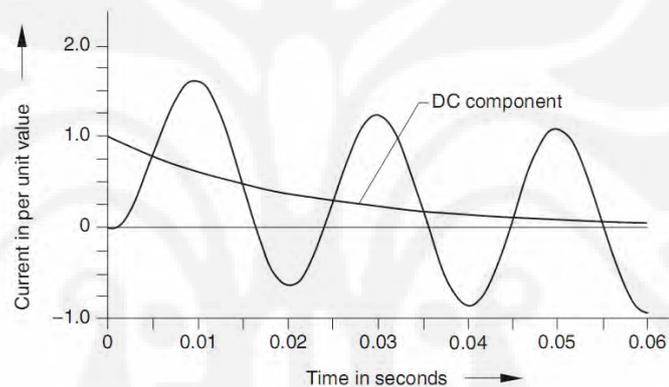
dengan komponen arus AC

$$i_{i(ac)}(t) = \sqrt{2}I_{rms} \sin \left[\omega t + \varphi_i - \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right) \right] \quad (2.12)$$

dan komponen arus DC

$$i_{i(dc)}(t) = -\sqrt{2}I_{rms} \sin \left[\varphi_i - \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right) \right] \times \exp \left[\frac{-t}{(L/R)} \right] \quad (2.13)$$

pada analisis ini, besar komponen arus bolak-balik (AC) adalah konstan karena diasumsikan induktansi sumber L konstan atau tidak terpengaruh waktu. Dan asumsi ini valid hanya jika lokasi gangguan hubung singkat terjadi jauh dari mesin listrik yang memberikan arus hubung singkat menuju gangguan. Besaran awal dari komponen DC pada setiap fasa bergantung pada posisi gelombang tegangan pada saat hubung singkat terjadi dan pada besarnya komponen arus AC I_{rms} . Laju penurunan komponen arus DC bergantung pada konstanta waktu rangkaian L/R atau X/R rasio di mana $X/R = \omega L/R$. Sekali lagi, asumsi nilai L yang konstan membuat rasio X/R juga konstan sehingga laju penurunan pun menjadi konstan.



Gambar 2.2 Arus hubung singkat

Sumber: Transient in Power Systems. Van der Sluis (2001, hal. 5)

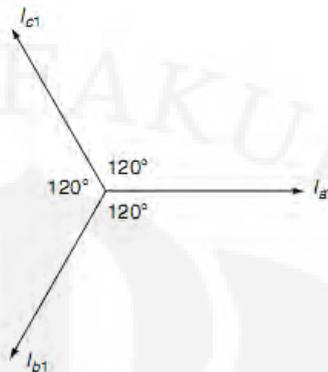
2.1.2 Komponen simetri [5]

Konsep dasar mengenai komponen simetri pertama kali dikembangkan oleh Charles L Fortesque pada tahun 1918. Dia menyatakan bahwa dalam sebuah sistem tak seimbang dengan n fasa dapat diuraikan menjadi n sistem dengan fasa yang seimbang.

Pada sistem tiga fasa, himpunan dari tiga fasa yang tidak seimbang dapat diuraikan menjadi tiga sistem fasa seimbang sebagai berikut:

- a. Komponen Urutan Positif, terdiri dari sebuah sistem tiga fasa yang memiliki urutan fasa yang sama dengan fasa aslinya. Masing-masing fasa memiliki besaran yang sama dan memiliki beda fasa 120° . Untuk

menyederhanakan analisis, maka digunakan suatu vektor satuan a yang berfungsi untuk memutar vektor sejauh 120° .



Gambar 2.3 Komponen urutan positif

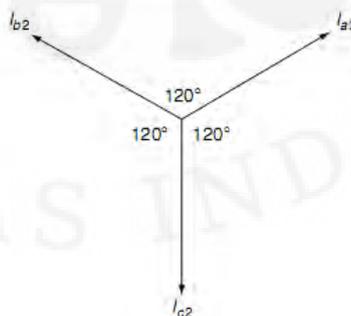
Sumber: Protective Relaying: Principles and Application. Blackburn (2007, hal. 106)

Kita dapat menguraikan vektor di atas menjadi seperti berikut:

$$\begin{aligned}
 I_{a1} &= I_1 & V_{a1} &= V_1 \\
 I_{b1} &= a^2 I_{a1} = a^2 I_1 = I_1 \angle 240^\circ & V_{b1} &= a^2 V_{a1} = a^2 V_1 = V_1 \angle 240^\circ \\
 I_{c1} &= a I_{a1} = a I_1 = I_1 \angle 120^\circ & V_{c1} &= a V_{a1} = a V_1 = V_1 \angle 120^\circ
 \end{aligned} \quad (2.14)$$

Perlu diperhatikan bahwa yang menjadi fasor referensi adalah fasor A. Penguraian vektor di atas berlaku untuk fasa arus maupun fasa tegangan.

- b. Komponen Urutan Negatif, terdiri dari sebuah sistem tiga fasa yang urutan fasanya berlawanan dengan fasa aslinya. Jika pada urutan positif arah rotasi berlawanan jarum jam, maka pada urutan negatif arah rotasi searah jarum jam.



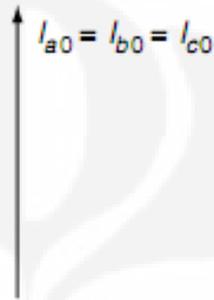
Gambar 2.4 Komponen urutan negatif

Sumber: Protective Relaying: Principles and Application. Blackburn (2007, hal. 107)

Komponen fasor di atas dapat diuraikan menjadi:

$$\begin{aligned}
 I_{a2} &= I_2 & V_{a2} &= V_2 \\
 I_{b2} &= aI_{a2} = aI_2 = I_2 \angle 120^\circ & V_{b2} &= aV_{a2} = aV_2 = V_2 \angle 120^\circ \\
 I_{c2} &= a^2 I_{a2} = a^2 I_2 = I_2 \angle 240^\circ & V_{c2} &= a^2 V_{a2} = a^2 V_2 = V_2 \angle 240^\circ
 \end{aligned} \quad (2.15)$$

- c. Komponen Urutan Nol, terdiri dari tiga fasa yang memiliki besar dan arah yang sama.



Gambar 2.5 Komponen urutan nol

Sumber: Protective Relaying: Principles and Application. Blackburn (2007, hal. 108)

$$I_{a0} = I_{b0} = I_{c0} = I_0 \quad \text{dan} \quad V_{a0} = V_{b0} = V_{c0} = V_0 \quad (2.16)$$

Dari ketiga komponen di atas, maka kita masukkan nilai masing-masing komponen ke bentuk fasanya:

- Untuk fasa A

$$\begin{aligned} I_a &= I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \\ &= I_1 + I_2 + I_0 \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} V_a &= V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \\ &= V_1 + V_2 + V_0 \end{aligned} \quad (2.18)$$

- Untuk fasa B

$$\begin{aligned} I_b &= I_{b1} + I_{b2} + I_{b0} \\ &= a^2 I_1 + a I_2 + I_0 \end{aligned} \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned} V_b &= V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \\ &= a^2 V_1 + a V_2 + V_0 \end{aligned} \quad (2.20)$$

- Untuk fasa C

$$\begin{aligned} I_c &= I_{c1} + I_{c2} + I_{c0} \\ &= a I_1 + a^2 I_2 + I_0 \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} V_c &= V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \\ &= a V_1 + a^2 V_2 + V_0 \end{aligned} \quad (2.22)$$

Jika persamaan (2.17) sampai (2.22) kita kumpulkan masing-masing untuk arus dan tegangan, maka akan didapatkan dalam bentuk matriks:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

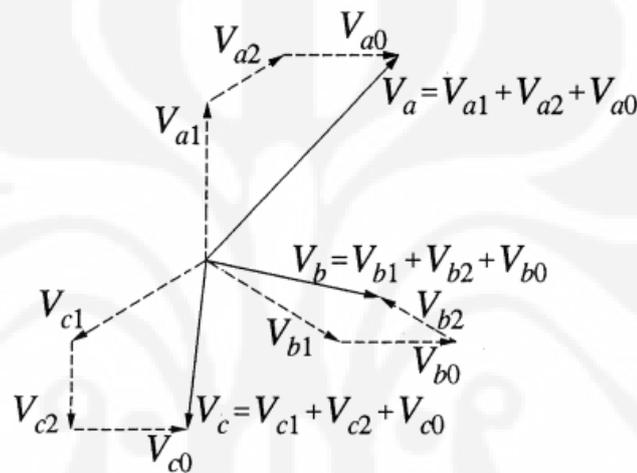
Untuk mendapatkan urutan positif, negatif, dan nol dari suatu sistem yang tidak seimbang, maka persamaan (2.23) dan (2.24) mengalami invers matriks menjadi

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Pada sistem tiga fasa, jumlah arus saluran sama dengan arus I_n dalam jalur kembali lewat netral, $I_n = I_a + I_b + I_c$. Dari persamaan (2.24) terlihat bahwa pada sistem tiga fasa, arus netral adalah $I_n = 3I_0 = I_a + I_b + I_c$

Gambar berikut merupakan contoh penjabaran dari komponen simetri suatu sistem tiga fasa tidak seimbang



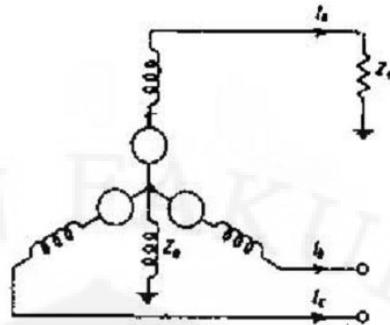
Gambar 2.6 Sistem tak seimbang yang dibangun dari komponen simetri

Sumber: Power System Stability Control. Kundur (1994, hal. 874)

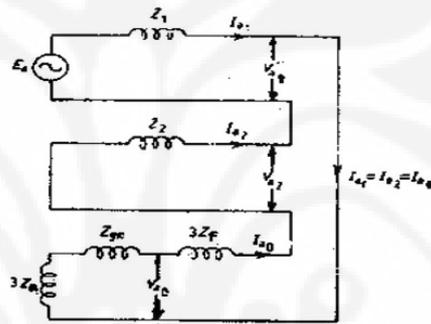
2.1.3 Jenis dan analisa gangguan [3]

Analisa gangguan dilakukan dengan memperhitungkan gangguan melalui impedansi gangguan (Z_f). Dengan meninjau suatu generator dengan semua terminalnya terbuka dan netralnya ditanahkan, maka akan didapatkan rangkaian urutan pada masing-masing gangguan. Khusus untuk gangguan hubung singkat 1 fasa dan 2 fasa ke tanah, dengan adanya Z_f pada netral generator yang ditanahkan, maka ditambahkan $3Z_f$ pada rangkaian urutan nolnya. Jenis gangguan yang penting untuk diketahui adalah:

a. Hubung Singkat Satu fasa ke tanah (L – G)



Gambar 2.7 Rangkaian generator tanpa beban dengan netral ditanahkan melalui impedansi Z_n dan gangguan terjadi pada fasa A ke tanah melalui impedansi Z_f
 Sumber: Electrical Power Systems. Wadhwa (1983, hal. 308)



Gambar 2.8 Rangkaian urutan untuk hubung singkat 1 fasa ke tanah
 Sumber: Electrical Power Systems. Wadhwa (1983, hal. 308)

Dari gambar 2.8 diperoleh rumus:

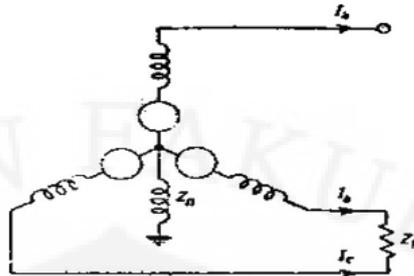
$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{1}{3} I_a = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + (Z_0 + 3Z_n) + 3Z_f} \quad (2.27)$$

$$V_{a1} = E_a - I_{a1} Z_1 \quad (2.28)$$

$$V_{a2} = -I_{a2} Z_2 \quad (2.29)$$

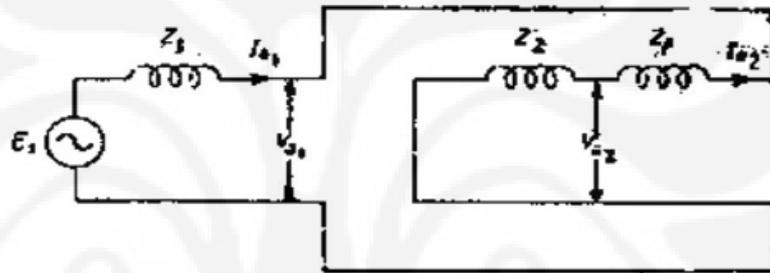
$$V_{a0} = -I_{a0} (Z_{g0} + 3Z_n) \quad (2.30)$$

b. Hubung Singkat Fasa ke fasa (L – L)



Gambar 2.9 Rangkaian generator tanpa beban dengan netral ditanahkan melalui impedansi Z_n dan gangguan terjadi antara fasa A dan fasa B melalui impedansi Z_f

Sumber: Electrical Power Systems. Wadhwa (1983, hal. 310)



Gambar 2.10 Rangkaian urutan untuk hubung singkat dua fasa

Sumber: Electrical Power Systems. Wadhwa (1983, hal. 310)

Dari gambar 2.10 diperoleh rumus:

$$I_{a1} = -I_{a2} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (2.31)$$

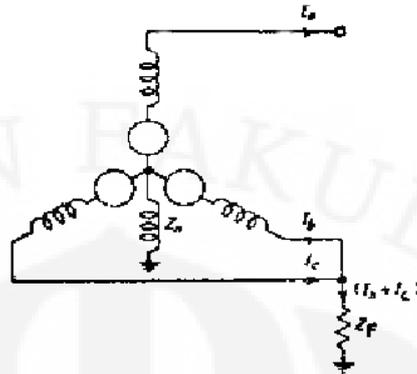
$$I_{a0} = 0 \quad (2.32)$$

$$V_{a1} = E_a - I_{a1}Z_1 \quad (2.33)$$

$$V_{a2} = -I_{a2}Z_2 \quad (2.34)$$

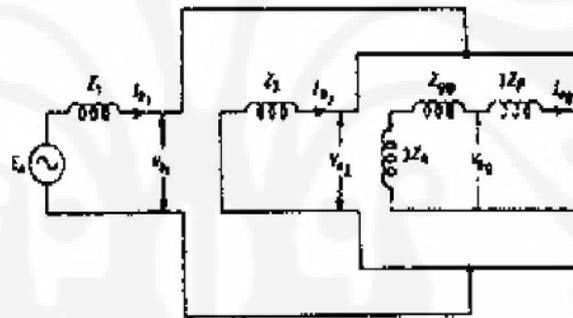
$$V_{a0} = 0 \quad (2.35)$$

c. Hubung Singkat Fasa ke fasa ke tanah (L – L – G)



Gambar 2.11 Rangkaian generator tanpa beban dengan netral ditanahkan melalui impedansi Z_n dan gangguan terjadi antar fasa A dan fasa B ke tanah melalui impedansi Z_f

Sumber: Electrical Power Systems. Wadhwa (1983, hal. 311)



Gambar 2.12 Rangkaian urutan untuk hubung singkat dua fasa ke tanah

Sumber: Electrical Power Systems. Wadhwa (1983, hal. 312)

Dari gambar 2.12 diperoleh rumus:

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + \frac{Z_2(Z_0 + 3Z_n + 3Z_f)}{Z_2 + Z_0 + 3Z_n + 3Z_f}} \quad (2.36)$$

$$I_{a2} = -\frac{E_a - I_{a1}Z_1}{Z_2} \quad (2.37)$$

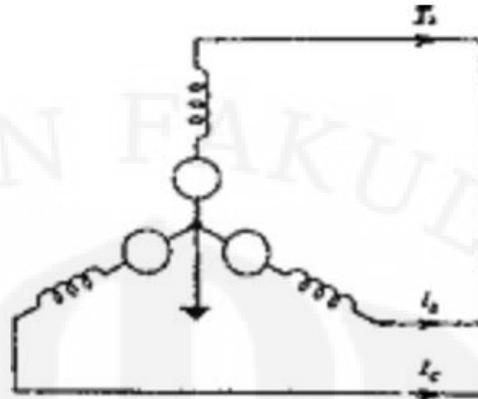
$$I_{a0} = -\frac{E_a - I_{a1}Z_1}{Z_0 + 3Z_n + 3Z_f} \quad (2.38)$$

$$V_{a1} = E_a - I_{a1}Z_1 \quad (2.39)$$

$$V_{a2} = -I_{a2}Z_2 \quad (2.40)$$

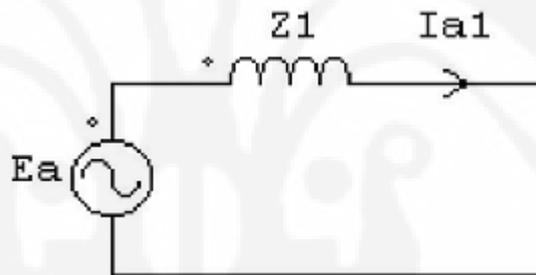
$$V_{a0} = -I_{a0}(Z_0 + 3Z_n) \quad (2.41)$$

d. Hubung Singkat Tiga fasa



Gambar 2.13 Rangkaian generator tanpa beban dengan netral yang ditanahkan langsung dan terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa

Sumber: Electrical Power Systems. Wadhwa (1983, hal. 306)



Gambar 2.14 Rangkaian urutan untuk hubung singkat tiga fasa

Sumber: Electrical Power Systems. Wadhwa (1983, hal. 307)

Dari gambar 2.14 diperoleh rumus:

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1} \quad (2.42)$$

$$I_{a2} = 0 \quad (2.43)$$

$$I_{a0} = 0 \quad (2.44)$$

$$V_{a1} = V_{a2} = V_{a0} = 0 \quad (2.45)$$

2.2 Proteksi Sistem Tenaga Listrik [8]

2.2.1 Pengertian Dasar

Sistem proteksi bertujuan untuk memisahkan bagian sistem yang terganggu secepat mungkin agar kontinuitas pelayanan dalam sistem tenaga dapat terus berjalan. Kata “pengaman” (protection) tidak berarti bahwa peralatan pengaman (protection equipment) dapat mencegah atau mengantisipasi masalah seperti gangguan atau kerusakan peralatan, dikarenakan tidaklah mungkin bagi suatu sistem untuk menghindari seluruh gangguan yang mungkin terjadi. Oleh karena itulah diperlukan suatu desain atau rancangan sistem yang dapat dengan cepat mendeteksi keadaan yang tidak normal dan mengambil tindakan yang tepat. Tipe tindakan yang diambil tergantung pada jenis peralatan proteksi dan kondisi lingkungannya.

Fungsi dari sistem proteksi adalah:

- a. Melindungi elemen sistem terhadap gangguan yang terjadi dalam sistem, agar tidak sampai ikut mengalami gangguan atau kerusakan
- b. Melokalisir gangguan agar tidak meluas, sehingga sistem tidak terganggu dan masih bekerja dengan normal
- c. Menjamin keselamatan para personel

Untuk memenuhi fungsi di atas, maka sistem proteksi harus memenuhi kriteria-kriteria berikut:

- a. Selektivitas (selectivity)
Peralatan pengaman hanya bekerja pada bagian yang terganggu saja yang menjadi kawasan proteksi utamanya
- b. Stabilitas (stability)
Kemampuan sistem proteksi untuk tetap tidak terpengaruh dari gangguan di luar zona proteksinya untuk menjamin kontinuitas supply
- c. Kepekaan (sensitivity)
Yaitu kemampuan untuk mendeteksi gangguan terkecil yang bisa merusak sistem
- d. Kecepatan (speed)

Yaitu kemampuan untuk bekerja secepat mungkin ketika diharuskan untuk mulai bekerja sehingga meminimalkan kerusakan bagi daerah sekitarnya dan menjamin keselamatan bagi personel.

Dan untuk memenuhi kriteria-kriteria di atas, sistem proteksi harus bisa diandalkan (reliable). Yang dimaksud dari reliability ini adalah:

- a. Dependability: hanya bekerja ketika memang diharuskan bekerja (kepastian sistem proteksi bekerja dengan benar)
- b. Security: tidak boleh bekerja ketika memang tidak diharuskan bekerja (sistem proteksi tidak salah kerja)

2.2.2 Daerah Pengamanan (Zone of Protection)

Zona proteksi adalah bagian dari sistem yang bila terjadi suatu gangguan dalam bagian tersebut, maka peralatan proteksi pada bagian tersebut akan mendeteksinya dan bagian tersebut akan dilepas dari bagian lainnya. Dalam pembagian daerah zona proteksi ini, setiap elemen dalam sistem tenaga listrik harus diproteksi oleh pengamanan utama dan pengamanan cadangan (back up).

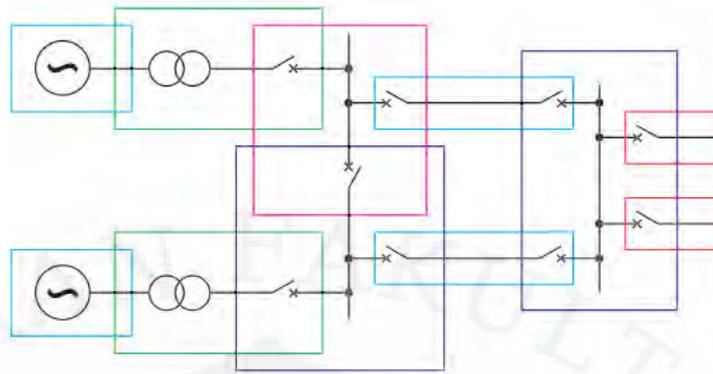
a. Pengaman Utama

Pengaman utama harus bekerja setiap saat suatu elemen mendeteksi gangguan dalam sistem. Elemen proteksi mencakup satu atau lebih komponen dalam sistem tenaga listrik, misalnya mesin listrik, saluran, dan busbar. Namun perlu diperhatikan bahwa dalam operasinya, bisa terjadi kemungkinan terburuk bahwa peralatan pengaman ini tidak bekerja saat terjadi gangguan

b. Pengaman Cadangan

Pengaman cadangan merupakan peralatan yang diharapkan untuk bekerja saat pengaman utama gagal untuk bekerja. Pengaman cadangan memiliki kemampuan mendeteksi gangguan yang sama dengan pengaman utamanya. Agar pengaman cadangan ini tidak mendahului pengaman utama dalam operasinya, maka pada pengaman cadangan diset untuk memiliki jeda waktu untuk memberikan kesempatan bagi rele utama untuk bekerja terlebih dahulu.

Contoh mengenai pembagian daerah zona proteksi ini, dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2.15 Pembagian zona proteksi

Sumber: Network Protection and Automation Guide

2.3 Komponen Dasar pada Sistem Proteksi

Komponen-komponen dasar yang digunakan dalam sistem proteksi antara lain adalah:

1. Trafo Pengukuran

Fungsi dari komponen ini adalah untuk memonitor dan memberikan umpan balik mengenai kondisi sistem.

2. Rele

Rele berfungsi untuk mengubah sinyal dari komponen monitoring, lalu memberikan perintah untuk memutus jaringan ketika sistem mengalami gangguan. Fungsi lain dari rele adalah memberikan peringatan (alarm) ketika alat yang diproteksi mendeteksi gangguan yang mungkin akan terjadi.

3. Sekering (Fuse)

Sekering didefinisikan sebagai “suatu peralatan proteksi arus lebih dengan suatu bagian pembuka kontak yang dapat melebur saat elemen menjadi panas sesuai dengan arus yang melewatinya” (ANSI/IEEE Standard 100-1984).

4. Pemutus Tenaga (Circuit Breaker)

Circuit breaker didefinisikan sebagai “suatu peralatan yang didesain untuk dapat membuka dan menutup kontak secara normal dan membuka kontak secara otomatis pada besar arus yang telah ditentukan sebelumnya tanpa

merusak dirinya ketika diaplikasikan dengan baik sesuai dengan ratingnya (ANSI/NFPA 70-1984).

Fungsi dari komponen ini adalah untuk memutus arus yang sangat besar ketika sistem mengalami gangguan. Circuit breaker akan bekerja setelah menerima sinyal dari rele.

5. Batere Arus Searah (DC Batteries)

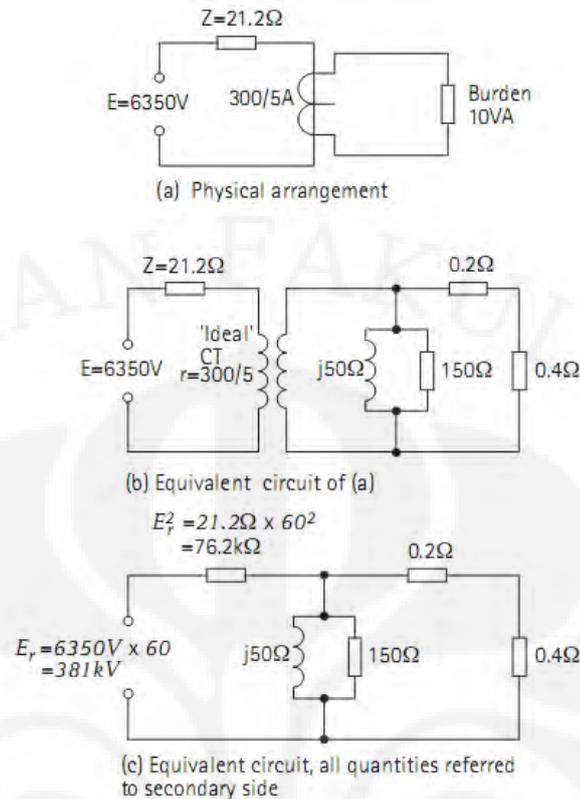
Komponen ini merupakan sumber catu daya bagi peralatan proteksi seperti rele dan circuit breaker.

2.4 Trafo Pengukuran

2.4.1 Trafo Arus (Current Transformers)

Trafo arus adalah suatu peralatan yang digunakan untuk memberikan masukan berupa arus pada suatu rangkaian arus pada peralatan proteksi. Sisi primer dari CT dihubungkan secara seri dengan sistem jaringan listrik dan sisi sekunder dihubungkan dengan beban, dalam hal ini adalah rangkaian arus dari peralatan proteksi. Dalam kondisi normal sisi sekunder CT harus dalam kondisi terhubung singkat atau dalam kondisi terbebani, sehingga tidak terjadi hubung singkat pada sisi sekunder CT tersebut.

Untuk menganalisa mekanisme kerja CT, dapat dilihat pada gambar 2.16 di bawah ini:



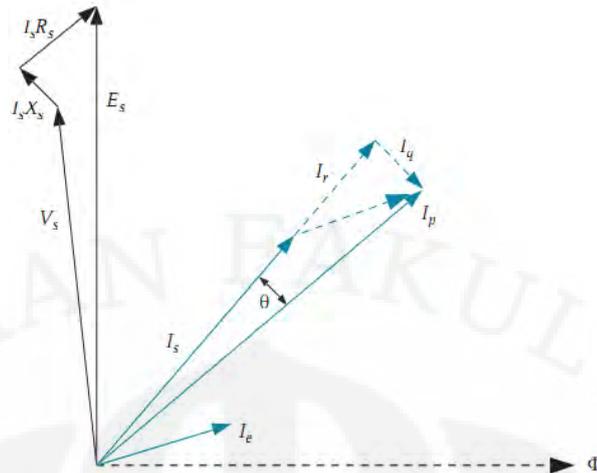
Gambar 2.16 Rangkaian CT

Gambar 2.16 menunjukkan rangkaian CT yang sesungguhnya, gambar 2.16b menunjukkan persamaannya. Pada gambar 2.16c ditunjukkan persamaan rangkaian CT apabila dilihat dari sisi sekunder, maka Z dan E harus dikalikan dengan nilai rasio dari CTnya yaitu $300/5 = 60$.

Dari penjelasan gambar di atas, ada beberapa hal yang dapat dijelaskan, yaitu:

- Besarnya arus sekunder tidak dipengaruhi oleh perubahan beban, walaupun telah melewati batas rate-nya
- Pada saat CT ini aktif maka sisi sekunder harus dalam kondisi terhubung singkat. Kondisi ini terjadi karena tegangan yang berlebihan pada sisi sekunder, hal ini dipengaruhi oleh arus yang mengalir pada sisi primernya
- Kesalahan rasio CT dan sudut phase dapat dicari dengan mudah apabila karakteristik magnetisasi dan beban pada sisi sekunder diketahui

Untuk menjelaskan kedua kesalahan tersebut maka dapat dilihat pada gambar 2.17 di bawah ini:



Gambar 2.17 Diagram vector CT

- Dengan
- E_s = gaya elektromagnetik (emf) sekunder
 - V_s = tegangan output sekunder
 - I_p = arus primer
 - I_s = arus sekunder
 - θ = error sudut fasa
 - Φ = flux
 - $I_s R_s$ = tegangan jatuh pada hambatan sekunder
 - $I_s X_s$ = tegangan jatuh pada reaktansi sekunder
 - I_e = arus eksitasi
 - I_r = komponen arus I_e yang sefasa dengan I_s
 - I_q = komponen arus I_e yang berbeda fasa 90° dengan I_s

Untuk menjelaskan bahwa kedua kesalahan tersebut akan dipengaruhi oleh posisi I_s dan I_e . penjelasannya adalah sebagai berikut:

- Kesalahan rasio (I_r) terjadi karena perbedaan antara I_p dan I_s , di mana I_r adalah komponen dari I_e
- Kesalahan phase ϕ dipengaruhi oleh besarnya I_q , di mana I_q juga merupakan komponen I_e

2.4.1.1 Burden [13]

Beban pada trafo arus dinamakan burden dan dapat dituliskan sebagai beban VA atau sebagai impedansi. VA biasanya mengacu pada arus nominal sekunder pada CT. misalnya, sebuah 5 VA burden pada CT 1 A memiliki impedansi 5 ohm:

$$\frac{5 \text{ VA}}{1 \text{ A}} = 5 \text{ V}$$

$$\text{impedansi} = \frac{5 \text{ V}}{1 \text{ A}} = 5 \Omega$$

2.4.1.2 Kelas Trafo Arus

Pada trafo arus untuk proteksi, parameter spesifikasi yang digunakan biasanya dalam bentuk burden, kelas akurasi, dan batas akurasi.

Standar nilai rating burden adalah: 2.5, 5, 7.5, 10, 15, dan 30 VA

Kelas akurasi yang digunakan adalah 5P dan 10P di mana artinya error pada batas akurasi adalah sebesar 5% dan 10%.

Standar batas akurasi adalah: 5, 10, 15, 20, dan 30

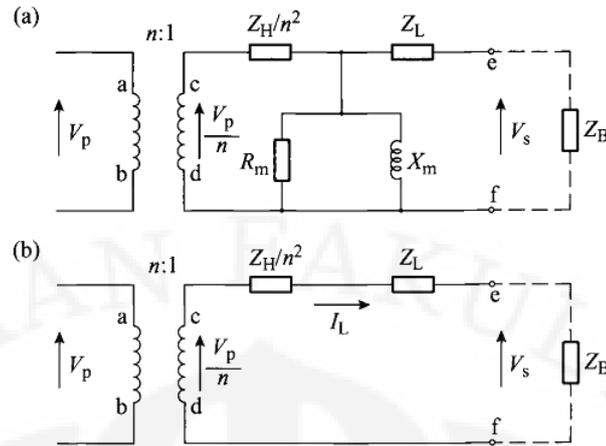
Metode untuk menggambarkan suatu trafo arus adalah sebagai berikut:

15 VA Class 5P20

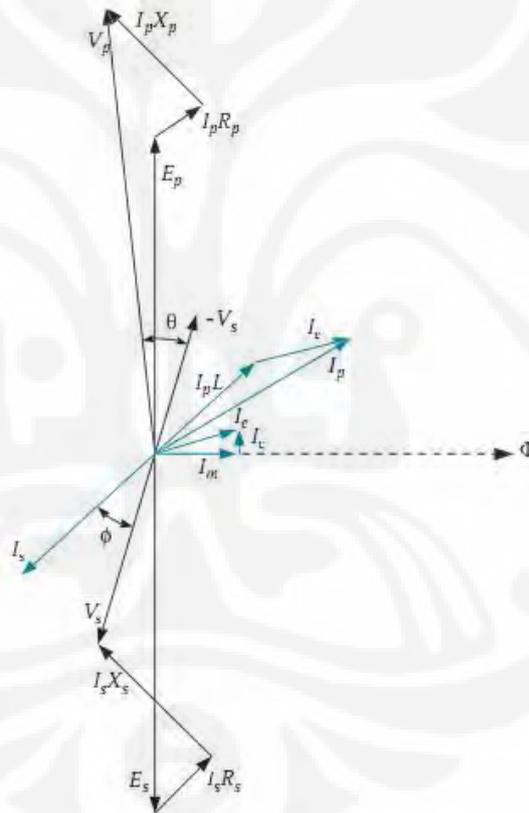
Maksudnya adalah bahwa CT ini memiliki burden 15 VA dan tidak akan memiliki error lebih dari 5% pada 20 kali arus rating.

2.4.2 Trafo Tegangan (Voltage Transformers)

Trafo tegangan adalah suatu peralatan yang digunakan untuk memberikan masukan tegangan pada rangkaian tegangan dari peralatan proteksi (misalnya untuk relay jarak). Tegangan sisi sekunder yang biasa digunakan untuk peralatan sistem proteksi adalah 110 atau 120 V. Untuk menjelaskan karakteristik VT tersebut maka dapat dilihat pada gambar 2.18 dan gambar 2.19 di bawah ini (rangkaiannya ekivalen VT dan diagram vector VT).



Gambar 2.18 Rangkaian VT (a) rangkaian ekuivalen (b) rangkaian yang disederhanakan



Gambar 2.19 Diagram vektor pada trafo tegangan

Kesalahan-kesalahan yang dapat terjadi pada VT yaitu dapat berupa kesalahan rasio dan kesalahan sudut phase, di mana penjelasannya adalah sebagai berikut:

- Kesalahan rasio, yaitu kesalahan yang dapat dicari dengan persamaan (GEC Measurement, 1987:63)

$$\left(\frac{K_n \times V_s - V_p}{V_p} \right) \times 100\% \quad (2.46)$$

Dengan K_n = adalah rasio nominal V_t

V_p, V_s = adalah masing-masing tegangan primer dan sekunder

- Kesalahan sudut phase, yaitu karena perbedaan sudut phase antara kebalikan tegangan sekunder dan tegangan primer

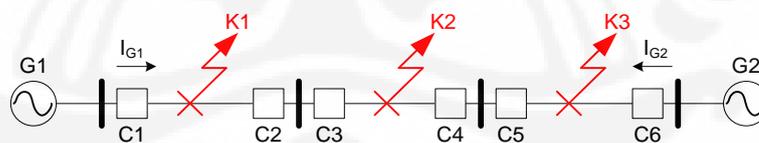
2.5 Rele Arus Lebih Berarah [4]

2.5.1 Umum

Rele arus lebih berarah merupakan suatu rele arus lebih yang memiliki fungsi tambahan untuk membedakan arah gangguan. Fungsi untuk mendeteksi arah gangguan ini sangat penting terutama untuk sistem proteksi yang digunakan pada jaringan distribusi seperti berikut:

- Saluran dengan sumber dari kedua ujungnya
- Saluran parallel
- Saluran ring/cincin

Ketika terjadi gangguan pada saluran-saluran tersebut di atas, maka arus gangguan akan mengalir menuju titik gangguan dari dua arah. Contoh penggunaan rele arus lebih berarah dapat dilihat pada gambar berikut [13]:



Gambar 2.20 Arah arus gangguan pada jaringan dengan sumber dari kedua ujung saluran

Dari gambar tersebut ditunjukkan bahwa apabila terjadi gangguan pada K_1 maka arus I_{G1} dan I_{G2} akan mengalir dari generator G_1 dan G_2 . Akibatnya C_1 dan C_2 akan terbuka. Untuk menjaga supaya C_3 jangan ikut terbuka, maka pengesetan waktu C_3 harus lebih besar dari C_2 atau dapat dituliskan $t_{c3} > t_{c2}$. Kondisi ini akan terjadi sebaliknya yaitu apabila terjadi gangguan pada K_2 maka C_3 dan C_4 akan terbuka dan untuk menjaga supaya C_2 tidak ikut terbuka maka $t_{c2} > t_{c3}$, begitu

seterusnya untuk gangguan pada K3. Terlihat bahwa langkah ini tidak efisien karena diperlukan banyak pengesetan waktu terhadap peralatan tersebut.

Suatu langkah efisiensi dapat ditunjukkan dengan menggunakan relay arah, yaitu apabila gangguan terjadi pada K1, maka hanya C1 dan C2 yang terbuka dan seterusnya. Rele arah ini bekerja tidak hanya berdasarkan besarnya arus gangguan saja tetapi juga arah dari arus gangguannya, di mana arah ini ditentukan oleh besarnya sudut phase antara arus gangguan dan tegangan busbaranya.

Mekanisme kerja relay arah adalah tersebut seperti wattmeter, yang tergantung pada tegangan, arus dan sudut phase dari keduanya. Rele ini akan bekerja apabila torsi yang dibangkitkan adalah positif, dan sebaliknya relay tidak bekerja kalau torsinya negatif. Besarnya torsi yang dibangkitkan dapat dicari dengan persamaan berikut (Titarenko 123):

$$T = K \times U_r \times I_r \cos(\Phi_r + \alpha) \quad (2.47)$$

dengan

K = faktor proporsional

U_r = tegangan sekunder VT

I_r = arus sekunder CT

Φ_r = sudut phase antara U_r dan I_r

α = sudut yang ditentukan oleh karakteristik alat tersebut

2.5.2 Prinsip kerja rele arus lebih berarah [7]

Rele arus lebih berarah, untuk selanjutnya kita sebut dengan rele arah saja, adalah rele arus lebih yang memiliki fungsi tambahan mendeteksi arah gangguan. Semua fungsi yang ada pada rele arus lebih terdapat juga pada rele arah dengan tambahan fungsi setting arah. Rele arah dalam ANSI/IEEE Standard dinamakan juga dengan elemen 67.

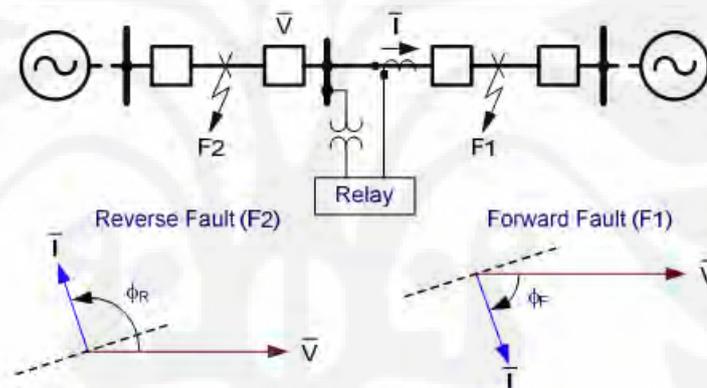
Rele arus lebih merupakan suatu rele proteksi yang bekerja jika arus yang melewati rele melebihi arus settingnya. Rele arus lebih berfungsi untuk mengamankan suatu elemen atau peralatan dari arus gangguan yang sangat besar. Arus gangguan ini dapat menyebabkan kerusakan peralatan akibat panas yang ditimbulkan oleh arus lebih. Selain itu, arus lebih juga dapat menyebabkan kerusakan elektromagnetis pada mesin-mesin listrik. Oleh karena itulah, maka arus gangguan berlebih ini harus segera diputus untuk mengamankan sistem.

Rele arah akan bekerja jika kondisi berikut terpenuhi:

1. Arus yang lewat lebih besar dari arus setting (pickup)
2. Arah gangguan sesuai atau searah dengan arah pada setting rele.

Kedua kondisi di atas harus terpenuhi keduanya, tidak dapat berdiri sendiri. Misalnya jika arus yang melewati rele lebih besar dari arus setting, namun arah gangguan berlawanan dengan arah setting rele, maka rele tidak akan bekerja. Hal sebaliknya juga begitu, jika arah setting rele searah dengan arus gangguan, namun arus yang melewati rele masih di bawah setting arus, maka rele tidak akan bekerja.

Secara garis besar, rele arah bekerja dengan prinsip berikut:



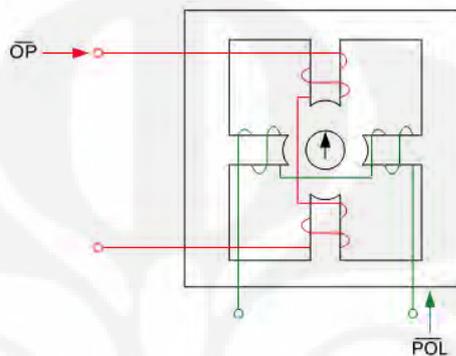
Gambar 2.21 Prinsip dasar elemen arah pada rele

Sumber: IEEE Journal. Fundamental and Improvements for Directional Relays. Zimmerman & Costello. 2010

Elemen arah didesain untuk memberikan respon terhadap sudut fasa antara kuantitas polarizing (fasa referensi) dan kuantitas operating (fasa operasi). Pada gambar 2.21, fasa tegangan gangguan V adalah kuantitas polarizing, sedangkan fasa arus gangguan I adalah kuantitas operasi. Karena saluran merupakan komponen induktif, maka saat terjadi gangguan di F1 maka arus gangguan I akan tertinggal (lag) dari tegangan gangguan V sebesar Φ_F . Jika gangguan terjadi di F2, maka arus gangguan I akan mendahului tegangan sebesar Φ_R . Kuantitas polarizing ini bisa juga disebut dengan kuantitas referensi, yang nilai referensi ini

haruslah suatu nilai yang stabil dan andal, tidak peduli di mana pun gangguan terjadi.

Jadi secara umum dapat dikatakan, rele arah akan bekerja untuk gangguan yang berada di depannya dan tidak bekerja untuk daerah gangguan di belakangnya. Secara skematik rele arah tipe induksi dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2.22 Rele arah tipe induksi

Sumber: IEEE Journal. Fundamental and Improvements for Directional Relays. Zimmerman & Costello. 2010

Pada pusat rele terdapat inti magnetik yang bisa berputar dengan sebuah kontak dan pegas yang berfungsi untuk reset. Rele dirancang untuk tidak memiliki gerakan berputar atau tidak ada torsi yang terjadi saat fluks magnet dari kedua kumparan sefasa. Sehingga rele baru akan bekerja jika terjadi perbedaan fasa antara kuantitas referensi dan kuantitas operasi.

Elemen arah pada rele membutuhkan kuantitas referensi yang mendekati konstan terhadap arus yang melewati peralatan yang diproteksi. Untuk tujuan praktis, kebanyakan fasa tegangan sistem tidak berubah secara signifikan selama terjadi gangguan.

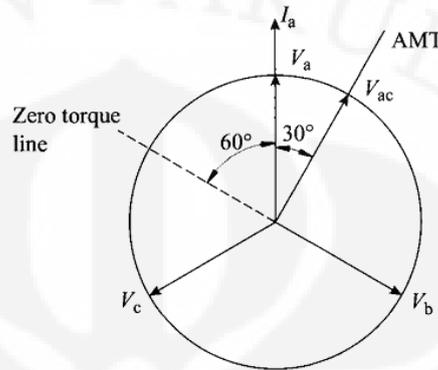
Torsi yang dihasilkan pada elemen arah ini dapat didefinisikan dalam persamaan:

$$T = K\Phi_1\Phi_2 \sin \Theta \quad (2.48)$$

dengan Φ_1 dan Φ_2 adalah nilai polarizing dan operatingnya, dan Θ adalah sudut antara Φ_1 dan Φ_2 .

Hubungan pada rele arah didefinisikan sebagai sudut dasar di mana arus pada faktor daya satu mendahului tegangan polarisasi. Maximum Torque Angle (MTA), atau disebut juga Angle Maximum Torque (AMT) adalah sudut di mana nilai ini menghasilkan torsi maksimum pada rele. [4]

1. Hubungan 30° (0° AMT)



Gambar 2.23 Rele arah hubungan 30° (0° AMT)

Sumber: Protection of Electricity Distribution Network. Gers & Holmes (2004, hal. 129)

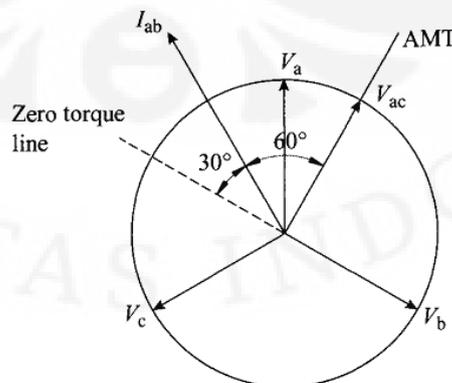
Masukan pada rele:

$$\begin{array}{ccc} \Phi_A : I_a & \Phi_B : I_b & \Phi_C : I_c \\ V_{ac} & V_{ba} & V_{cb} \end{array}$$

Torsi maksimum: terjadi ketika arus fasa tertinggal fasa tegangan – netral sebesar 30°

Daerah operasi: sudut arus dari 60° leading sampai 120° lagging

2. Hubungan 60° (0° AMT)



Gambar 2.24 Rele arah hubungan 60° (0° AMT)

Sumber: Protection of Electricity Distribution Network. Gers & Holmes (2004, hal. 130)

Masukan pada rele:

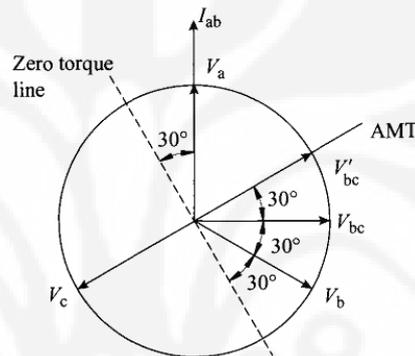
$$\Phi_A : I_{ab} \quad \Phi_B : I_{bc} \quad \Phi_C : I_{ca}$$

$$V_{ac} \quad V_{ba} \quad V_{cb}$$

Torsi maksimum: terjadi ketika arus fasa tertinggal fasa tegangan – netral sebesar 60° . I_{ab} tertinggal dari V_{ac} sebesar 60° . I_a tertinggal dari V_a pada faktor daya satu.

Daerah operasi: sudut arus I_{ab} dari 30° leading sampai 150° lagging, atau I_a leading 30° atau lagging 150° pada faktor daya satu.

3. Hubungan 90° (30° AMT)



Gambar 2.25 Rele arah hubungan 90° (30° AMT)

Sumber: Protection of Electricity Distribution Network. Gers & Holmes (2004, hal. 130)

Masukan pada rele:

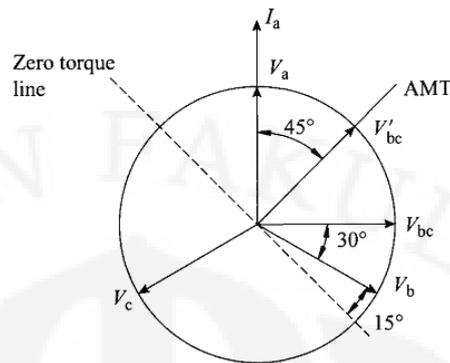
$$\Phi_A : I_a \quad \Phi_B : I_b \quad \Phi_C : I_c$$

$$V_{bc} + 30^\circ \quad V_{ca} + 30^\circ \quad V_{ab} + 30^\circ$$

Torsi maksimum: terjadi ketika arus fasa tertinggal fasa tegangan – netral sebesar 60°

Daerah operasi: sudut arus dari 30° leading sampai 150° lagging

4. Hubungan 90° (45° AMT)



Gambar 2.26 Rele arah hubungan 90° (45° AMT)

Sumber: Protection of Electricity Distribution Network. Gers & Holmes (2004, hal. 131)

Masukan pada rele:

$$\begin{array}{lll} \Phi_A : I_a & \Phi_B : I_b & \Phi_C : I_c \\ V_{bc} + 45^\circ & V_{ca} + 45^\circ & V_{ab} + 45^\circ \end{array}$$

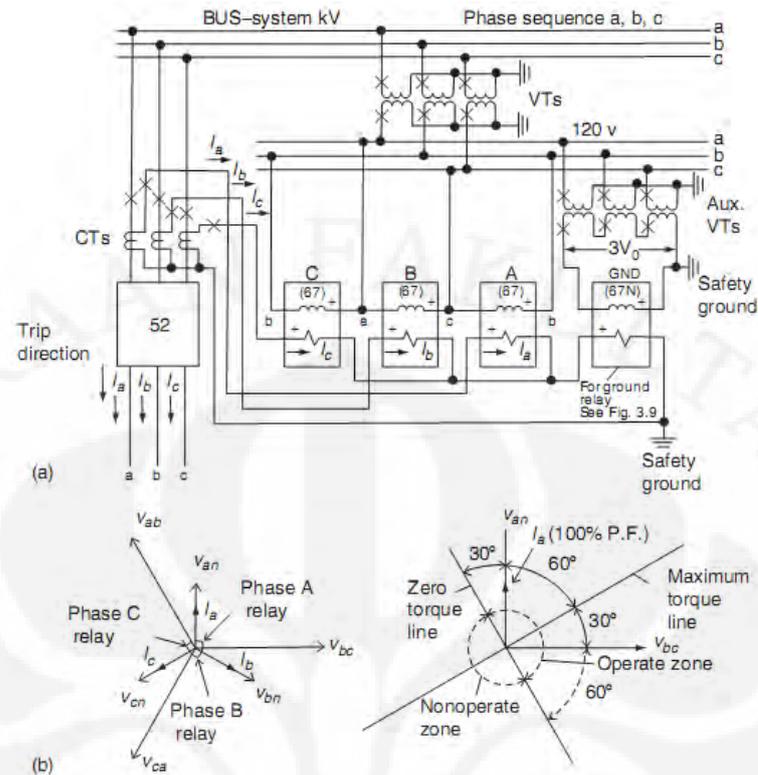
Torsi maksimum: terjadi ketika arus fasa tertinggal fasa tegangan – netral sebesar 45°

Daerah operasi: sudut arus dari 45° leading sampai 135° lagging

Dari beberapa jenis hubungan rele arah di atas, yang akan menjadi perhatian utama kita adalah jenis rele hubungan 90° (30° AMT). Dalam referensi lain jenis rele ini dikenal juga dengan rele hubungan $90^\circ - 60^\circ$. Rele jenis ini merupakan rele yang paling umum digunakan dalam sistem proteksi untuk keperluan praktis. Hal ini dikarenakan daerah operasi rele yang bekerja untuk arus gangguan 30° leading sampai 150° lagging.

2.5.3 Hubungan $90^\circ - 60^\circ$ Untuk Rele Fasa [6]

Hubungan 90° diaplikasikan pada sistem tenaga listrik dengan tegangan yang tertinggal oleh arus sistem sebesar 90° pada faktor daya satu. Tegangan dan arus ini diperoleh dari sistem melalui trafo arus dan trafo tegangan. Berikut merupakan rangkaian sistem rele arah hubungan 90° :



Gambar 2.27 Rele arah hubungan $90^\circ - 60^\circ$ (a) gambar rangkaian (b) diagram vektor
 Sumber: Protective Relaying: Principles and Application. Blackburn (2007, hal. 96)

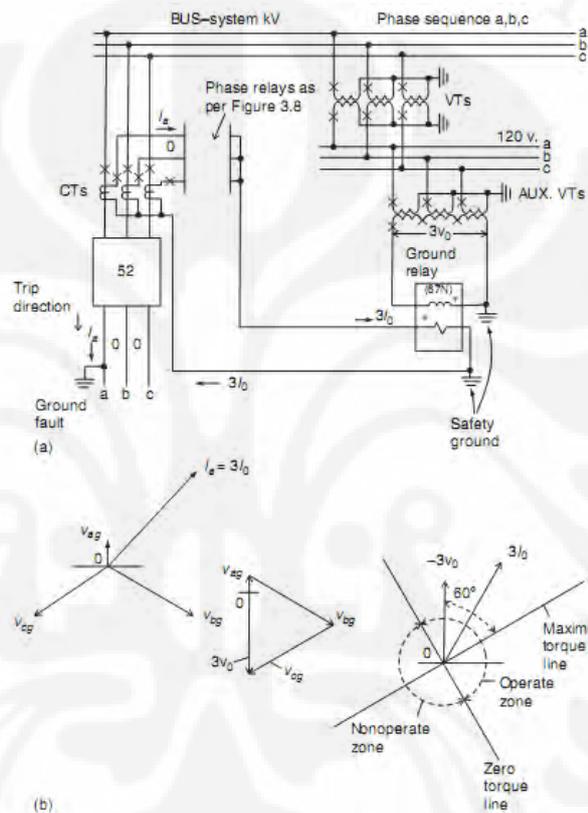
Dari gambar 2.27b, elemen arah untuk fasa A menerima masukan I_a , dan tegangan V_{bc} yang tertinggal 90° . Fasa B menerima masukan I_b dan tegangan V_{ca} yang tertinggal 90° . Fasa C menerima masukan I_c dan tegangan V_{ab} yang tertinggal 90° .

Rele ini secara luas digunakan karena kebanyakan gangguan pada sistem tenaga listrik berada pada kemungkinan rentang arus gangguan 30° leading sampai 150° lagging pada arah trip/gangguan. Operasi maksimum akan bekerja ketika fasa arus tertinggal (lagging) sebesar 60° .

Satu hal yang harus diperhatikan dalam menyusun rangkaian rele arah ini adalah, untuk gangguan hubung singkat ke tanah, maka susunan trafo tegangan untuk rele tanah menggunakan susunan delta. Hal ini dimaksudkan untuk mendapatkan tegangan residual ketika terjadi gangguan hubung singkat ke tanah. Karena pada sistem yang normal, tidak ada arus dan tegangan urutan nol yang terjadi. Oleh karena itu trafo tegangan untuk rele tanah disusun delta untuk mendapatkan tegangan residual $3V_0$.

2.5.4 Hubungan $90^\circ - 60^\circ$ Untuk Rele Tanah [6]

Pada rele arah untuk gangguan ke tanah, sama saja dengan rele arah untuk gangguan fasa. Hanya saja terdapat sedikit perbedaan dalam menyusun trafo arus dan trafo tegangan sebagai masukan bagi rele tanah. Hal ini dikarenakan pada sistem yang seimbang, tidak terdapat komponen arus dan tegangan urutan nol. Komponen urutan nol hanya terdapat saat terjadi gangguan yang melibatkan tanah/ground.



Gambar 2.28 Rele arah hubungan $90 - 60$ untuk gangguan tanah (a) gambar rangkaian (b) diagram vektor

Sumber: Protective Relaying: Principles and Application. Blackburn (2007, hal. 98)

Rangkaian di atas menggunakan kuantitas polarizing/referensi tegangan sistem. Sehingga rangkaian trafo tegangan untuk masukan rele disusun secara delta. Yang digunakan sebagai nilai masukan di sini, sebagaimana terlihat pada gambar 2.28, adalah $3I_0$ dan $3V_0$ yang merupakan komponen urutan nol. Pada gambar, gangguan yang terjadi adalah gangguan satu fasa ke tanah pada fasa A. sehingga arus pada fasa A adalah sebesar $3I_0$.

2.5.5 Koordinasi Rele

Pada rele arus lebih, arus hubung singkat yang mengalir dalam jaringan tidak jauh berbeda untuk setiap titik gangguan. Oleh karena itu tidak mungkin hanya membedakan berdasarkan penyetelan arus saja. Untuk menganggulangi hal ini, digunakan kemampuan membedakan berdasarkan waktu. Rele yang terletak paling dekat dengan lokasi gangguan akan bekerja paling cepat, sedangkan rele yang letaknya jauh dari lokasi gangguan akan bekerja lebih lambat. Waktu kerja rele proteksi umumnya diatur-aturl dengan memilih skala pada rele tersebut yang biasanya disebut dengan Time Dial atau Time Multiplier Setting.

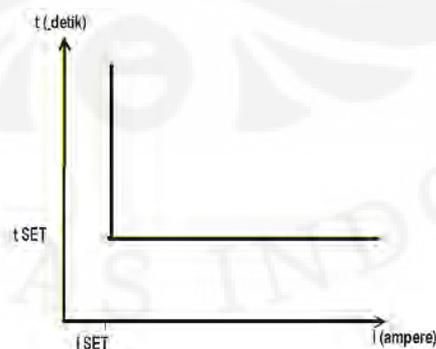
Karakteristik waktu kerja rele proteksi secara garis besar dapat dikelompokkan sebagai berikut, yaitu:

1. Sesaat (Instantaneous)

Karakteristik waktu kerja sesaat, yaitu bila rele bekerja sangat cepat, sehingga hampir tidak terdapat beda waktu saat terjadinya gangguan dengan saat bekerjanya kontak-kontak pada rangkaian pemutus (tripping circuit)

2. Definite Time Lag

Karakteristik waktu kerja definite time lag ini, yaitu bila terdapat beda waktu tertentu antara saat terjadinya gangguan dengan saat bekerjanya kontak-kontak pada rangkaian pemutus. Beda waktu tidak dipengaruhi oleh besarnya arus gangguan ataupun besaran lain yang mengerjakan rele tersebut. Jadi beda waktu tersebut telah ditetapkan pada suatu harga tertentu dalam perencanaannya

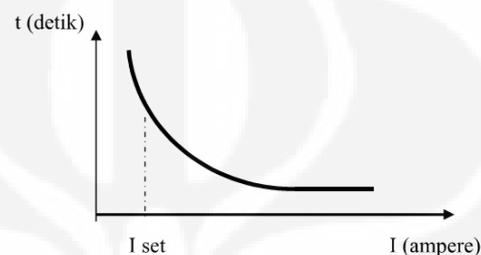


Gambar 2.29 Karakteristik rele definite

Sumber: Kadir (2006, hal. 169)

3. Inverse Time Lag

Karakteristik waktu kerja inverse time lag, yaitu bila panjang waktu antara saat terjadinya gangguan dengan saat bekerjanya kontak-kontak pada rangkaian pemutus, berbanding terbalik dengan besar arus gangguan atau besaran lainnya yang mengerjakan rele tersebut. Maksudnya adalah semakin besar arus gangguan maka akan semakin cepat kerja rele, semakin kecil arus gangguan maka waktu kerja rele semakin lambat



Gambar 2.30 Karakteristik rele inverse

Sumber: Kadir (2006, hal. 169)

Ada beberapa jenis karakteristik inverse, yaitu: standard inverse, long time inverse, extremely inverse, dan definite inverse.

2.6 Studi Aliran Daya [10]

2.6.1 Umum

Studi aliran beban atau disebut juga dengan aliran daya sangat penting dalam analisis untuk perencanaan sistem tenaga listrik. Sistem diasumsikan bekerja pada kondisi tunak (steady state) yang seimbang. Untuk analisis digunakan pemodelan satu fasa atau diagram satu garisnya, dan untuk perhitungannya digunakan sistem per-unit. Kuantitas-kuantitas yang ingin diketahui pada setiap rel adalah besarnya magnitude tegangan ($|V|$) dan sudut fasanya (θ), daya aktif (P) dan reaktifnya (Q).

Rel sistem dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Rel beban

Pada rel ini diketahui besarnya beban, daya aktif dan reaktifnya. Sedangkan besarnya magnitude tegangan ($|V|$) dan sudut fasanya (θ) harus dicari. Rel ini juga disebut rel P-Q.

2. Rel generator

Rel ini terhubung dengan generator. Pada rel ini diketahui besarnya magnitude tegangan ($|V|$) dan daya aktifnya (P). sedangkan yang tidak diketahui adalah sudut fasa (θ) dan daya reaktifnya (Q). rel ini disebut juga rel P-V, rel terkendali (regulated bus), dan rel tegangan terkontrol (voltage controlled bus)

3. Rel ayun (swing bus)

Rel ini digunakan sebagai referensi di mana besarnya magnitude tegangan ($|V|$) dan sudut fasanya (θ) telah ditetapkan. Rel ini terhubung dengan generator dan biasanya diambil unit yang terbesar. Rel ini akan menjadi rel pertama dalam perhitungan. Kuantitas yang ingin diketahui adalah daya aktif (P) dan daya reaktifnya (Q). Rel ini disebut juga rel slack (slack bus).

2.6.2 Metode Perhitungan Aliran Beban pada Perangkat Lunak ETAP

Program analisis aliran beban pada ETAP menghitung tegangan rel, percabangan, faktor daya, arus dan aliran daya yang melalui sistem tenaga listrik. Program ini memperbolehkan untuk sumber tenaga ayun (swing), pengaturan tegangan dan tanpa pengaturan tegangan dengan banyak generator dan peralatan. Program ini dapat digunakan pada sistem tenaga dengan jaringan radial dan ring. Metode yang berbeda dapat dipilih untuk mendapatkan efisiensi perhitungan yang terbaik.

ETAP PowerStation menyediakan tiga metode perhitungan aliran beban: Newton – Rhapson, *Fast – Decoupled*, dan *Accelerated Gauss – Seidel*. Ketiganya memiliki karakteristik konvergensi yang berbeda, dan terkadang salah satunya lebih baik dibandingkan yang lain. Metode yang akan digunakan dapat dipilih dari ketiganya, tergantung konfigurasi sistem, pembangkitan, kondisi pembebanan, dan tegangan awal rel.

1. Metode Newton – Rhapson

Metode Newton – Rhapson merumuskan dan menyelesaikan secara iterasi persamaan aliran beban berikut:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

dengan ΔP = vektor penyimpangan daya nyata antara nilai yang telah ditentukan dan nilai yang dihitung pada rel

ΔQ = vektor penyimpangan daya reaktif antara nilai yang telah ditentukan dan nilai yang dihitung pada rel

ΔV = vector magnitude dalam bentuk *incremental*

$\Delta \delta$ = sudut tegangan rel

$J_1 - J_2$ = matriks Jacobian

Metode Newton – Rhapson memiliki karakteristik konvergensi kuadrat yang unik. Metode ini biasanya memiliki kecepatan konvergensi yang sangat cepat dibandingkan dengan metode lainnya. Metode ini juga memiliki keuntungan di mana kriteria konvergensi dispesifikasikan untuk memastikan konvergensi penyimpangan daya nyata dan daya reaktif pada rel. Kriteria tersebut memberikan kontrol langsung terhadap akurasi yang diinginkan untuk solusi aliran beban. Kriteria konvergensi untuk metode ini biasanya ditetapkan sampai 0.001 MW dan MVar.

Metode Newton – Rhapson sangat bergantung pada nilai awal tegangan rel. Pemilihan yang hati-hati dari nilai awal rel sangat direkomendasikan. Sebelum menjalankan aliran beban menggunakan metode Newton – Rhapson, ETAP membuat beberapa iterasi Gauss – Seidel untuk menetapkan nilai awal untuk tegangan bus.

Metode Newton – Rhapson direkomendasikan untuk penggunaan dengan sistem apapun sebagai pilihan pertama

2. Metode *Fast – Decoupled*

Metode *fast – decoupled* diturunkan dari metode Newton – Rhapson. Ini didapat dari fakta bahwa sedikit perubahan dari magnitude tegangan rel tidak memberikan perubahan yang signifikan pada daya nyata rel. Maka persamaan aliran beban dari metode Newton – Rhapson dapat disederhanakan menjadi

dua set *decoupled* yang terpisah dari persamaan aliran beban, yang dapat diselesaikan secara iterasi:

$$\begin{aligned} [\Delta P] &= [J_1][\Delta \delta] \\ [\Delta Q] &= [J_4][\Delta V] \end{aligned} \quad (2.50)$$

Metode *fast – decoupled* mengurangi penggunaan memori computer kurang lebih setengahnya bila dibandingkan dengan metode Newton – Rhapson. Metode ini juga menyelesaikan persamaan aliran beban lebih cepat dibandingkan dengan metode Newton – Rhapson, karena matriks Jacobiannya konstan.

Sama seperti pada metode Newton – Rhapson, kriteria konvergensi metode *fast – decoupled* berdasarkan penyimpangan daya nyata dan daya reaktif, di mana biasanya ditetapkan pada 0.001 untuk MW dan MVar. Meskipun untuk iterasi yang telah ditetapkan metode ini tidak seakurat metode Newton – Rhapson, namun penghematan waktu computer dan kriteria konvergensi yang lebih baik menjadikan metode ini memiliki performa keseluruhan yang sangat baik.

Pada umumnya, metode *fast – decoupled* dapat digunakan sebagai alternatif dari metode Newton – Rhapson, dan metode ini dapat digunakan jika metode Newton – Rhapson gagal menyelesaikan sistem radial yang panjang atau sistem yang memiliki kabel atau saluran transmisi yang panjang.

3. Metode *Accelerated* Gauss – Seidel

Dari persamaan nodal sistem:

$$[I] = [Y_{BUS}][V] \quad (2.51)$$

Metode *accelerated* Gauss – Seidel menurunkan persamaan aliran beban berikut dan menyelesaikannya secara iterasi:

$$[P + jQ] = [V^T][Y^*_{BUS}][V^*] \quad (2.52)$$

dengan ΔP = vektor daya nyata rangkaian

ΔQ = vektor daya reaktif rangkaian

ΔV = vektor tegangan rangkaian

Y_{BUS} = matriks admitansi sistem

Metode *accelerated* Gauss – Seidel memiliki persyaratan nilai tegangan awal rangkaian yang lebih rendah dibandingkan metode Newton – Rhapson dan metode *fast – decoupled*. Dibandingkan dengan dua metode sebelumnya yang menggunakan penyimpangan daya nyata dan daya reaktif sebagai kriteria konvergensi, metode ini mengecek apakah toleransi magnitudo tegangan rangkaian antara dua iterasi berurutan untuk mengontrol ketepatan solusi. Nilai presisi magnitudo tegangan bus biasanya ditetapkan menjadi 0.000001 pu.

Metode *accelerated* Gauss – Seidel memiliki kecepatan konvergensi yang lebih lambat. Jika faktor akselerasi yang diaplikasikan tepat, maka penambahan kecepatan secara signifikan akan didapatkan. Range faktor akselerasi adalah di antara 1.2 dan 1.7, dan biasanya ditetapkan menjadi 1.45.

BAB 3

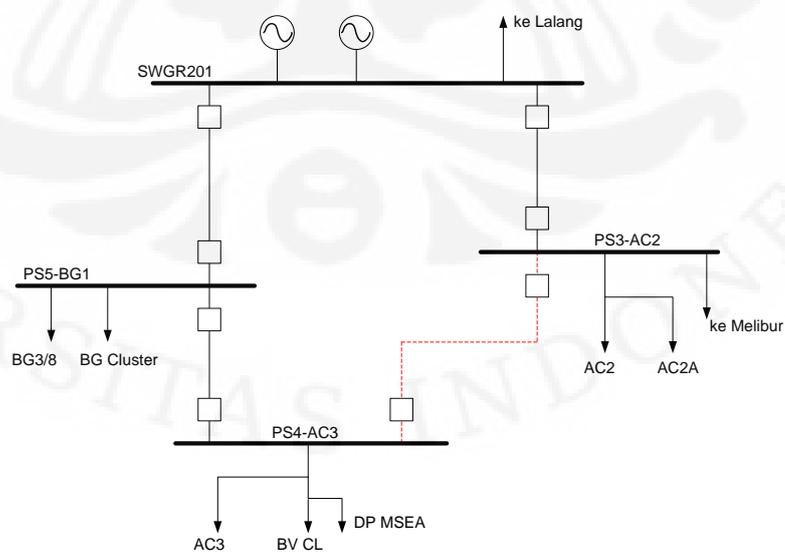
PERANCANGAN SETTING RELE ARUS LEBIH BERARAH

3.1 Umum

PT Energi Mega Persada merupakan salah satu perusahaan nasional yang bergerak dalam bidang oil & gas. Untuk mendukung kegiatan produksinya ini, tentu saja perusahaan membutuhkan suatu sistem tenaga listrik yang andal dan kontinu. Supply listrik ini terutama digunakan untuk kegiatan pengeboran yang menggunakan motor induksi.

Salah satu daerah produksi PT Energi Mega Persada terletak di Selat Malaka. Daerah produksi ini dikenal dengan nama EMP Malacca Strait. Untuk mendukung sistem tenaga listrik di sini, perusahaan menggunakan sistem pembangkit sendiri. Seluruh sistem pembangkitan dipenuhi dari enam buah generator gas turbin.

Untuk meningkatkan keandalan, kontinuitas, dan mutu sistem tenaga listrik di EMP Malacca Strait, perusahaan berencana untuk melakukan perubahan bentuk jaringan distribusi yang ada di Kurau dari bentuk jaringan radial menjadi bentuk jaringan ring. Bus yang akan dihubungkan adalah antara bus PS3AC2 dan bus PS4AC3.



Gambar 3.1 Rencana perubahan sistem jaringan distribusi di Kurau

Dengan adanya perubahan bentuk jaringan, maka sistem proteksi yang ada sebelumnya harus dievaluasi kembali. Hal ini dikarenakan pada jaringan ring, saat terjadi gangguan, misalnya pada bus, maka arus gangguan akan mengalir melalui kedua sisi. Rele harus mampu membedakan arah gangguan agar rele tidak bekerja pada kondisi di mana rele seharusnya tidak bekerja. Untuk itu, maka digunakan rele arus lebih berarah yang memiliki kemampuan untuk mendeteksi arah gangguan.

Untuk menentukan setting arus (pick up current) pada rele, ada beberapa hal yang harus dilakukan, di antaranya adalah studi aliran daya dan hubung singkat. Simulasi aliran daya dilakukan untuk mengetahui besarnya arus beban maksimum yang melewati rele, sehingga nilai arus rele harus diset di atas nilai arus beban maksimum ini. Hal ini perlu dilakukan agar jangan sampai rele bekerja pada kondisi operasi normal.

Simulasi gangguan hubung singkat dilakukan untuk mengetahui besarnya arus yang melewati rele saat terjadi gangguan hubung singkat. Dari hasil simulasi gangguan hubung singkat, arus gangguan yang terjadi selama 0.5 cycle digunakan untuk menganalisa unjuk kerja rele pengaman seketika (instantaneous). Sedangkan arus gangguan hubung singkat yang terjadi selama 30 cycle digunakan untuk menganalisa unjuk kerja rele pengaman arus lebih waktu terbalik (inverse).

Pada skripsi ini, simulasi aliran daya dan hubung singkat didasarkan pada kondisi pembangkitan maksimum, yaitu dengan seluruh pembangkitan beroperasi. Adapun kondisi dari sistem pembangkitannya adalah sebagai berikut:

- a. Di Lalang bus SWGR-828 dioperasikan sebanyak dua unit pembangkit masing-masing sebesar 2500 kW.
- b. Di Kurau Power Plant bus PS-201 dioperasikan dua unit pembangkit yaitu GT-A dan GT-B masing-masing sebesar 2800 kW
- c. Di Kurau Power Plant bus PS-201E dioperasikan dua unit pembangkit yaitu GT-C sebesar 2500 kW dan GT-D sebesar 2800 kW

Diagram satu garis dari keseluruhan sistem tenaga listrik di EMP Malacca Strait dapat dilihat pada bagian lampiran. Rating pembangkit yang digunakan dalam simulasi didasarkan pada diagram satu garis tersebut dengan sedikit perubahan mengikuti kondisi pembangkitan pada saat ini.

3.2 Spesifikasi Kabel yang Digunakan pada Rencana Jaringan Ring

Kabel yang akan menghubungkan bus PS3AC2 dan bus PS4AC3 dalam simulasi nanti merupakan kabel bawah tanah dengan asumsi sebagai berikut:

1. Kabel yang digunakan mengikuti standar ICEA (Insulated Cable Engineers Association)
2. Kabel menggunakan isolasi berupa bahan karet (rubber)
3. Rating kabel adalah 15 kV
4. Banyak konduktor adalah tiga konduktor per kabel (3/C) dengan masing-masing satu fasa per konduktor
5. Kabel terbuat dari bahan tembaga (CU)
6. Ukuran kabel adalah 2/0 AWG dengan panjang 1200 m
7. *Cable ampacity* dari kabel ini adalah 239.3 A dengan kondisi temperatur konduktor (T_c) 90°C dan temperatur lingkungan (T_a) 20°C
8. Kabel dikubur langsung di dalam tanah (direct buried)
9. Bentuk kabel adalah *concentric round*

Yang perlu diperhatikan di sini adalah bahwa kabel yang menghubungkan bus PS3AC2 dan bus PS4AC3 ini haruslah memiliki kapasitas hantar arus yang cukup besar. Hal ini dikarenakan karena kabel ini akan menghantarkan arus beban yang besar jika sewaktu-waktu terjadi kerusakan pada saluran lain dalam jaringan ring. Sehingga diharapkan kabel ini cukup kuat untuk menghantarkan arus besar dan tegangan jatuh yang terjadi tidaklah besar yang dapat menurunkan kualitas tegangan sistem.

3.3 Langkah-langkah Perancangan Sistem Proteksi

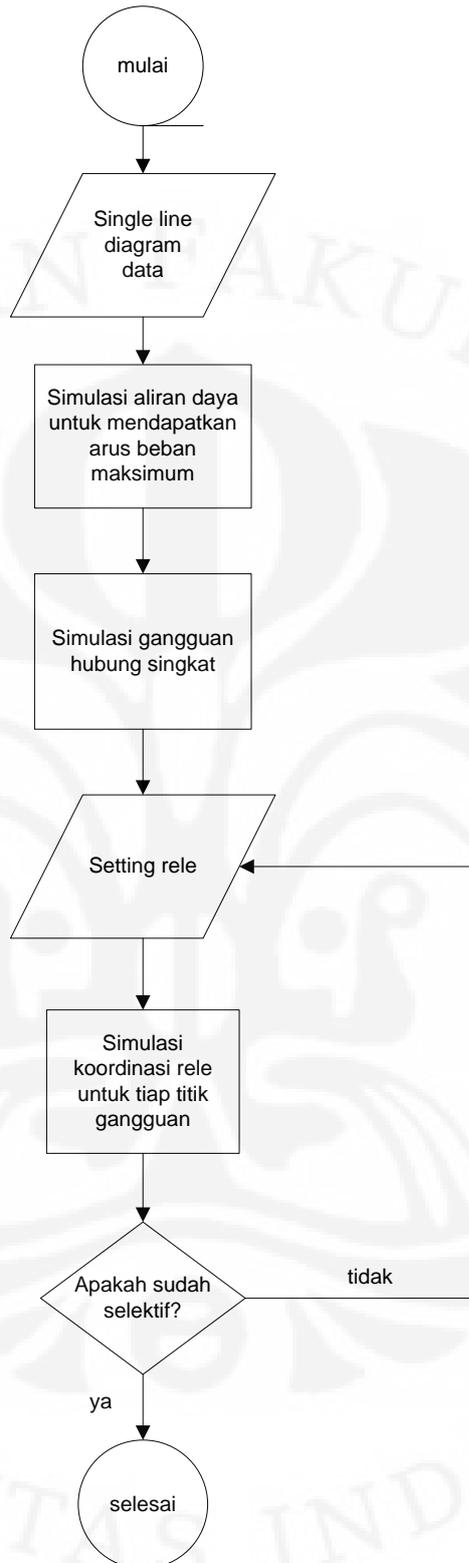
Langkah-langkah yang perlu dilakukan untuk menentukan setting bagi sistem rele proteksi adalah:

1. Perhitungan aliran daya yang masuk dan keluar dari satu bus ke bus lainnya. Perhitungan ini dilakukan untuk mengetahui arus beban maksimum
2. Perhitungan arus gangguan hubung singkat yang melewati rele. Yang perlu diperhatikan adalah arus maksimum dan minimum yang didapat

setelah melakukan simulasi gangguan hubung singkat dari setiap kemungkinan titik gangguan pada jaringan

3. Perhitungan setting arus, waktu kerja rele, sudut operasi kerja rele berarah, dan penentuan jenis karakteristik rele digunakan
4. Gambar kurva karakteristik rele arus lebih berarah untuk perancangan koordinasinya





Gambar 3.2 Diagram alir perancangan rele proteksi

3.4 Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat [9]

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:

1. Sumber dari hubung singkat yaitu generator, motor sinkron, dan motor induksi. Trafo bukan merupakan sumber dari arus hubung singkat ketika terjadi gangguan, namun hanya menyalurkan arus yang melewatinya apabila bebannya motor.
2. Untuk tegangan sistem di atas 6 kV, maka impedansi dari bus, trafo arus, pemutus tenaga dapat diabaikan.

Langkah-langkah perhitungan arus hubung singkat adalah 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 menyumbangkan arus hubung singkat
4. Penentuan titik gangguan hubung singkat dengan tempat yang spesifik terhadap kemungkinan terjadinya hubung singkat. Penentuan titik gangguan ini menentukan alat proteksi yang akan diterapkan dan kapasitasnya
5. Hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat yang terjadi selama 30 cycle digunakan untuk menganalisa unjuk kerja rele arus lebih waktu terbalik (inverse)

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 30 cycle. Pengaruh adanya kontribusi arus motor induksi saat terjadinya gangguan hubung singkat hanya terjadi pada periode subperalihan hubung singkat generator atau 0.5 cycle.

3.5 Perhitungan Setting Arus dan Waktu Kerja Rele Arus Lebih [9]

Dalam perhitungan setting arus dan waktu kerja rele, haruslah didapatkan sistem koordinasi pengaman yang selektif. Hal ini berarti bahwa 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. 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 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 mungkin timbul. Kondisi operasi normal yang terberat yang diperhitungkan dalam analisa unjuk kerja sistem proteksi adalah starting motor induksi.
6. Setting pada rele arus lebih adalah sebagai berikut:

$$1.25 \text{ arus beban maksimum} \leq I \text{ setting} < 0.5 \text{ arus hubung singkat minimum}$$

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

$$t = \left(\frac{k\beta}{(I/I_s)^\alpha - 1} \right) + L \quad (3.1)$$

di mana t = waktu operasi rele dalam detik; k = time dial atau time multiplier setting; I = besar arus gangguan pada kumparan sekunder; I_s = arus pickup/setting; L = konstanta.

Konstanta α dan β menentukan kemiringan dari kurva karakteristik. Nilai dari α , β , dan L untuk standar rele arus lebih yang berbeda dalam ANSI/IEEE dan IEC ditunjukkan pada tabel berikut:

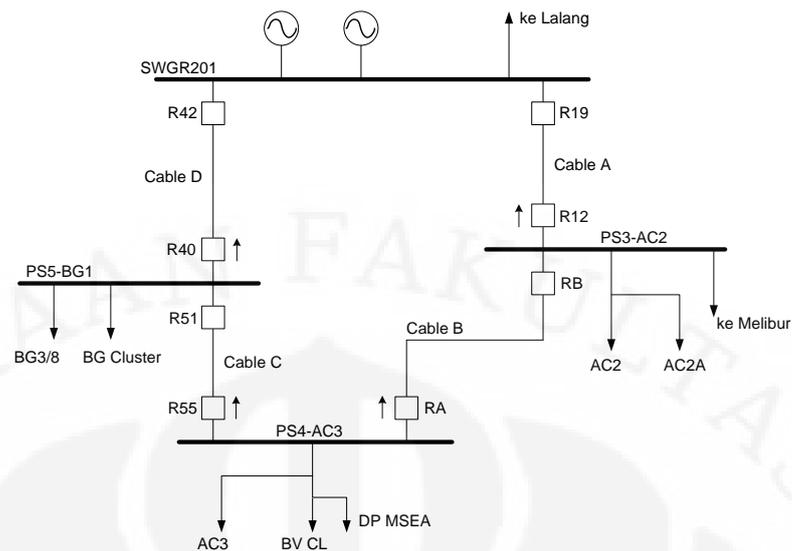
Tabel 3.1 Konstanta ANSI/IEEE dan IEC untuk standar rele arus lebih

Curve description	Standard	α	β	L
Moderately inverse	IEEE	0.02	0.0515	0.114
Very inverse	IEEE	2.0	19.61	0.491
Extremely inverse	IEEE	2.0	28.2	0.1217
Inverse	CO8	2.0	5.95	0.18
Short-time inverse	CO2	0.02	0.0239	0.0169
Standard inverse	IEC	0.02	0.14	0
Very inverse	IEC	1.0	13.5	0
Extremely inverse	IEC	2.0	80.0	0
Long-time inverse	UK	1.0	120	0

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.

3.6 Rencana Konfigurasi Rele Proteksi

Konfigurasi rele arus lebih yang akan digunakan pada jaringan distribusi di Kurau direncanakan seperti gambar berikut:



Gambar 3.3 Bentuk jaringan dan rencana konfigurasi rele

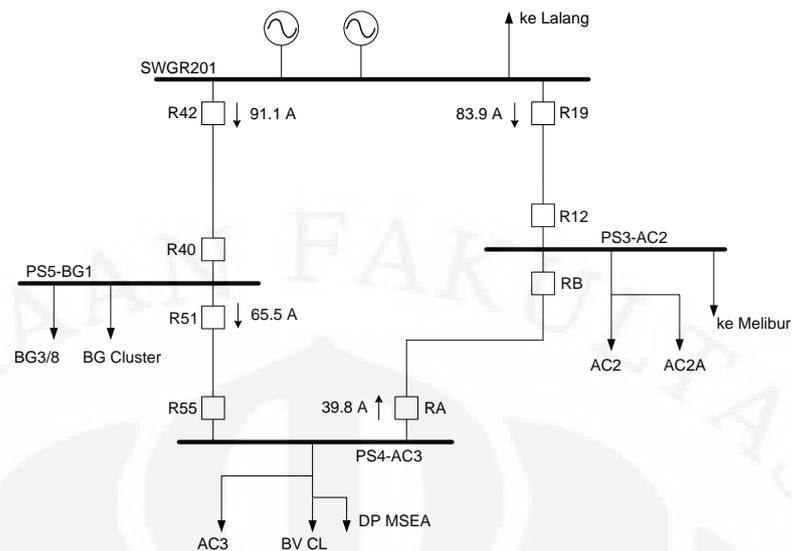
Penamaan rele mengikuti desain asli pada sistem tenaga listrik di EMP Malacca Strait. Untuk menyederhanakan gambar, penamaan rele langsung mengacu pada pemutus tenaga atau circuit breaker yang ditanganinya. Tanda panah di samping simbol setiap circuit breaker mengindikasikan setting arah arus gangguan yang akan menyebabkan trip pada rele. Lalu untuk memudahkan analisis, maka setiap kabel yang menghubungkan bus-bus dalam jaringan ring ini dinamakan Cable A, Cable B, Cable C, dan Cable D.

Cable B merupakan kabel bawah tanah dengan ukuran 2/0 dan memiliki jarak 1200 m yang menghubungkan PS3AC2 dengan PS4AC3.

3.7 Perhitungan Arus Beban Maksimum (Full Load Ampere)

Langkah pertama dalam menentukan setting untuk rele arus lebih adalah mengetahui besarnya arus beban maksimum yang melewati tiap rele. Rele arus lebih tidak boleh trip/bekerja pada kondisi beban maksimum. Untuk itu maka nilai arus pick up pada rele diset lebih besar dari arus beban maksimum.

Berikut merupakan hasil simulasi aliran daya yang menunjukkan besar arus beban maksimum yang melewati tiap rele:



Gambar 3.4 Arus beban maksimum yang melewati rele pada jaringan ring

Tabel 3.2 Arus beban maksimum yang melewati rele

Kabel	Rele	Bus		Arus (A)
		Dari bus	Ke bus	
Cable D	Rele 19	SWGR201	PS5BG1	91.1
	Rele 12			
Cable C	Rele B	PS5BG1	PS4AC3	65.5
	Rele A			
Cable B	Rele 55	PS4AC3	PS3AC2	39.8
	Rele 51			
Cable A	Rele 40	PS3AC2	SWGR201	83.9
	Rele 42			

3.8 Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat untuk Setting Rele

Berdasarkan IEEE Standard 242 – 2001, hal-hal berikut harus diperhatikan ketika melakukan studi koordinasi rele:

1. Arus maksimum dan minimum yang melewati rele saat terjadi gangguan hubung singkat satu fasa dan tiga fasa momentary (first cycle)
2. Arus maksimum dan minimum yang melewati rele saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa interrupting duty (1.5 – 8 cycles)

3. Arus maksimum dan minimum yang melewati rele saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa 30 cycle
4. Arus maksimum dan minimum yang melewati rele arus gangguan tanah (ground fault rele) untuk gangguan satu fasa ke tanah

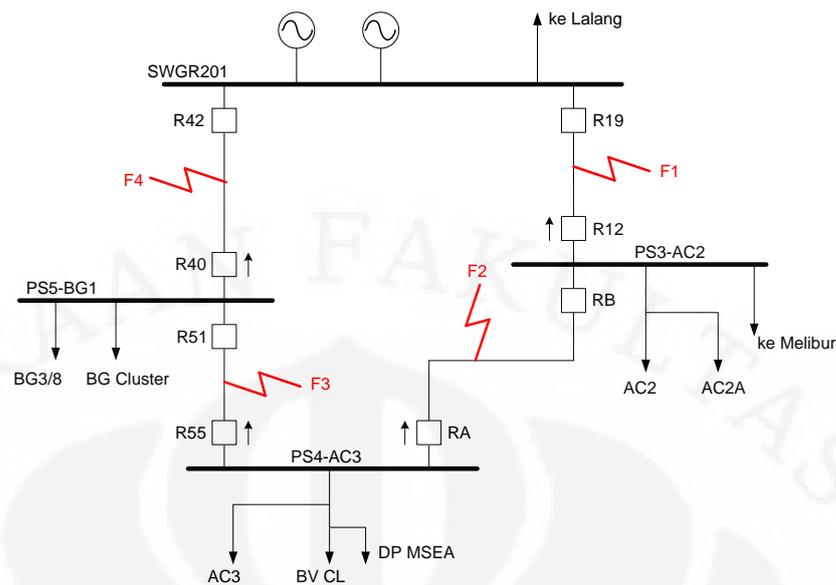
Arus gangguan momentary digunakan untuk menentukan nilai maksimum dan minimum bagi peralatan yang bekerja langsung (direct trip), misalnya rele instantenous dan fuse. Arus gangguan 30 cycle digunakan untuk menentukan nilai arus pick up bagi rele dengan persamaan sebagai berikut:

$$1.25 \text{ arus beban maksimum} \leq I \text{ setting} < 0.5 \text{ arus hubung singkat minimum}$$

Persamaan di atas merupakan persamaan untuk menentukan arus pick up bagi rele yang digunakan sebagai proteksi feeder atau saluran. Untuk rele jenis lain, misalnya rele yang ditujukan untuk proteksi transformator atau motor induksi, maka digunakan persamaan lain sesuai dengan standar yang telah ditetapkan oleh ANSI/IEEE.

Dalam simulasi gangguan hubung singkat, titik-titik gangguan pada jaringan di Kurau diasumsikan sebagai berikut:

1. Kasus 1 → titik gangguan terjadi pada Cable A, yaitu pada kabel yang menghubungkan bus SWGR201 dengan bus PS3AC2
2. Kasus 2 → titik gangguan terjadi pada Cable B, yaitu pada kabel yang menghubungkan bus PS3AC2 dengan bus PS4AC3
3. Kasus 3 → titik gangguan terjadi pada Cable C, yaitu pada kabel yang menghubungkan bus PS4AC3 dengan bus PS5BG1
4. Kasus 4 → titik gangguan terjadi pada Cable D, yaitu pada kabel yang menghubungkan bus SWGR201 dengan bus PS5BG1



Gambar 3.5 Titik terjadinya gangguan hubung singkat

3.9 Arus Hubung Singkat Maksimum dan Minimum untuk Setting Rele

Untuk menentukan arus pick up, kita cukup melihat berapa besar arus gangguan minimum yang melewati rele. Hal ini agar rele bekerja pada kondisi gangguan minimum. Arus gangguan 30 cycle digunakan untuk mempertimbangkan arus pick up pada rele waktu terbalik (inverse). Berikut merupakan besar arus minimum yang melewati tiap rele:

Tabel 3.3 Arus gangguan minimum 30 cycle yang melewati rele

Nama Rele	Arus Beban Penuh (A)	Arus Gangguan Minimum 3 Φ (A)	Arus Gangguan Minimum L – G (A)
R19	83.9	481	403
R12	83.9	951	760
RB	39.8	481	403
RA	39.8	951	760
R55	65.5	481	403
R51	65.5	951	760
R40	91.1	481	403
R42	91.1	951	760

3.10 Penentuan Setting Trafo Arus dan Trafo Tegangan

EMP Malacca Strait menggunakan trafo arus untuk proteksi dengan rasio 200/5. Lalu kelas error CT yang digunakan adalah 2.5 VA Class 5P20, yaitu rating beban sebesar 2.5 VA dengan error tidak melebihi 5% sampai batas akurasi rating arusnya.

Dari pembahasan sebelumnya, terlihat bahwa besar arus gangguan 30 cycle terbesar yang mungkin melewati rele adalah 951 A. Dari nilai ini, maka kita mendapatkan nilai arus sekunder pada CT sebesar $951/40 = 23.775$. Nilai ini masih jauh dari batas akurasi CT yang digunakan, yaitu 20 kali rating arus CT = $20 \times 5 = 100$ A. Sehingga CT dengan rasio ini masih akurat untuk digunakan. CT ini memiliki batas akurasi sampai $20 \times 5 = 100$ A pada rangkaian sekundernya dan batas akurasi pada rangkaian primernya adalah $100 \times (200/5) = 4000$ A.

Untuk setting trafo tegangan (VT), rating yang digunakan adalah 13.8 kV/120 V. Sedangkan kelas akurasi yang digunakan adalah kelas 3P, yaitu error sebesar 3% untuk trafo proteksi.

3.11 Penyetelan Nilai Arus Untuk Rele Fasa dan Rele Tanah

Untuk menentukan besarnya arus pickup untuk rele fasa dan rele tanah, maka digunakan kaidah sebagai berikut:

1.25 arus beban maksimum $\leq I$ setting < 0.5 arus hubung singkat minimum

Dari kaidah di atas terlihat bahwa besar arus pickup haruslah lebih besar dari 1.25 arus nominal dan lebih kecil dari 0.5 arus gangguan minimum yang dilihat oleh rele. Berikut merupakan tabel nilai setting arus pada rele fasa:

Tabel 3.4 Penyetelan arus pada rele fasa

Rele Fasa	1.25 arus nominal (A)	0.5 gangguan minimum (A)	I setting (A)
R19	105.125	240.5	3.75
R12	105.125	475.5	3.75
RB	50	240.5	3.75
RA	50	475.5	3.75
R55	82.125	240.5	3.75
R51	82.125	475.5	3.75
R40	114.125	240.5	3.75
R42	114.125	475.5	3.75

Dari tabel di atas, penulis mengambil nilai tengah yaitu sekitar 150 A.

Pada rele, nilai ini pada kumparan sekunder CT adalah $150/40 = 3.75$ A.

Untuk rele tanah, setting arus pada rele adalah sebagai berikut:

Tabel 3.5 Penyetelan arus pada rele tanah

Rele Tanah	Arus gangguan minimum (A)	0.5 arus gangguan minimum (A)	I setting
R19	403	201.5	2.5
R12	760	380	2.5
RB	403	201.5	2.5
RA	760	380	2.5
R55	403	201.5	2.5
R51	760	380	2.5
R40	403	201.5	2.5
R42	760	380	2.5

Dari tabel di atas, penulis mengambil nilai yang lebih kecil dari 0.5 arus gangguan minimum yaitu 100 ampere. Karena pada rele tanah, saat kondisi normal (tidak ada gangguan), arus yang mengalir pada rele tanah tidak ada atau sangat kecil. Oleh karena itu, walaupun nilainya lebih kecil dari setting rele fasa, namun tidak

akan membuat trip rele tanah. Pada rele tanah, nilai ini pada kumparan sekunder CT adalah $100/40 = 2.5$ ampere.

3.12 Penentuan *Time Multiplier Setting* (TMS)

Setting waktu koordinasi rele adalah sebagai berikut:

- 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.
- Pemilihan faktor pengali waktu pada kurva rele (*Time Multiplier Setting*/TMS) dengan memilih TMS yang terkecil untuk bagian paling hilir, sedangkan untuk daerah selanjutnya tergantung dari perhitungan dan koordinasi rele.
- Waktu interval antar rele digunakan 0.3 – 0.4 detik dengan anggapan bahwa waktu overshoot, pembukaan pemutus tenaga, faktor kesalahan dan faktor keamanan telah diperhitungkan waktunya.

Untuk mendapatkan nilai TMS yang dikehendaki, cara yang dilakukan adalah dengan metode trial and error. Yaitu dengan mengubah-ubah karakteristik kurva agar waktu koordinasi antar rele sesuai dengan yang kita inginkan (0.3 – 0.4 detik).

Setelah dilakukan simulasi koordinasi pada ETAP 6, didapatkan setting TMS sebagai berikut:

Tabel 3.6 Penyetelan TMS pada rele fasa

Rele Fasa	TMS	Karakteristik
R19	8.56	SI
R12	0.5	SI
RB	5.9	SI
RA	4.8	SI
R55	3.24	SI
R51	9.07	SI
R40	0.5	SI
R42	13.67	SI

Tabel 3.7 Penyetelan TMS pada rele tanah

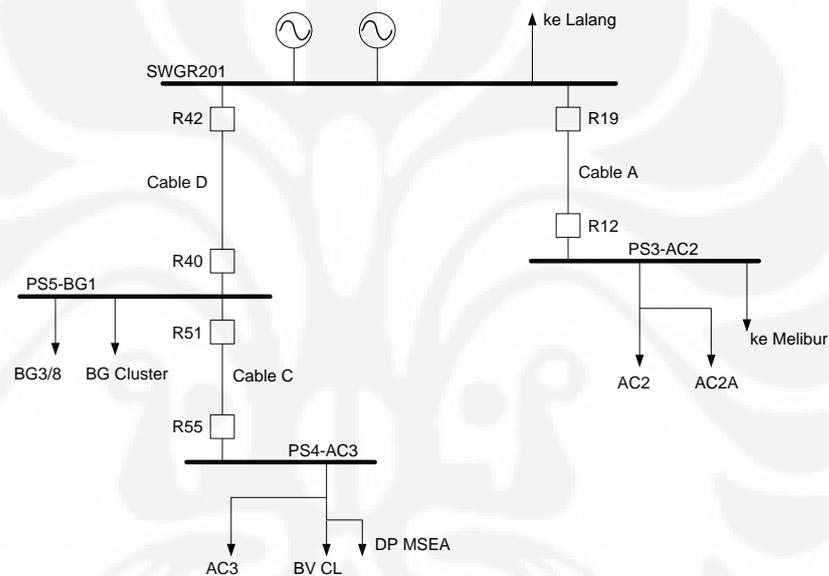
Rele Tanah	TMS	Karakteristik
R19	10.33	SI
R12	0.5	SI
RB	6.99	SI
RA	4.98	SI
R55	3.76	SI
R51	9.07	SI
R40	0.5	SI
R42	14.55	SI

BAB 4

HASIL SIMULASI KOORDINASI RELE ARUS LEBIH BERARAH

4.1 Penyetelan Rele pada Jaringan Radial (Existing)

Jaringan distribusi yang ada saat ini di EMP Malacca Strait adalah berbentuk jaringan distribusi radial. Oleh karena itu maka rele yang digunakan pada jaringan ini adalah rele arus lebih. Merek yang digunakan saat ini adalah merek Basler.



Gambar 4.1 Konfigurasi rele arus lebih pada jaringan existing

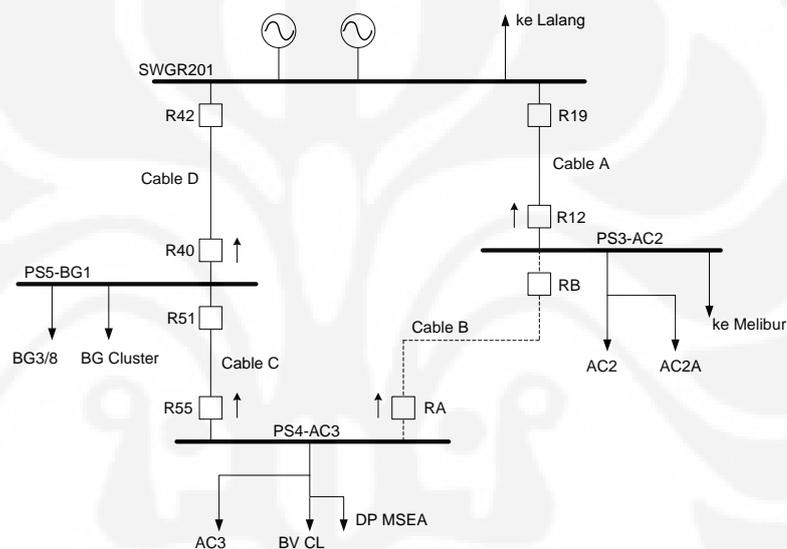
Tabel 4.1 Setting rele pada jaringan radial

Nomor Rele	Merek	CT	Penyetelan Rele					
			Fasa			Tanah		
			I_{set}	TMS	Kurva	I_{set}	TMS	Kurva
R19	Basler BE1-51	200/5	6.6	60	SI	0.8	50	SI
R12	Basler BE1-51	200/5	4.5	60	SI	5.5	60	SI
R55	Basler BE1-51	200/5	3.2	60	SI	3.2	30	SI
R51	Basler BE1-51	200/5	6	15	SI	1.5	50	SI
R40	Basler BE1-51	200/5	6.6	20	SI	4	50	SI
R42	Basler BE1-51	200/5	6.6	20	SI	1	50	SI

4.2 Penyetelan Rele pada Jaringan Ring

EMP Malacca Strait berencana untuk mengubah jaringan distribusi saat ini yang berbentuk radial menjadi jaringan ring. Hal ini dilakukan untuk meningkatkan keandalan dan kontinuitas sistem tenaga listrik di EMP Malacca Strait. Bus yang akan dihubungkan adalah bus PS3AC2 dengan bus PS4AC3 dengan kabel bawah tanah berukuran 2/0 dan memiliki panjang 1200 m.

Dari perancangan pada bab sebelumnya, maka kita bisa membuat rencana konfigurasi rele pada jaringan distribusi ring sebagai berikut:



Gambar 4.2 Rencana konfigurasi rele arus lebih pada jaringan ring

Menurut rencana, EMP Malacca Strait akan menggunakan rele arus lebih berarah dengan merek SEL dari pabrikan Schweitzer Engineering Laboratories. Rele yang digunakan adalah rele arus lebih berarah untuk fasa dan tanah. Berikut merupakan nilai setting rele yang akan digunakan selanjutnya nanti dalam simulasi untuk mengetahui koordinasi rele.

Tabel 4.2 Setting rele untuk perencanaan jaringan ring

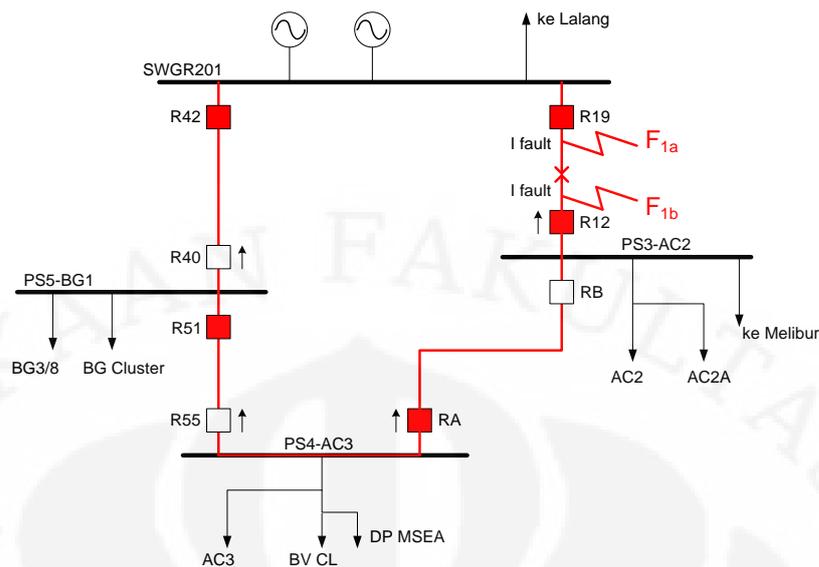
Nomor Rele	Merek	CT	VT	Penyetelan Rele					
				Fasa			Tanah		
				I _{set}	TMS	Kurva	I _{set}	TMS	Kurva
R19	SEL 351 (67)	200/5	-	3.75	8.56	SI	2.5	10.33	SI
R12	SEL 351 (67)	200/5	13.8 kV/ 120 V	3.75	0.5	SI	2.5	0.5	SI
RB	SEL 351 (67)	200/5	-	3.75	5.9	SI	2.5	6.99	SI
RA	SEL 351 (67)	200/5	13.8 kV/ 120 V	3.75	4.8	SI	2.5	4.98	SI
R55	SEL 351 (67)	200/5	13.8 kV/ 120 V	3.75	3.24	SI	2.5	3.76	SI
R51	SEL 351 (67)	200/5	-	3.75	9.07	SI	2.5	9.07	SI
R40	SEL 351 (67)	200/5	13.8 kV/ 120 V	3.75	0.5	SI	2.5	0.5	SI
R42	SEL 351 (67)	200/5	-	3.75	13.67	SI	2.5	14.55	SI

Untuk hubungan rele arah, yang digunakan adalah hubungan $90^0 - 60^0$, baik untuk rele fasa maupun rele tanah. Rele hubungan ini digunakan karena rele ini memiliki daerah operasi kerja untuk arus gangguan antara 30^0 leading sampai 150^0 lagging.

4.3 Hasil Simulasi Koordinasi Rele Proteksi

4.3.1 Titik Gangguan pada Cable A

Jika terjadi gangguan pada Cable A, yaitu kabel antara bus SWGR201 dan PS3AC2, maka rele utama yang harus bekerja adalah Rele 19 dan Rele 12. Untuk kasus ini yang akan disimulasikan adalah gangguan yang terjadi di dekat SWGR201 dan di dekat PS3AC2.



Gambar 4.3 Titik gangguan antara SWGR201 dan PS3AC2

a. Gangguan Terjadi di Dekat Bus SWGR201

Pada kasus ini, jika titik gangguan terjadi di dekat bus SWGR201, maka besar arus yang menuju titik gangguan sama dengan besar arus gangguan yang terjadi pada bus SWGR201. Oleh karena itu maka arus gangguan hanya berasal dari SWGR201 menuju titik gangguan F_{1a} , sehingga rele yang bekerja hanya rele 19 yaitu setelah 0.523 s. Besar arus gangguan 3 fasa 30 cycle sebesar 2572 A. Kurva dari rele ini dapat dilihat pada lampiran 2 halaman 77.

Untuk gangguan tanah, rele 19 bekerja setelah 0.599 s dengan besar arus gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah sebesar 2486 A. Kurva dari rele ini dapat dilihat pada lampiran 2 halaman 78.

b. Gangguan Terjadi di Dekat Bus PS3AC2

Untuk titik gangguan di dekat bus PS3AC2, maka rele utama yang harus bekerja adalah Rele 12 dan Rele 19. Berikut merupakan hasil simulasi koordinasi rele proteksi untuk gangguan di F_{1b} :

Tabel 4.3 Hasil simulasi koordinasi rele fasa pada kasus F_{1b}

Clockwise (Arus Gangguan 1150 A)	Anticlockwise (Arus Gangguan 951 A)
Rele 19 → 0.738 s	Rele 12 → 0.0468 s
	Rele A → 0.449 s
	Rele 51 → 0.848 s
	Rele 42 → 1.28 s

Kurva terdapat pada lampiran halaman 79 – 80

Tabel 4.4 Hasil simulasi koordinasi rele tanah pada kasus F_{1b}

Clockwise (Arus Gangguan 908 A)	Anticlockwise (Arus Gangguan 760 A)
Rele 19 → 0.81 s	Rele 12 → 0.0426 s
	Rele A → 0.425 s
	Rele 51 → 0.833 s
	Rele 42 → 1.23 s

Kurva terdapat pada lampiran halaman 81 – 82

Dari hasil simulasi terlihat bahwa rele yang bekerja pertama kali adalah rele 12 yaitu setelah 0.0426 detik setelah gangguan. Jika rele ini bekerja maka rele berikutnya yang bekerja untuk memutus arus gangguan yang searah jarum jam adalah rele 19 yaitu setelah 0.81 detik setelah gangguan.

Sebagai pengaman cadangan bila rele 12 gagal bekerja, maka rele berikutnya yang harus bekerja adalah rele A yaitu setelah 0.425 detik setelah terjadi gangguan. Jika rele A gagal ini gagal bekerja, maka rele pengaman berikutnya adalah rele 51 yang bekerja setelah 0.833 detik setelah gangguan. Sebagai pengaman terakhir jika rele 51 gagal bekerja, maka rele 42 akan bekerja setelah 1.23 detik setelah gangguan.

Terlihat dari hasil simulasi bahwa koordinasi antar rele telah memenuhi kriteria, yaitu beda waktu antara tiap rele utama dan cadangan sebesar 0.3 – 0.4 detik.

4.3.2 Titik Gangguan pada Cable B

Jika terjadi gangguan pada Cable B, yaitu kabel antara bus PS3AC2 dan PS4AC3, maka rele utama yang harus bekerja adalah rele A dan rele B. Untuk

Tabel 4.6 Hasil simulasi koordinasi rele tanah pada kasus F_{2a}

Clockwise (Arus Gangguan 908 A)	Anticlockwise (Arus Gangguan 760 A)
Rele B → 0.548 s	Rele A → 0.425 s
Rele 19 → 0.81 s	Rele 51 → 0.833 s
	Rele 42 → 1.23 s

Kurva terdapat pada lampiran halaman 85 – 86

b. Gangguan Terjadi di Dekat Bus PS4AC3

Untuk kasus ini pun, hasil simulasi menunjukkan bahwa koordinasi antar rele telah memenuhi kriteria, yaitu dengan beda waktu antar rele sekitar 0.3 – 0.4 detik.

Tabel 4.7 Hasil simulasi koordinasi rele fasa pada kasus F_{2b}

Clockwise (Arus Gangguan 925 A)	Anticlockwise (Arus Gangguan 1148 A)
Rele B → 0.56 s	Rele A → 0.408 s
Rele 19 → 0.812 s	Rele 51 → 0.771 s
	Rele 42 → 1.16 s

Kurva terdapat pada lampiran halaman 87 – 88

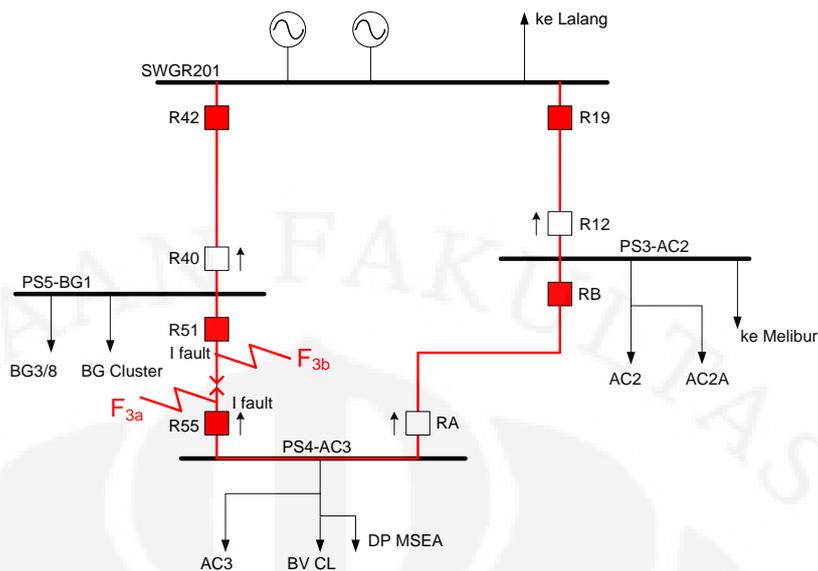
Tabel 4.8 Hasil simulasi koordinasi rele tanah pada kasus F_{2b}

Clockwise (Arus Gangguan 751 A)	Anticlockwise (Arus Gangguan 922 A)
Rele B → 0.599 s	Rele A → 0.388 s
Rele 19 → 0.885 s	Rele 51 → 0.761 s
	Rele 42 → 1.13 s

Kurva terdapat pada lampiran halaman 89 – 90

4.3.3 Titik Gangguan pada Kabel C

Jika terjadi gangguan pada Cable C, yaitu kabel antara bus PS4AC3 dan PS5BG1, maka rele utama yang harus bekerja adalah rele 55 dan rele 51. Untuk kasus ini akan disimulasikan gangguan terjadi di dekat PS4AC3 dan di dekat PS5BG1.



Gambar 4.5 Titik gangguan antara PS4AC3 dan PS5BG1

a. Gangguan Terjadi di Dekat Bus PS4AC3

Pada kasus ini, rele utama yang harus bekerja adalah Rele 55 dan Rele 51. Untuk gangguan hubung singkat 3 fasa, Rele 55 akan bekerja setelah 0.307 detik dan Rele 51 akan bekerja setelah 0.771 detik.

Tabel 4.9 Hasil simulasi koordinasi rele fasa pada kasus F_{3a}

Clockwise (Arus Gangguan 925 A)	Anticlockwise (Arus Gangguan 1148 A)
Rele 55 → 0.307 s	Rele 51 → 0.771 s
Rele B → 0.56 s	Rele 42 → 1.16 s
Rele 19 → 0.812 s	

Kurva terdapat pada lampiran halaman 91 – 92

Untuk gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, Rele 55 akan bekerja setelah 0.322 detik dan Rele 51 akan bekerja setelah 0.761 detik.

Tabel 4.10 Hasil simulasi koordinasi rele tanah pada kasus F_{3a}

Clockwise (Arus Gangguan 751 A)	Anticlockwise (Arus Gangguan 922 A)
Rele 55 → 0.322 s	Rele 51 → 0.761 s
Rele B → 0.599 s	Rele 42 → 1.13 s
Rele 19 → 0.885 s	

Kurva terdapat pada lampiran halaman 93 – 94

b. Gangguan Terjadi di Dekat Bus PS5BG1

Untuk kasus ini pun, hasil simulasi menunjukkan bahwa koordinasi antar rele telah memenuhi kriteria, yaitu dengan beda waktu antar rele sekitar 0.3 – 0.4 detik.

Tabel 4.11 Hasil simulasi koordinasi rele fasa pada kasus F_{3b}

Clockwise (Arus gangguan 481 A)	Anticlockwise (Arus Gangguan 1722 A)
Rele 55 → 0.478 s	Rele 51 → 0.644 s
Rele B → 0.871 s	Rele 42 → 0.97 s
Rele 19 → 1.26 s	

Kurva terdapat pada lampiran halaman 95 – 96

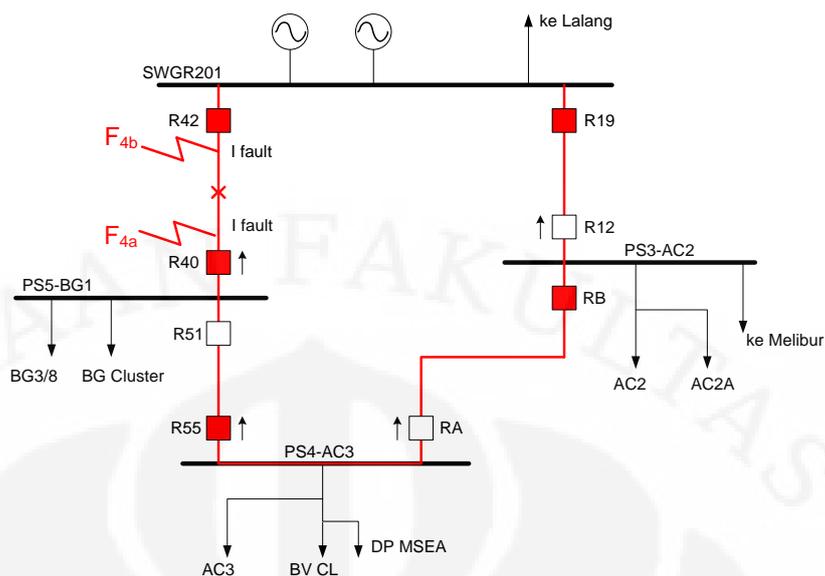
Tabel 4.12 Hasil simulasi koordinasi rele tanah pada kasus F_{3b}

Clockwise (Arus Gangguan 403 A)	Anticlockwise (Arus Gangguan 1461 A)
Rele 55 → 0.465 s	Rele 51 → 0.632 s
Rele B → 0.864 s	Rele 42 → 0.935 s
Rele 19 → 1.28 s	

Kurva terdapat pada lampiran halaman 97 – 98

4.2.4 Titik Gangguan pada Cabel D

Jika terjadi gangguan pada Cable D, yaitu kabel antara bus PS5BG1 dan SWGR201, maka rele utama yang harus bekerja adalah rele 40 dan rele 42. Untuk kasus ini akan disimulasikan gangguan terjadi di dekat PS5BG1 dan di dekat SWGR201.



Gambar 4.6 Titik gangguan antara PS5BG1 dan SWGR201

a. Gangguan Terjadi di Dekat Bus PS5BG1

Terlihat dari hasil simulasi bahwa koordinasi antar rele telah memenuhi kriteria, yaitu beda waktu antara tiap rele utama dan cadangan sebesar 0.3 – 0.4 detik untuk rele fasa dan rele tanah.

Tabel 4.13 Hasil simulasi koordinasi rele fasa pada kasus F_{4a}

Clockwise (Arus Gangguan 481 A)	Anticlockwise (Arus Gangguan 1722 A)
Rele 40 → 0.0738 s	Rele 42 → 0.97 s
Rele 55 → 0.478 s	
Rele B → 0.871 s	
Rele 19 → 1.26 s	

Kurva terdapat pada lampiran halaman 99 – 100

Tabel 4.14 Hasil simulasi koordinasi rele tanah pada kasus F_{4a}

Clockwise (Arus Gangguan 403 A)	Anticlockwise (Arus Gangguan 1461 A)
Rele 40 → 0.0618 s	Rele 42 → 0.935 s
Rele 55 → 0.465 s	
Rele B → 0.864 s	
Rele 19 → 1.28 s	

Kurva terdapat pada lampiran halaman 101 – 102

b. Gangguan Terjadi di Dekat Bus SWGR201

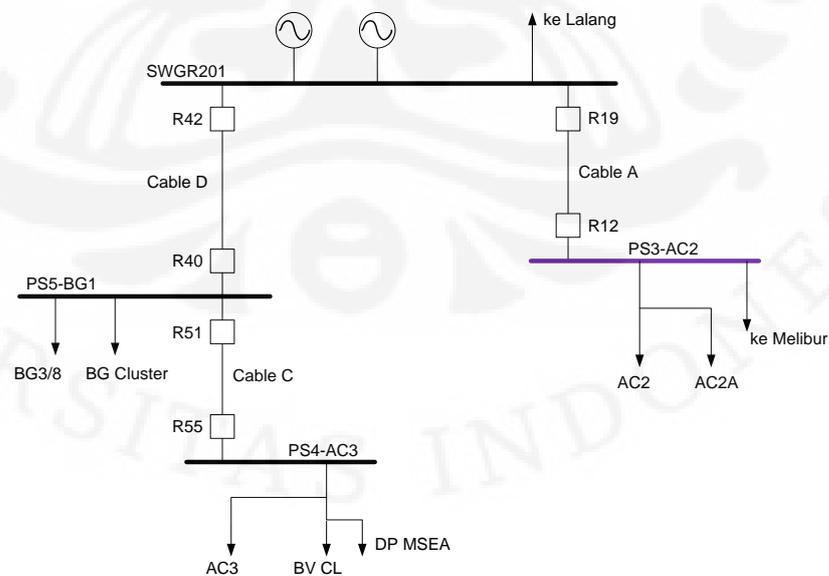
Pada kasus ini, jika titik gangguan terjadi di dekat bus SWGR201, maka besar arus yang menuju titik gangguan sama dengan besar arus gangguan yang terjadi pada bus SWGR201. Oleh karena itu maka arus gangguan hanya berasal dari SWGR201 menuju titik gangguan F_{4b} , sehingga rele yang bekerja hanya rele 42 yaitu setelah 0.835 s. Besar arus gangguan 3 fasa 30 cycle sebesar 2572 A. Kurva dari rele ini dapat dilihat pada lampiran halaman 103.

Untuk gangguan tanah, rele 42 bekerja setelah 0.838 s dengan besar arus gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah sebesar 2486 A. Kurva dari rele ini dapat dilihat pada lampiran halaman 104.

4.4 Perbandingan Kualitas Tegangan Jaringan Radial dan Ring

4.4.1 Kualitas Tegangan pada Jaringan *Existing* (Radial)

Simulasi ini dibatasi hanya untuk mengetahui kualitas tegangan dan kemampuan rating dari kabel pada jaringan di daerah Kurau EMP Malacca Strait. Simulasi dilakukan dengan asumsi bahwa rating kabel pada ETAP menggunakan standar IEEE 399-1997 untuk kabel Underground Buried.



Gambar 4.7 Diagram satu garis sistem jaringan *existing*

Tabel 4.15 Hasil aliran daya untuk jaringan *existing*

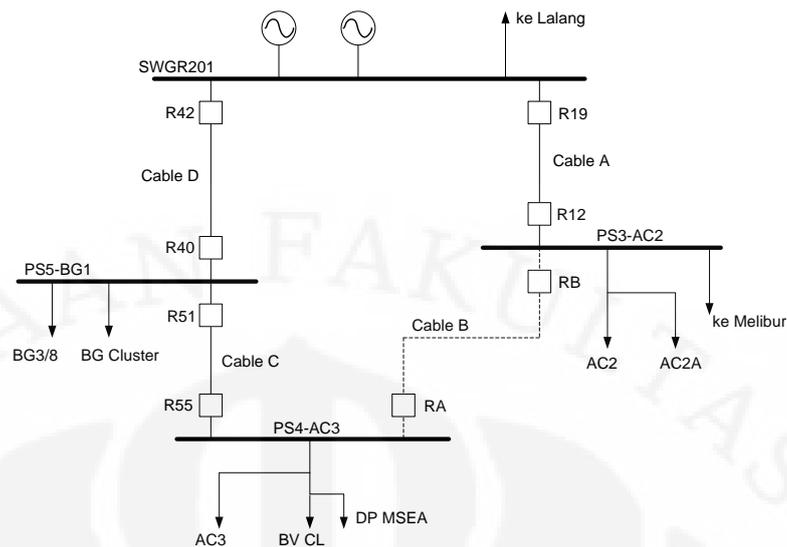
Nama Peralatan	Kapasitas	Operasi	%Operasi	Status	Kondisi
Cable D	310.24 A	51.17 A	16.49	Normal	
Cable C	239.33 A	25.42 A	10.62	Normal	
Cable A	310.24 A	125.17 A	40.34	Normal	
PS3-AC2	13.8 kV	13.417 kV	97.23	Marginal	Undervoltage
PS4-AC3	13.8 kV	13.71 kV	99.66	Normal	
PS5-BG1	13.8 kV	13.758 kV	101.01	Normal	

Dari hasil simulasi, terlihat bahwa pada jaringan *existing* yang berbentuk radial, bus PS3AC2 mengalami undervoltage hingga batas marginal. Maksud dari batas marginal ini adalah nilai jatuh tegangan berkisar $\pm 2,5\%$ dari rating peralatan.

4.4.2 Kualitas Tegangan pada Jaringan *Planning* (Ring)

Untuk mengubah sistem jaringan radial menjadi jaringan ring, direncanakan penambahan sebuah kabel baru yang menghubungkan bus PS4AC3 dengan bus PS3AC2. Diasumsikan bahwa panjang kabel adalah 1200 m dan ukuran kabel 2/0 AWG. Untuk memudahkan analisa, kabel baru ini kita namakan Cable B.

Simulasi ini dilakukan untuk melihat apakah dengan perubahan jaringan dari radial ke ring, akan terjadi peningkatan kualitas tegangan pada sistem tenaga listrik. Berikut merupakan hasil dari simulasi aliran daya pada jaringan ring:



Gambar 4.8 Diagram satu garis *planning* sistem jaringan ring

Tabel 4.16 Hasil aliran daya untuk *planning* jaringan ring

Nama Peralatan	Kapasitas	Operasi	%Operasi	Status
Cable D	310.24 A	91.06 A	29.35	Normal
Cable C	239.33 A	65.51 A	27.37	Normal
Cable A	310.24 A	83.87 A	27.03	Normal
Cable B	239.3 A	39.84 A	16.65	Normal
PS3-AC2	13.8 kV	13.554 kV	98.43	Normal
PS4-AC3	13.8 kV	13.559 kV	98.66	Normal
PS5-BG1	13.8 kV	13.673 kV	99.55	Normal

Dari hasil simulasi aliran daya terlihat bahwa kualitas tegangan pada jaringan ring lebih baik dibandingkan kualitas tegangan pada jaringan radial. Dari tabel di atas terlihat bahwa persen jatuh tegangan tidak melebihi $\pm 2.5\%$ dari tegangan rating pada busbar. Hal ini dikarenakan pada jaringan distribusi ring, supply untuk beban dikirim melalui dua sisi, sehingga tegangan jatuhnya lebih kecil. Selain itu, pada jaringan distribusi ring, keandalan dan kontinuitas penyaluran daya lebih terjaga karena jika terjadi suatu gangguan hubung singkat pada saluran, maka *supply* untuk beban tidak terputus. *Supply* masih bisa dikirim melalui saluran lainnya.

Tabel 4.17 Hasil aliran daya saat terjadi gangguan pada Cable D

Nama Peralatan	Kapasitas	Operasi	%Operasi	Status	Kondisi
Cable C	239.33 A	27.85 A	11.64	Normal	Normal
Cable A	310.24 A	182.28 A	58.76	Normal	Normal
Cable B	239.3 A	54.42 A	22.74	Normal	Normal
PS3-AC2	13.8 kV	13.158 kV	95.35	Marginal	Undervoltage
PS4-AC3	13.8 kV	13.118 kV	95.06	Marginal	Undervoltage
PS5-BG1	13.8 kV	13.068 kV	94.7	Critical	Undervoltage

Dari tabel di atas, tampak jelas terlihat bahwa bus paling jauh dari sumber, yaitu bus PS5BG1, mengalami jatuh tegangan paling besar yaitu sebesar 94.7%. Jatuh tegangan ini melebihi batas kritis dari batas yang diizinkan terjadi dalam sistem, yaitu melebihi toleransi $\pm 5\%$.

Jatuh tegangan kritis pada bus PS5BG1 ini diakibatkan oleh semakin bertambah panjang saluran dari sumber menuju beban. Dalam hal ini panjang saluran menuju PS5BG1 adalah 12.7 km. Semakin panjang saluran penghantar maka semakin besar pula nilai hambatannya sehingga jatuh tegangan menjadi semakin besar.

Untuk mengatasi hal ini, maka ada beberapa tindakan yang bisa dipertimbangkan. Salah satunya adalah memperbesar ukuran kabel bawah tanah yang digunakan pada jaringan ring. Semakin besar luas penampang kabel maka nilai hambatannya semakin kecil. Selain pertimbangan merubah ukuran kabel, pilihan lainnya adalah dengan menaikkan tap trafo antara Lalang dan Kurau. Dengan menaikkan tegangan keluaran dari trafo, maka tegangan di Kurau juga akan naik sehingga saat terjadi gangguan pada Cable D, jatuh tegangan yang terjadi tidak melebihi batas kritis.

Tabel 4.18 Perbandingan hasil aliran daya setelah rekomendasi

Nama Peralatan	Kapasitas	%Operasi		Status	
		Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah
Cable C	310.2 A	11.64	8.6	Normal	Normal
Cable A	310.2 A	58.76	56.8	Normal	Normal
Cable B	308.5 A	22.74	17	Normal	Normal
PS3-AC2	13.8 kV	95.35	98.9	Marginal	Normal
PS4-AC3	13.8 kV	95.06	97.89	Marginal	Marginal
PS5-BG1	13.8 kV	94.7	97.64	Critical	Marginal

Tabel di atas merupakan hasil simulasi aliran daya dengan beberapa penggantian sebagai berikut:

1. Mengganti Cable B dan Cable C dari ukuran 2/0 AWG menjadi 4/0 AWG
2. Menaikkan tap trafo pada saluran kabel bawah laut sebesar 2.5% pada tap sekunder yang menuju Kurau

Dari hasil simulasi terlihat bahwa setelah dilakukan beberapa penggantian ukuran kabel dan menaikkan tap trafo, maka jatuh tegangan rata-rata yang terjadi pada jaringan di Kurau saat terjadi gangguan di Cable D menjadi lebih kecil yaitu di bawah toleransi $\pm 5\%$.

BAB 5

KESIMPULAN

Dari pembahasan yang telah diuraikan pada bab-bab sebelumnya maka dapat disimpulkan beberapa hal, yaitu:

1. Untuk menentukan penyetelan arus pada rele, lakukan simulasi aliran daya untuk mendapatkan arus beban maksimum dan perhitungan arus gangguan hubung singkat yang mungkin melewati rele. Penyetelan arus pada rele harus lebih besar dari arus beban maksimum dan lebih kecil dari arus gangguan minimum.
2. Dari hasil simulasi koordinasi rele, terlihat bahwa koordinasi antar rele telah berjalan dengan baik, yaitu dengan waktu kerja antar rele utama dan rele cadangan rata-rata 0.3 – 0.4 detik.
3. Dari hasil simulasi aliran daya, persen jatuh tegangan pada jaringan distribusi ring lebih baik dibandingkan jaringan distribusi radial, yaitu dengan toleransi jatuh tegangan pada jaringan distribusi ring tidak lebih dari $\pm 2.5\%$. Misalnya pada bus PS3AC2 persen tegangan berubah dari 97.23% pada jaringan radial menjadi 98.43% pada jaringan ring.

DAFTAR ACUAN

- [1] ANSI/IEEE Standard 242 – 2001 IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems
- [2] ANSI/IEEE Standard 141 – 1993 IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants
- [3] C. L. Wadhwa, *Electrical Power System*, New Age International, 2009
- [4] J. Lewis Blackburn, *Protective Relaying: Principles and Application*, CRC Press, 2006
- [5] J. Lewis Blackburn, *Symmetrical Components for Power Systems Engineering*, Marcel Dekker, 1993
- [6] Juan M. Gers & Edward J. Holmes, *Protection of Electricity Distribution Network*, IEE Press, 2004
- [7] Karl Zimmerman & David Costello, “*Fundamentals and Improvements for Directional Relays*”, IEEE Journal, 2010
- [8] L. G. Hewitson, et al, *Practical Power System Protection*, Newnes Elsevier, 2004
- [9] M. Nanda Febriadi, “*Analisis Koordinasi Rele Arus Lebih dan Rele Gangguan Tanah Sebagai Pengaman Motor Induksi, Kabel, dan Trafo pada Plant XI di PT Indocement*”, Tugas Akhir, Depok, 2008
- [10] Perinov, “*Simulasi dan Analisis Perbandingan Studi Aliran Beban dan Hubung Singkat Saluran Transmisi dari Sistem Radial Menjadi Loop*”, Tugas Akhir, Depok, 2004
- [11] Nasser Tleis, *Power Systems Modelling and Faults Analysis*, Newnes Elsevier, 2008
- [12] Ridwan Gunawan & Nanang Rohadi, “*Studi Perencanaan Sistem Proteksi Gardu Induk 150/20 kV Karet Lama dengan Menggunakan Relay Jarak*”, Paper, Depok, 1998
- [13] T. Davies, *Protection of Industrial Power Systems*, Pergamon Press, 1984

DAFTAR PUSTAKA

Alan L. Sheldrake, *Handbook of Electrical Engineering – for Practitioners in the Oil, Gas, and Petrochemical Industry*, John Wiley & Sons, 2003

ANSI/IEEE Standard 242 – 2001 IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems

ANSI/IEEE Standard 141 – 1993 IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants

B.M. Weedy & B.J. Cory, *Electric Power System*, John Wiley & Sons, 1998

C. Russel Mason, *Art and Science Protective Relaying*, GE Company

I.J. Nagrath & D.P. Kothari. *Modern Power System Analysis*, McGraw – Hill, 1980

J. Lewis Blackburn, *Protective Relaying: Principles and Application*, CRC Press, 2006

J. Lewis Blackburn, *Symmetrical Components for Power Systems Engineering*, Marcel Dekker, 1993

John Horak & Walt Babic, “*Directional Overcurrent Relaying (67) Concepts*”, Basler Electric Company

Juan M. Gers & Edward J. Holmes, *Protection of Electricity Distribution Network*, IEE Press, 2004

Karl Zimmerman & David Costello, “*Fundamentals and Improvements for Directional Relays*”, IEEE Journal, 2010

L. G. Hewitson, et al, *Practical Power System Protection*, Newnes Elsevier, 2004

Lou van der Sluis, *Transient in Power Systems*, John Wiley & Sons, 2001

M. Nanda Febriadi, “*Analisis Koordinasi Rele Arus Lebih dan Rele Gangguan Tanah Sebagai Pengaman Motor Induksi, Kabel, dan Trafo pada Plant XI di PT Indocement*”, Tugas Akhir, Depok, 2008

Nasser Tleis, *Power Systems Modelling and Faults Analysis*, Newnes Elsevier, 2008

PLN, *Kriteria Desain Enjiniring Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik*, 2010

Prabha Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw – Hill, 1994

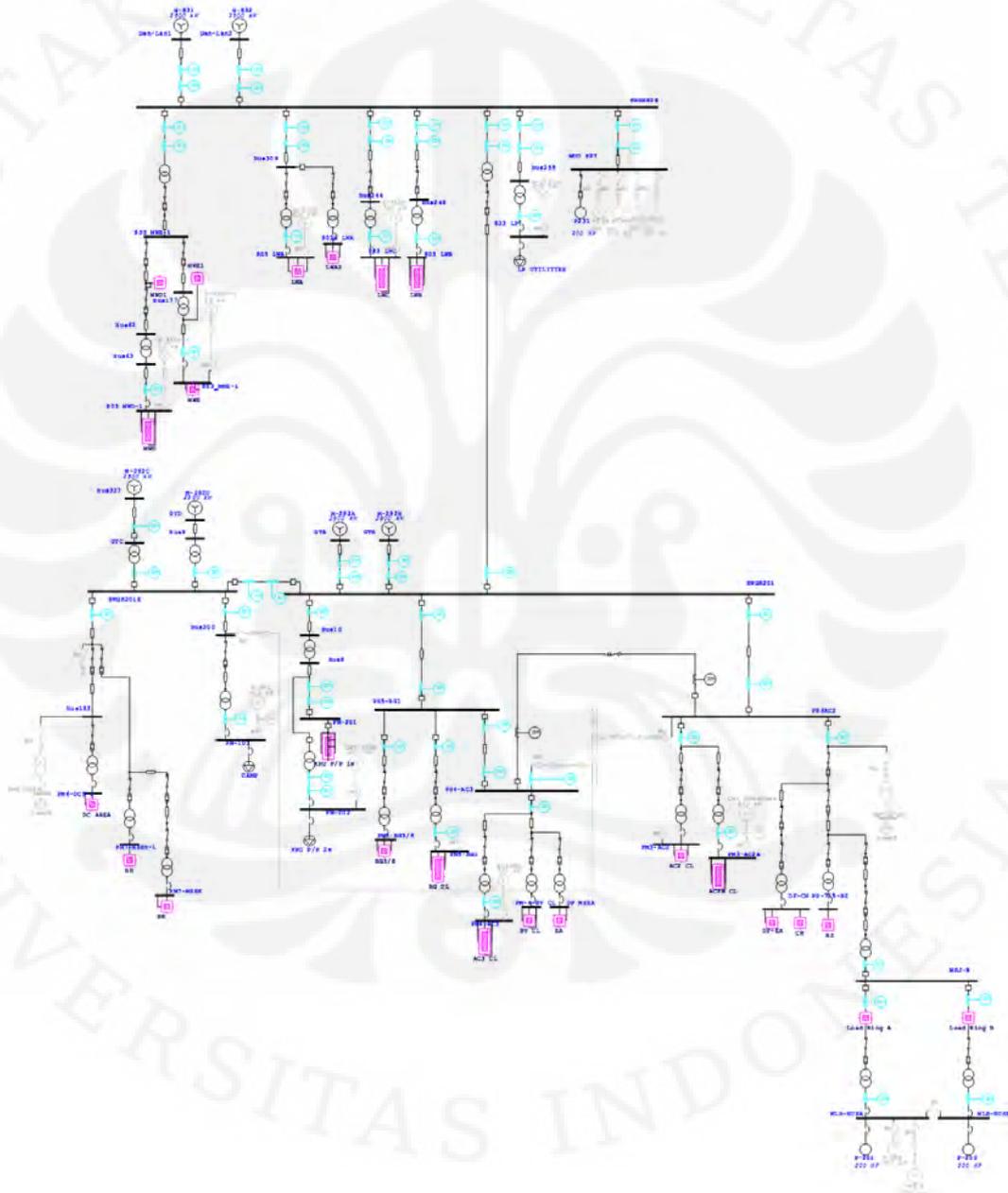
T. Davies, *Protection of Industrial Power Systems*, Pergamon Press, 1984

Turan Gonen, *Electrical Power Distribution System Engineering*, McGraw – Hill, 1986



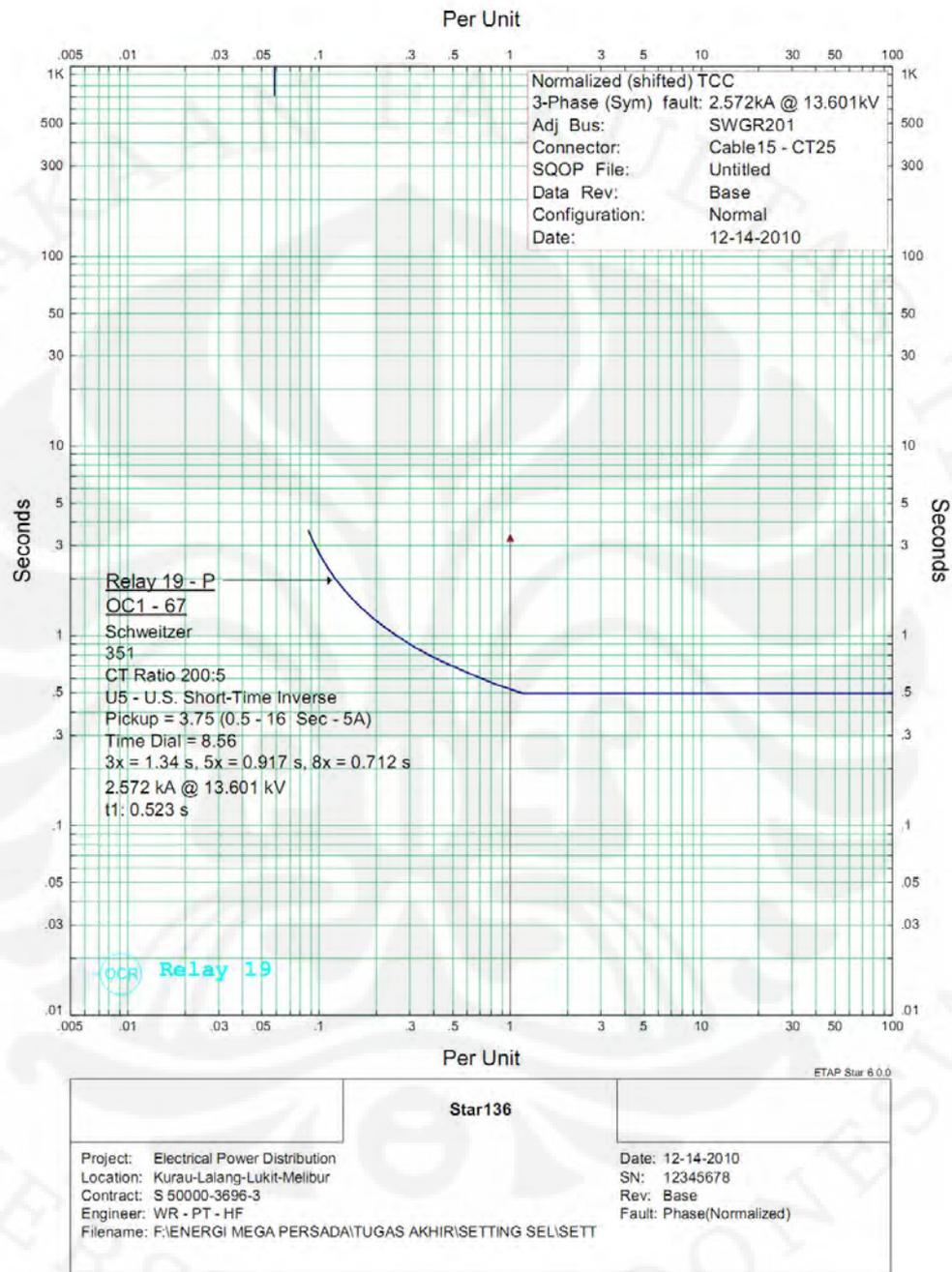
LAMPIRAN 1
DIAGRAM GARIS TUNGGAL SISTEM TENAGA LITRIK DI EMP
MALACCA STRAIT

One-Line Diagram - KPSA Phase 2 (Edit Mode)

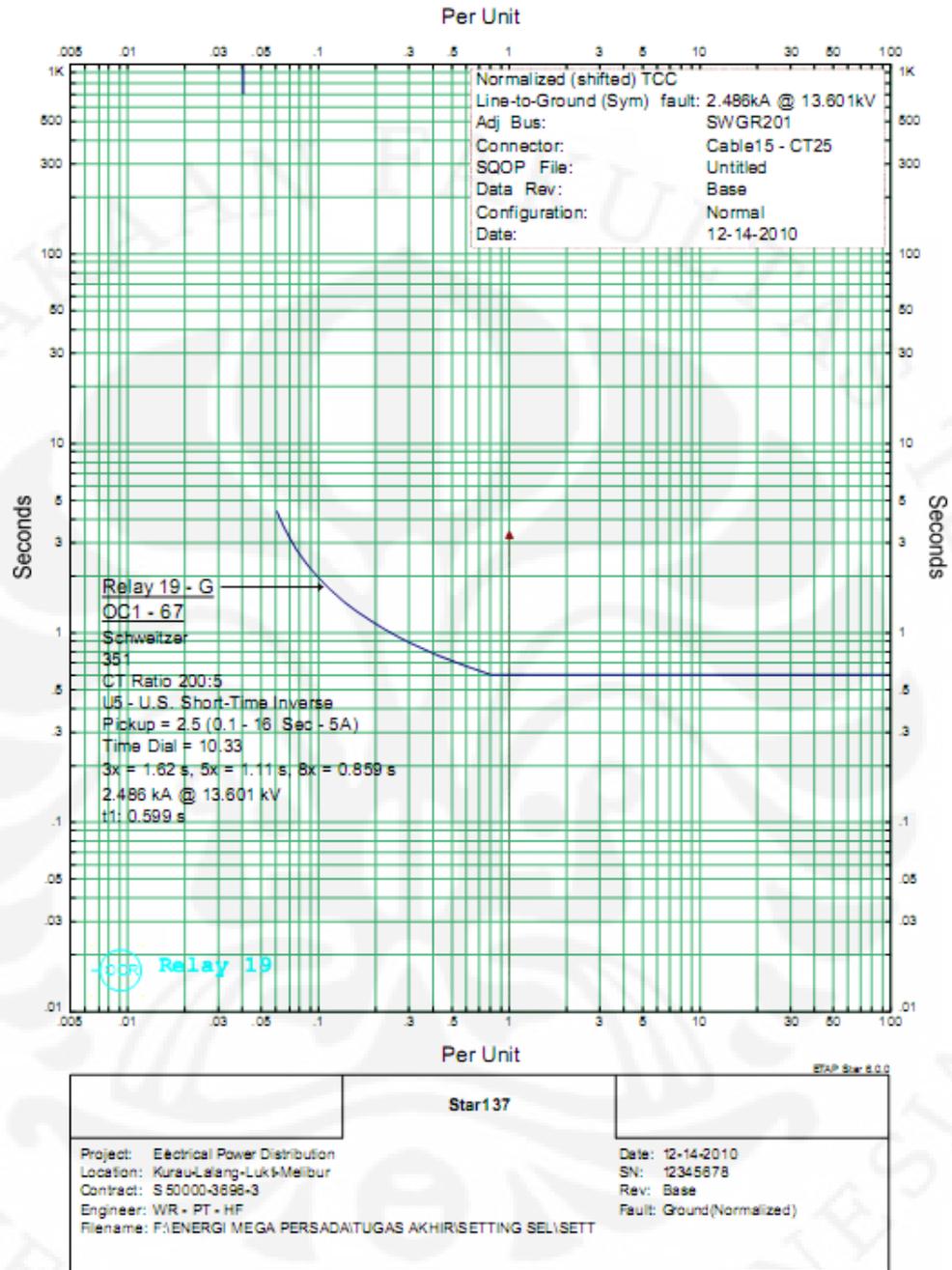


LAMPIRAN 2

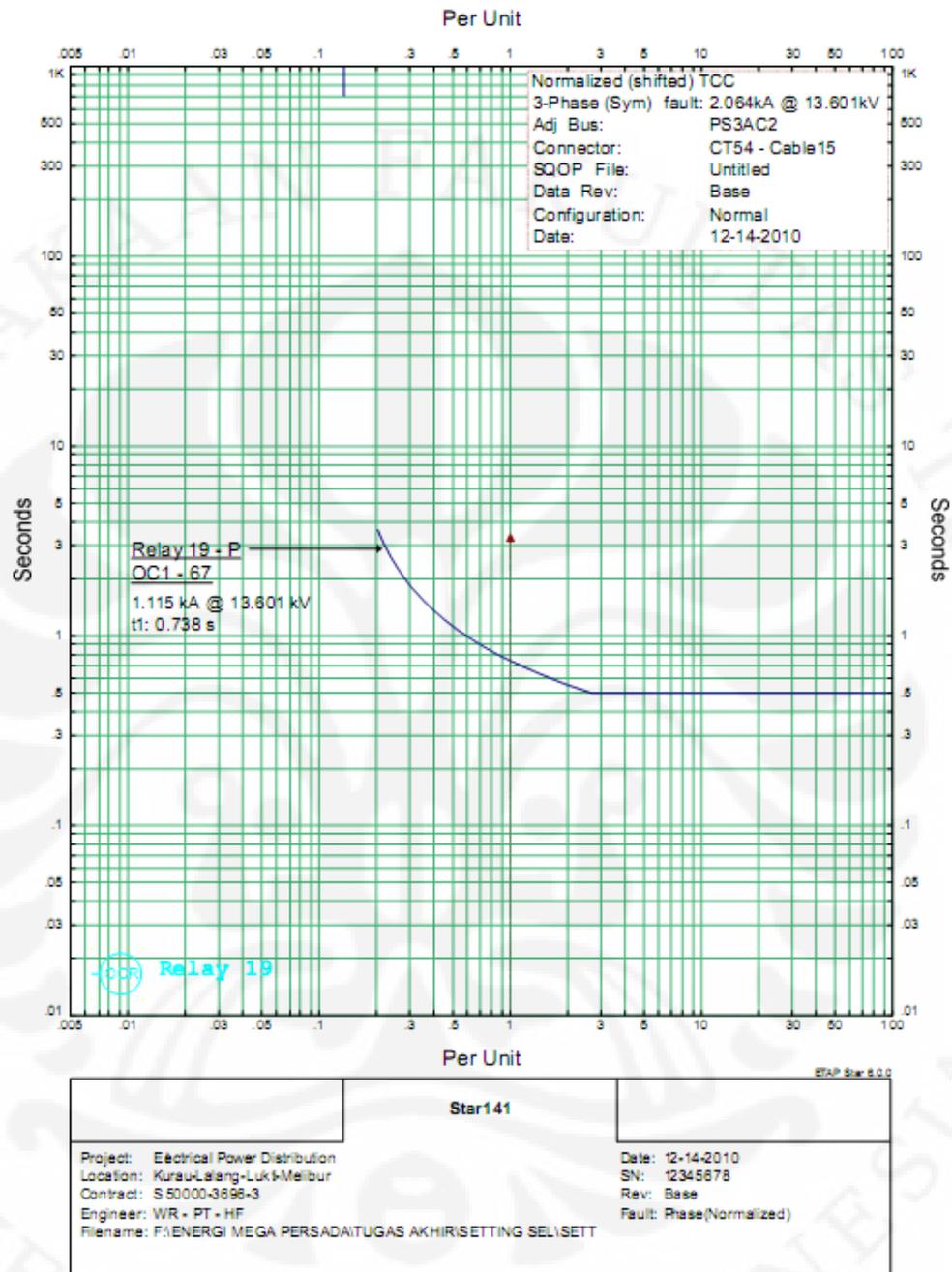
**HASIL SIMULASI KOORDINASI RELE UNTUK RELE FASA DAN
RELE TANAH PADA PERENCANAAN JARINGAN DISTRIBUSI RING
DI EMP MALACCA STRAIT**



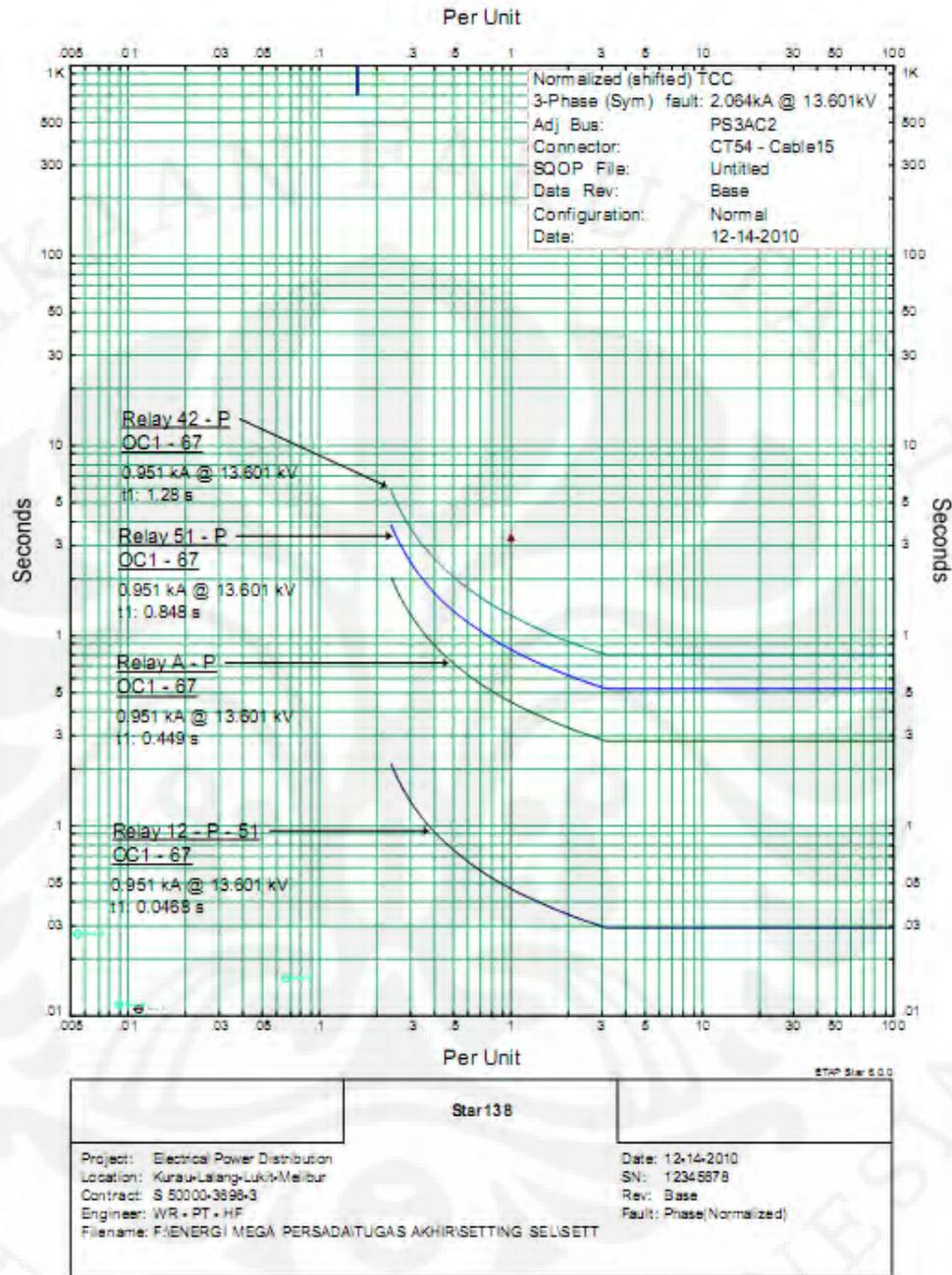
Gambar L.2 Koordinasi rele untuk arus gangguan 3 fasa dekat SWGR201 untuk kasus F_{1a}



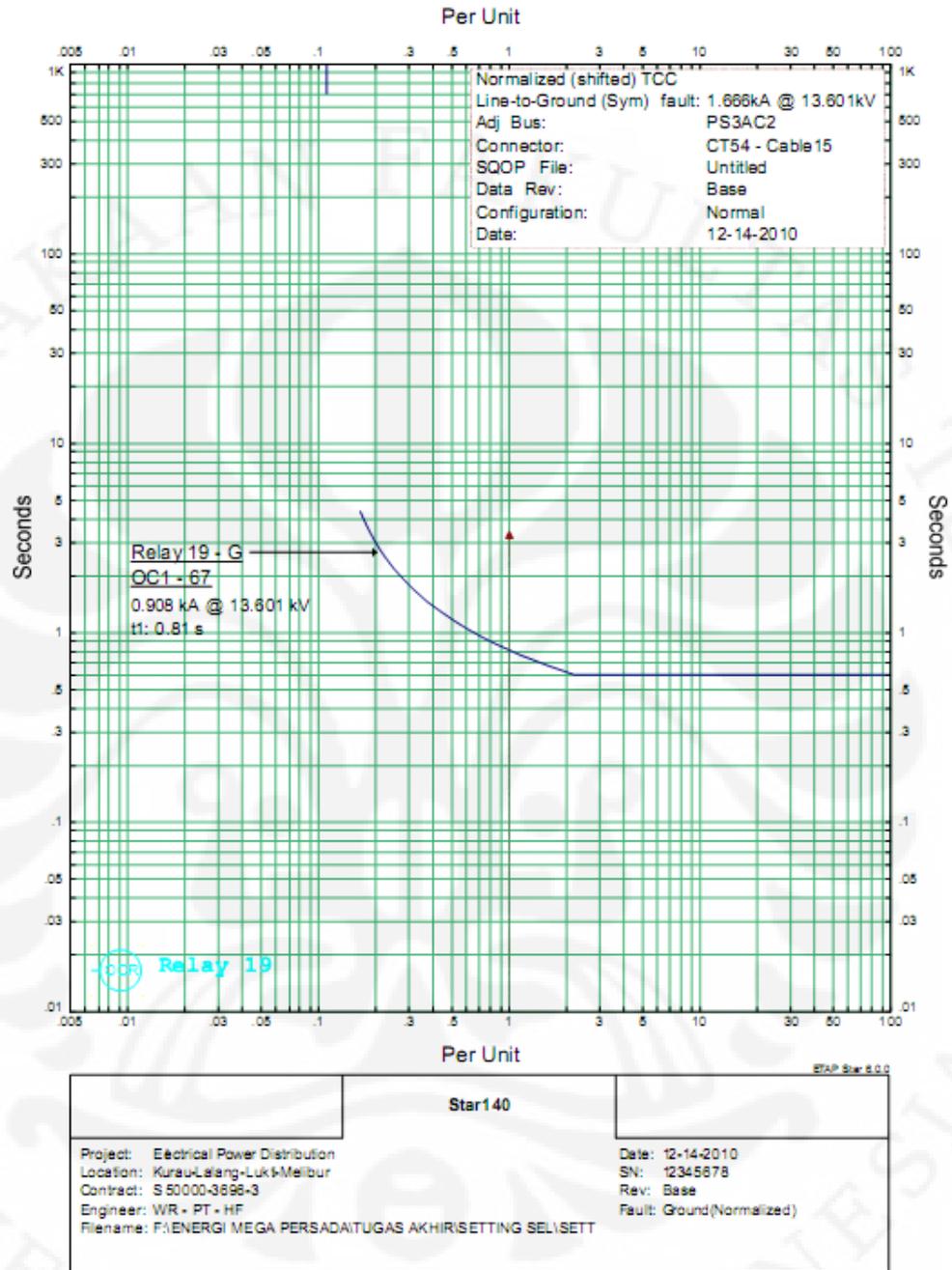
Gambar L.3 Koordinasi rele untuk arus gangguan satu fasa ke tanah dekat SWGR201 untuk kasus F_{1a}



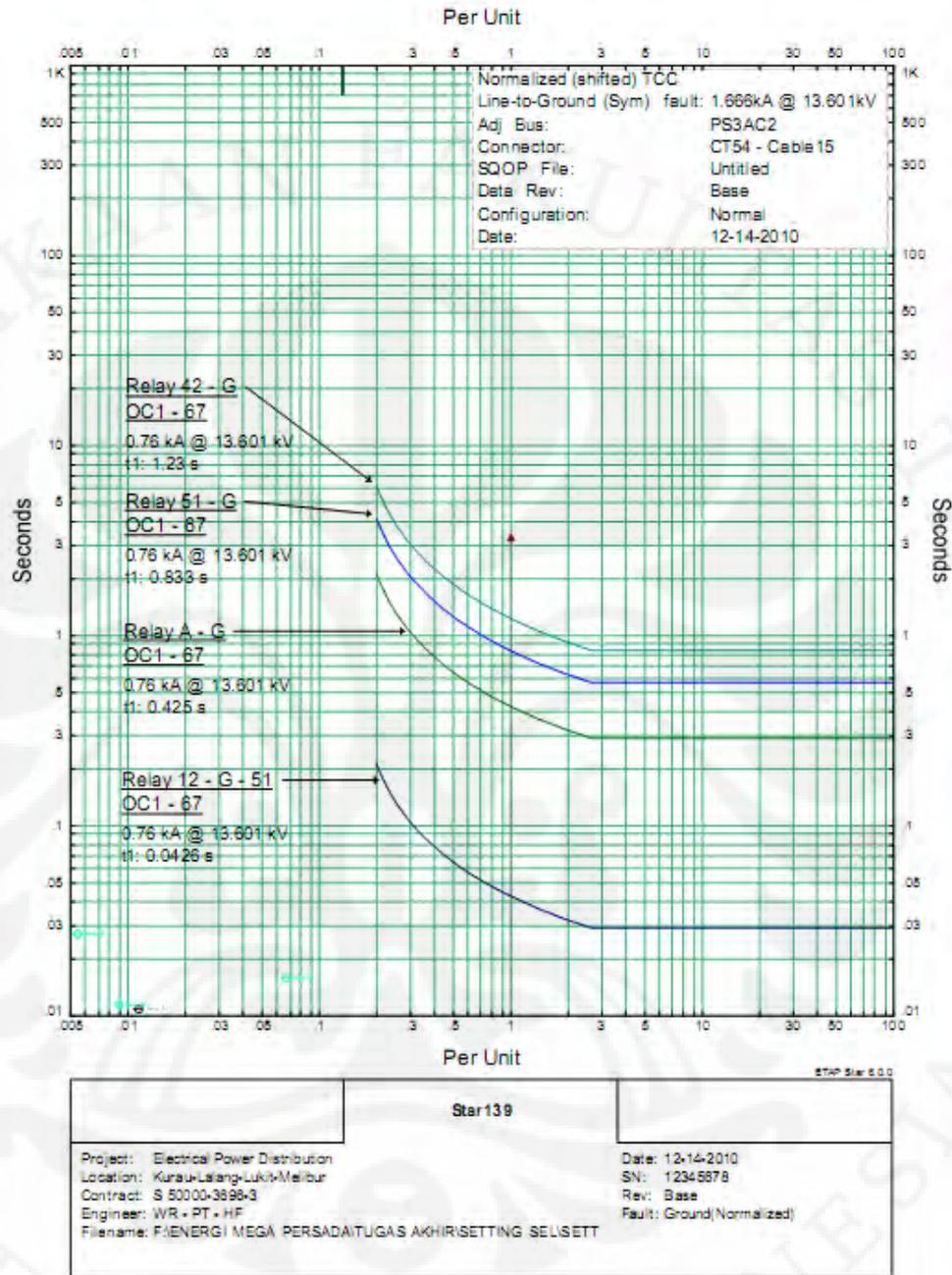
Gambar L.4 Koordinasi rele untuk arus gangguan 3 fasa dekat PS3AC2 searah jarum jam untuk kasus F_{1b}



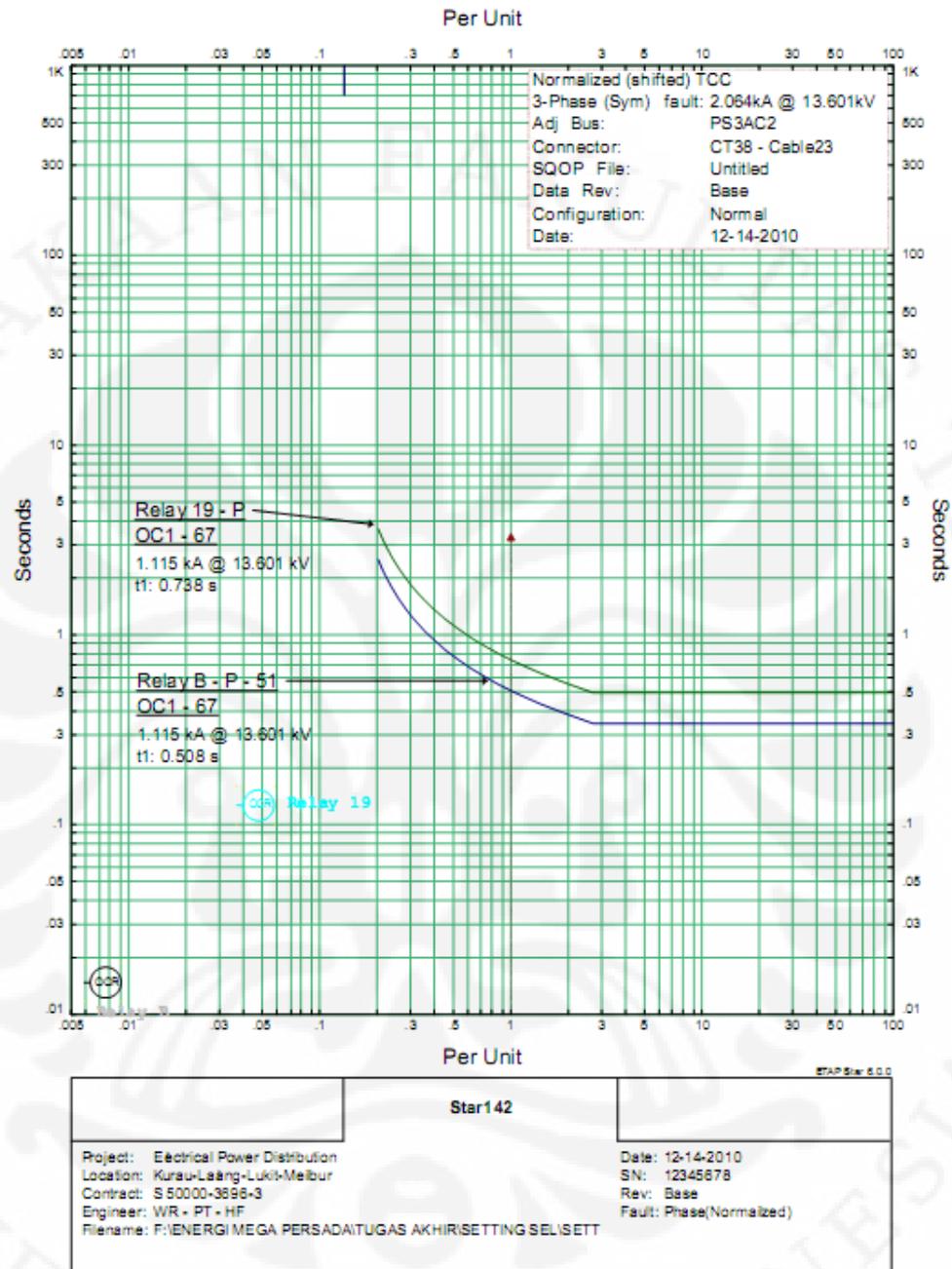
Gambar L.5 Koordinasi rele untuk arus gangguan 3 fasa dekat PS3AC2 berlawanan arah jarum jam untuk kasus F_{1b}



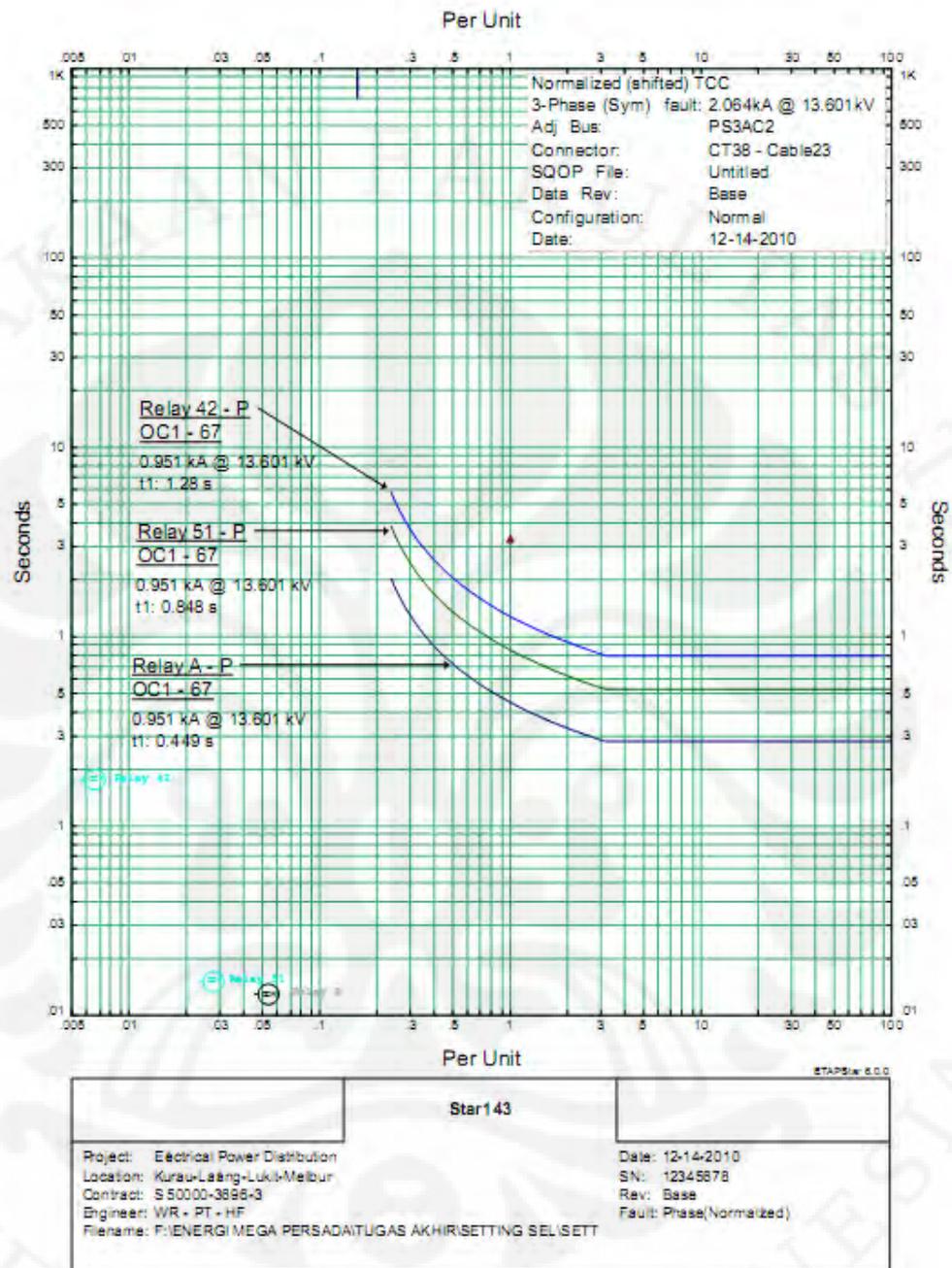
Gambar L.6 Koordinasi rele untuk arus gangguan satu fasa ke tanah dekat PS3AC2 searah jarum jam untuk kasus F_{1b}



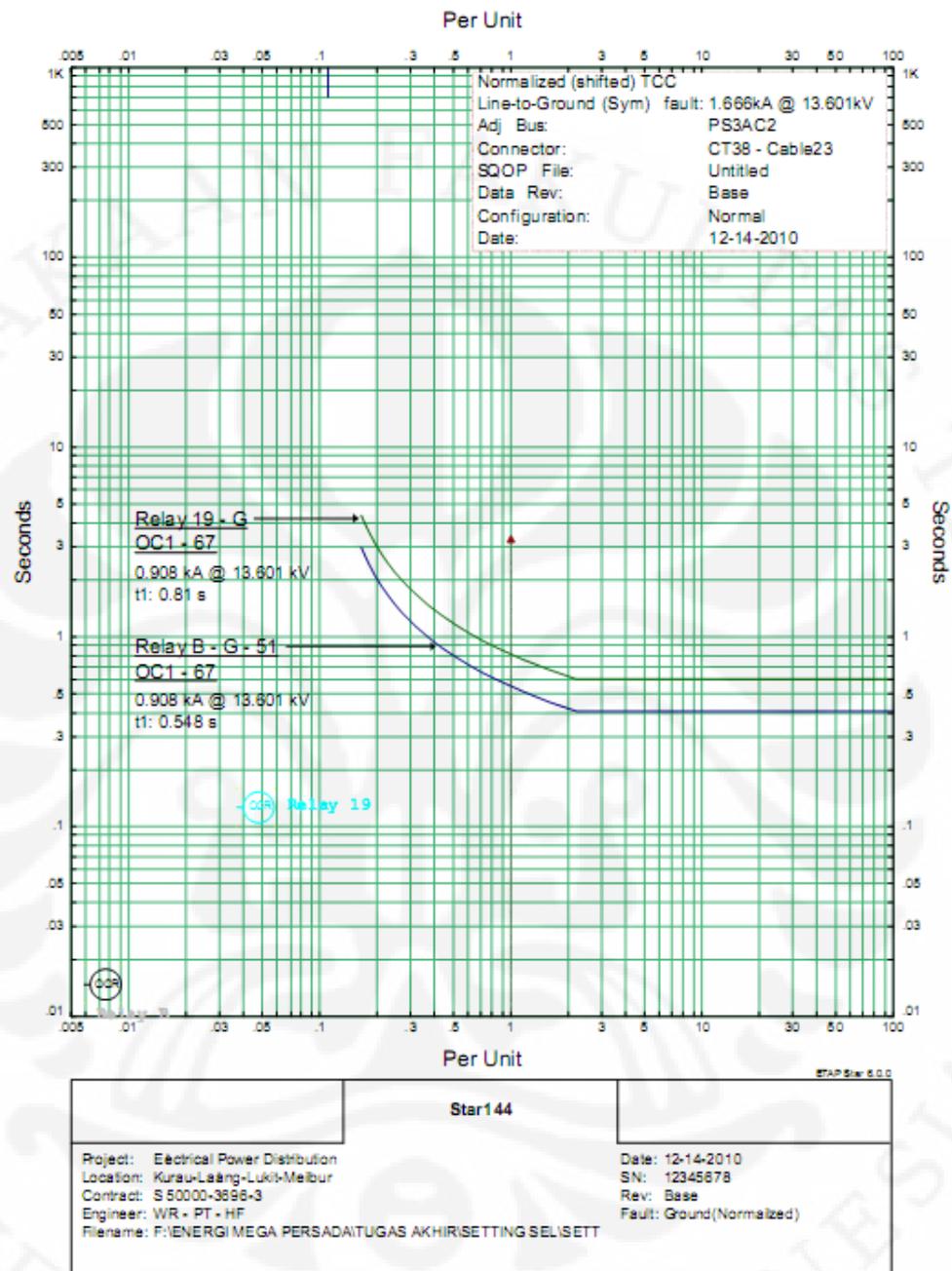
Gambar L.7 Koordinasi rele untuk arus gangguan satu fasa ke tanah dekat PS3AC2 berlawanan arah jarum jam untuk kasus F_{1b}



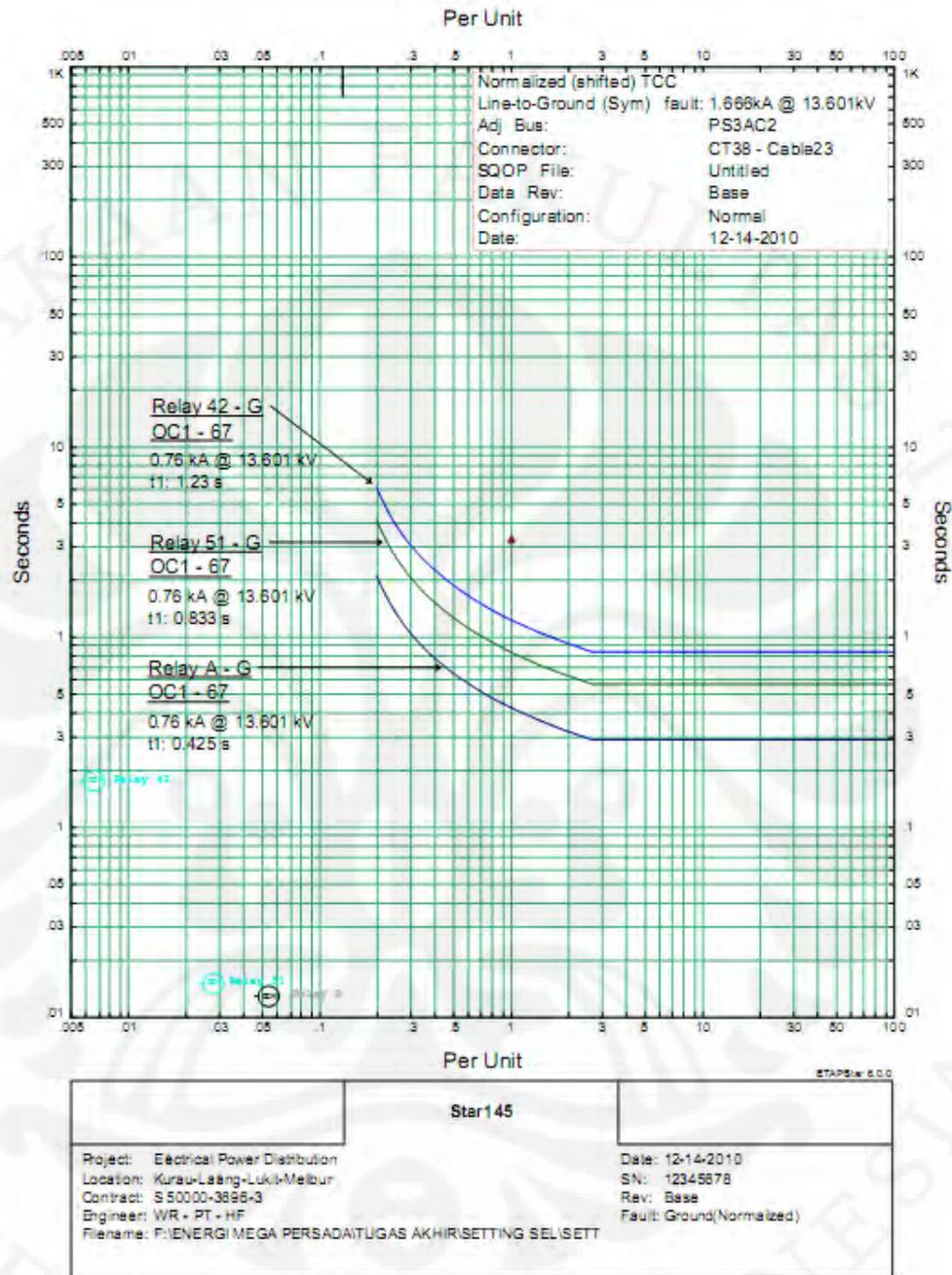
Gambar L.8 Koordinasi rele untuk arus gangguan 3 fasa dekat PS3AC2 searah jarum jam untuk kasus F_{2a}



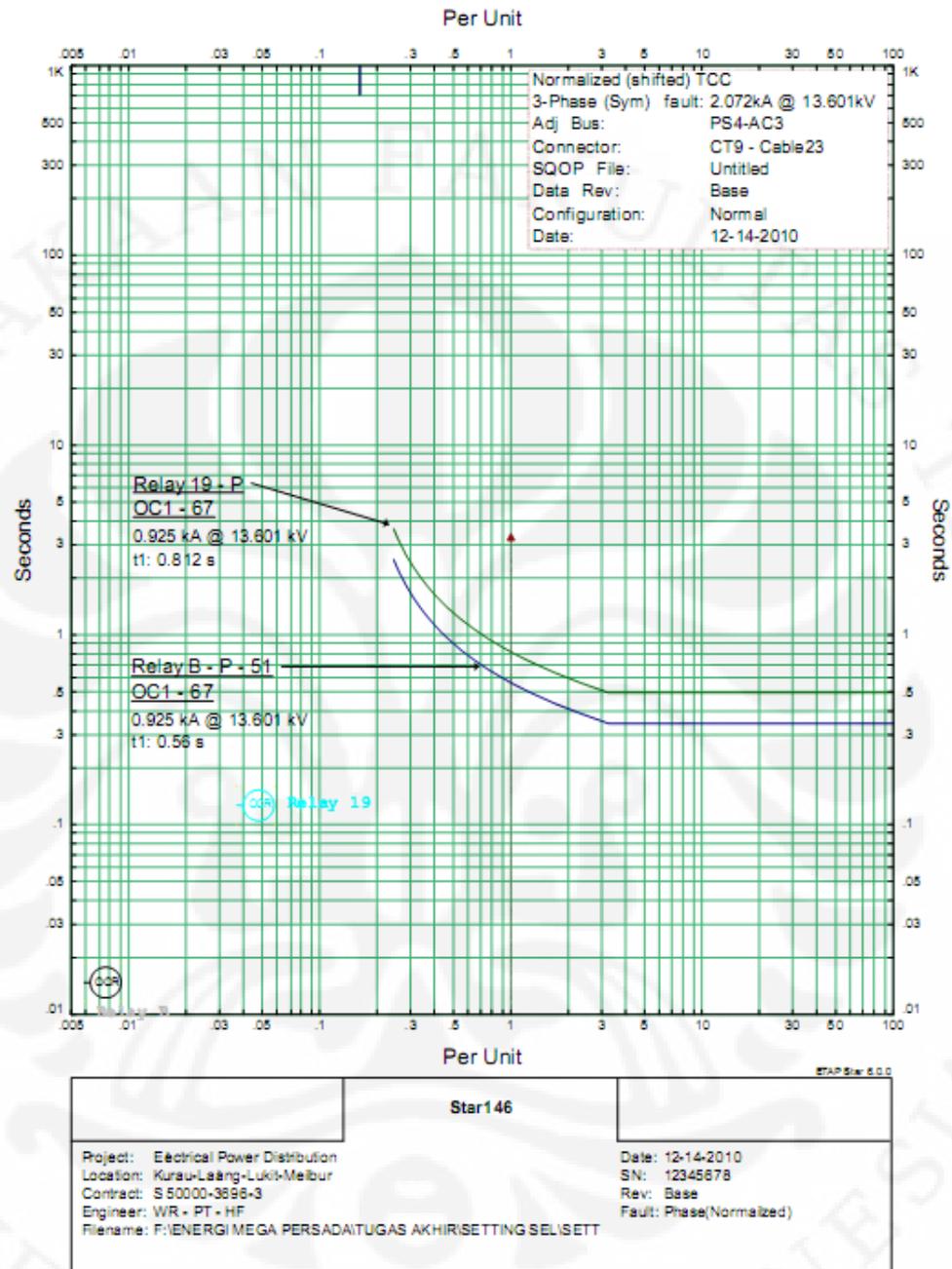
Gambar L.9 Koordinasi rele untuk arus gangguan 3 fasa dekat PS3AC2 berlawanan arah jarum jam untuk kasus F_{2a}



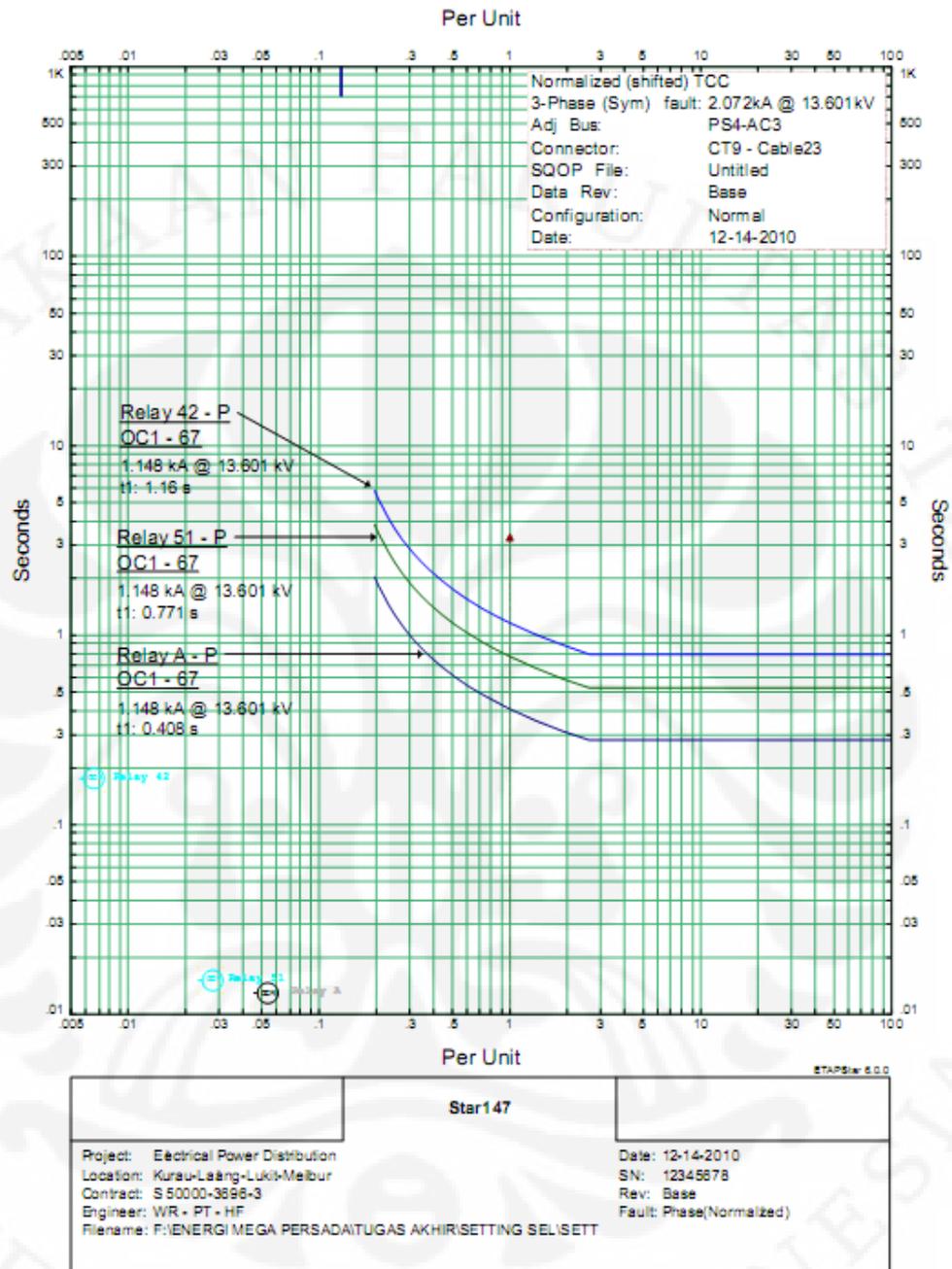
Gambar L.10 Koordinasi rele untuk arus gangguan satu fasa ke tanah dekat PS3AC2 searah jarum jam untuk kasus F_{2a}



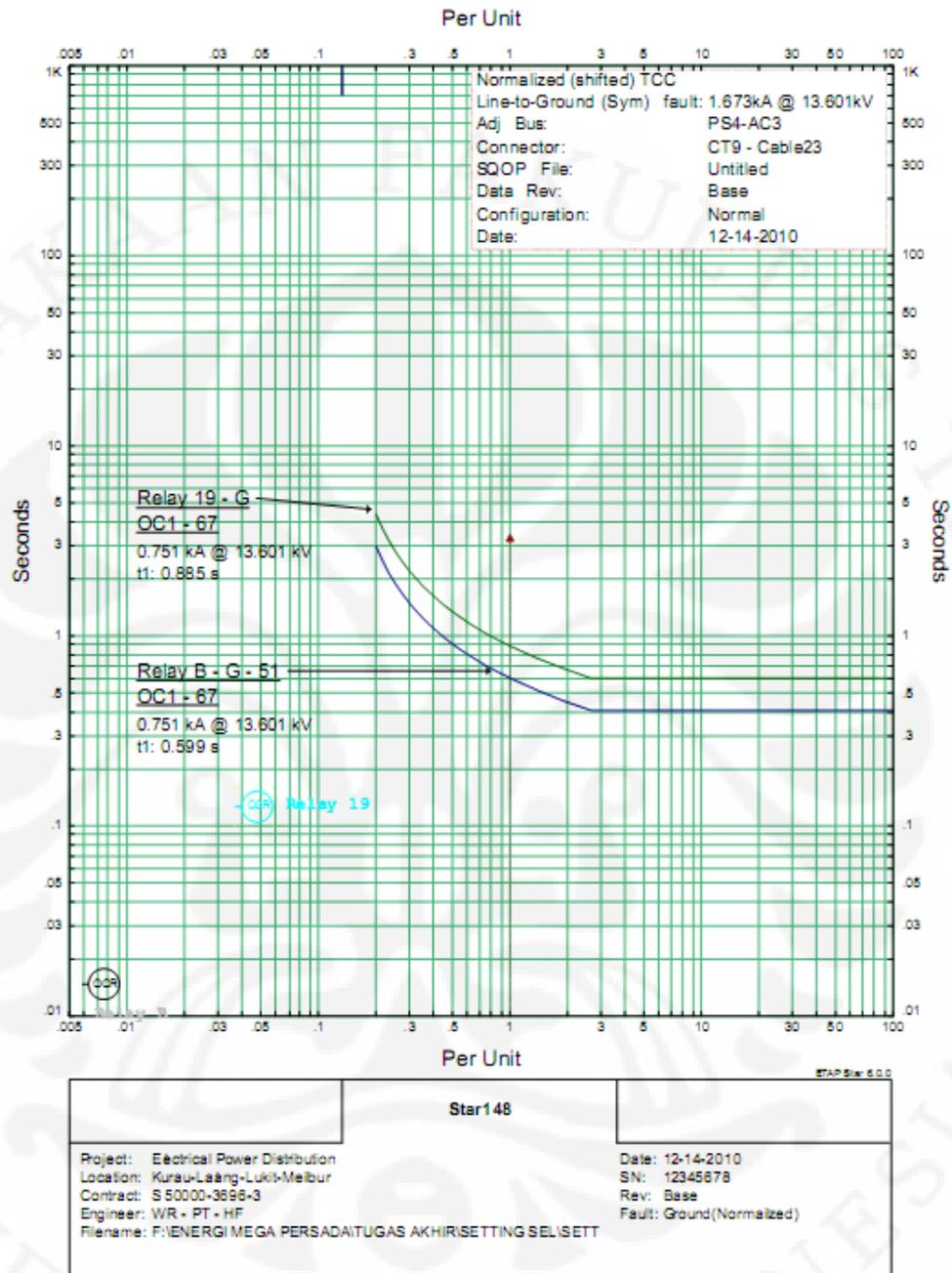
Gambar L.11 Koordinasi rele untuk arus gangguan satu fasa ke tanah dekat PS3AC2 berlawanan arah jarum jam untuk kasus F_{2a}



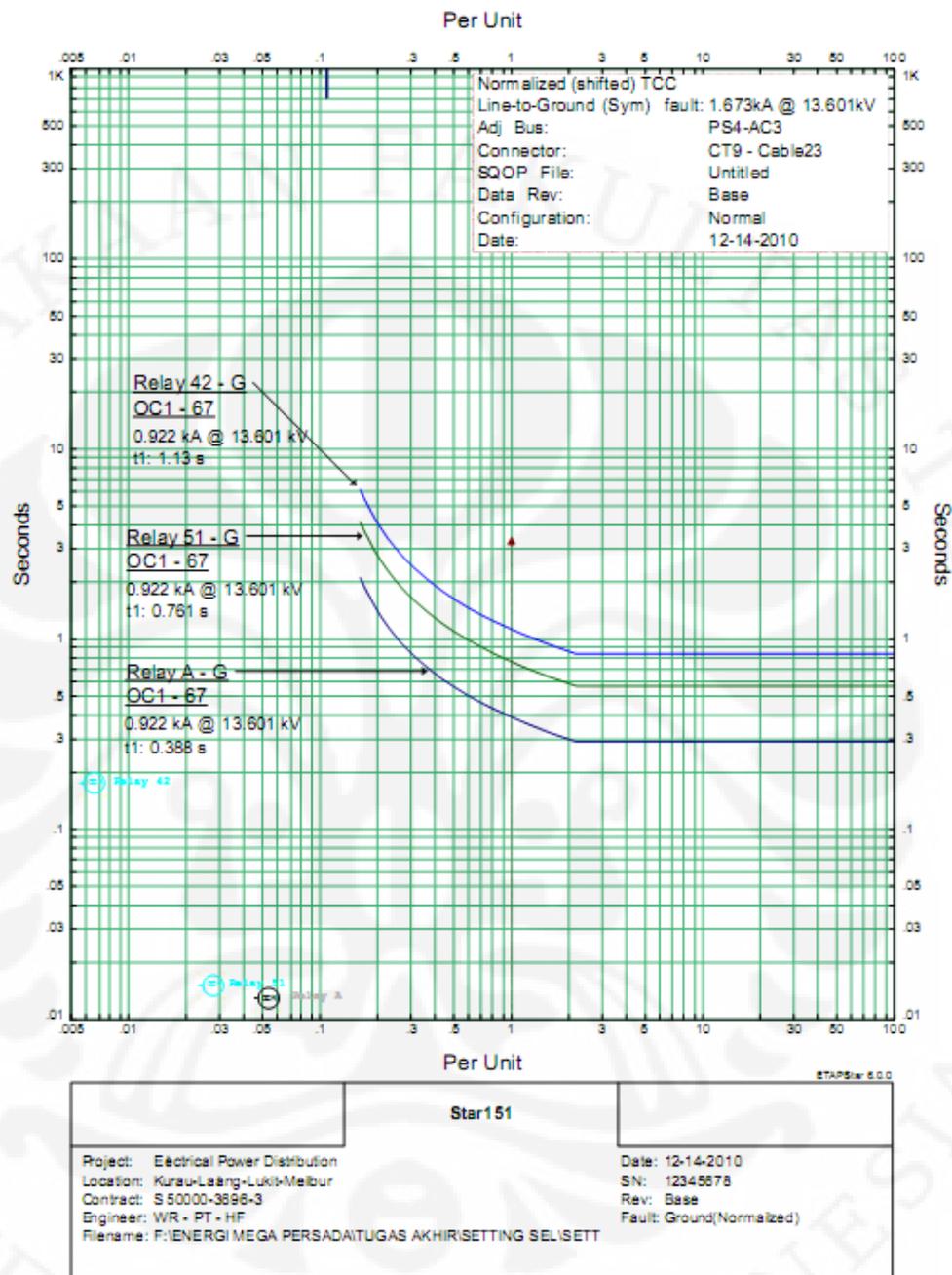
Gambar L.12 Koordinasi rele untuk arus gangguan 3 fasa dekat PS4AC3 searah jarum jam untuk kasus F_{2b}



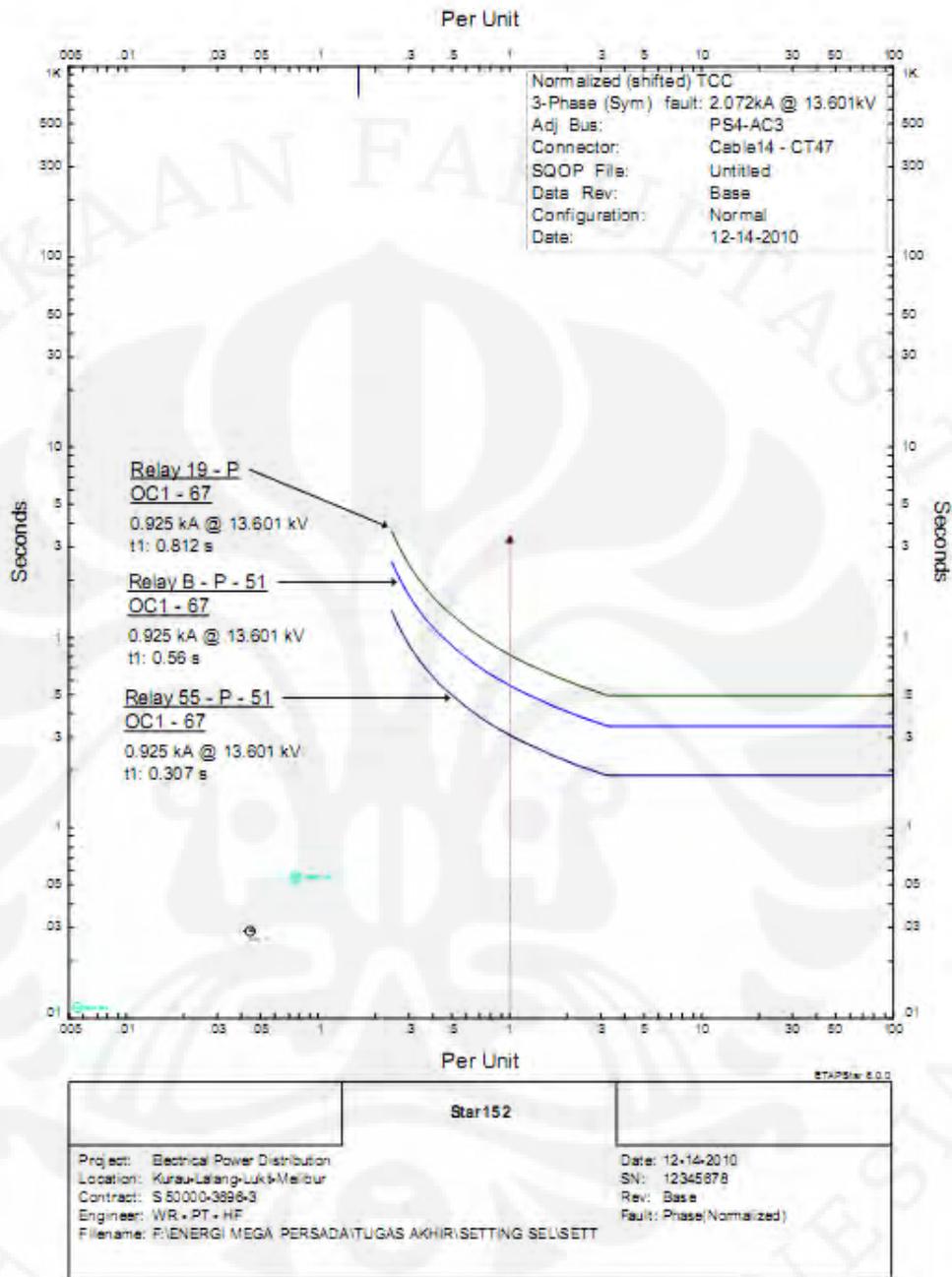
Gambar L.13 Koordinasi rele untuk arus gangguan 3 fasa dekat PS4AC3 berlawanan arah jarum jam untuk kasus F_{2b}



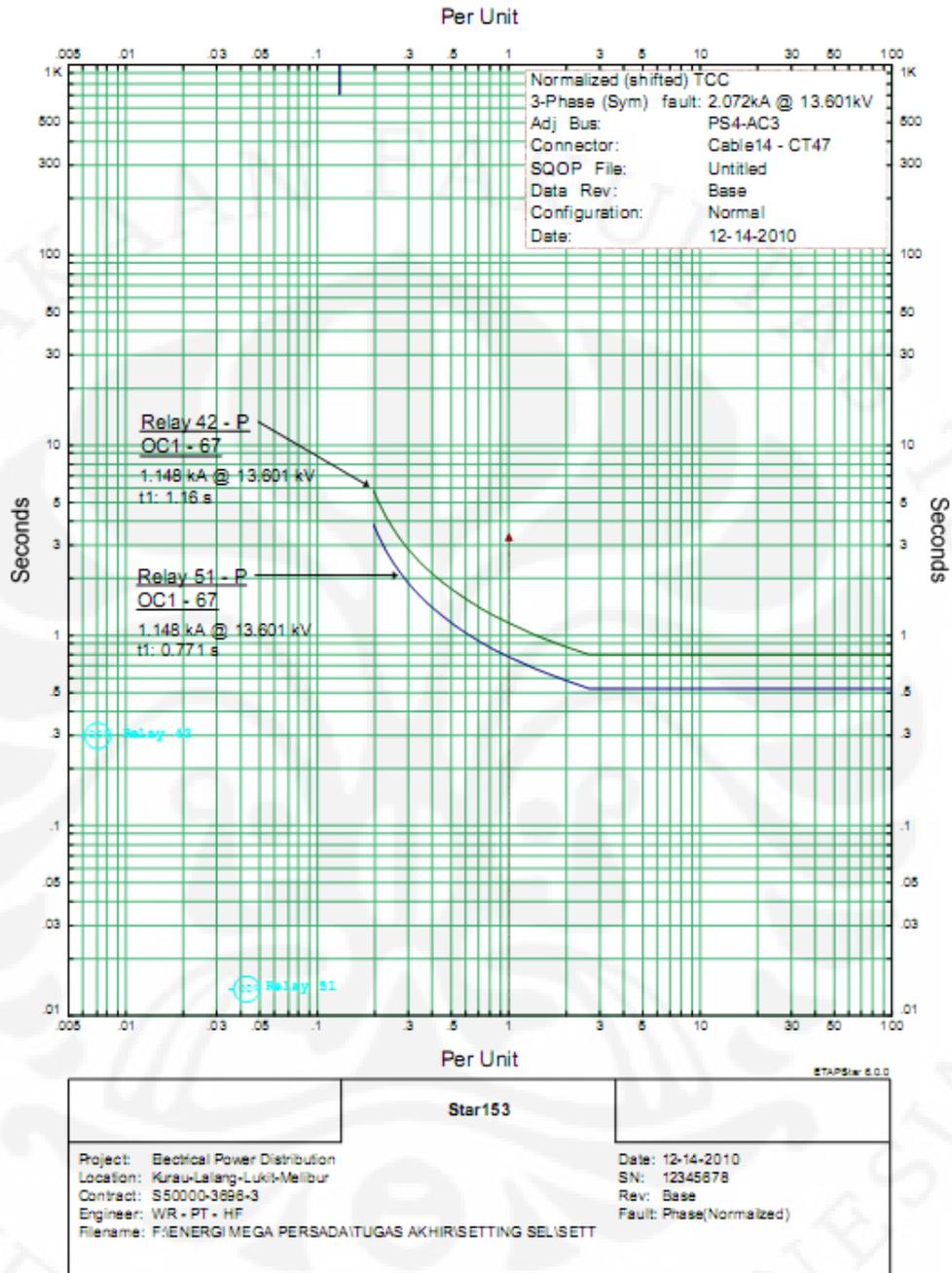
Gambar L.14 Koordinasi rele untuk arus gangguan satu fasa ke tanah dekat PS4AC3 searah jarum jam untuk kasus F_{2b}



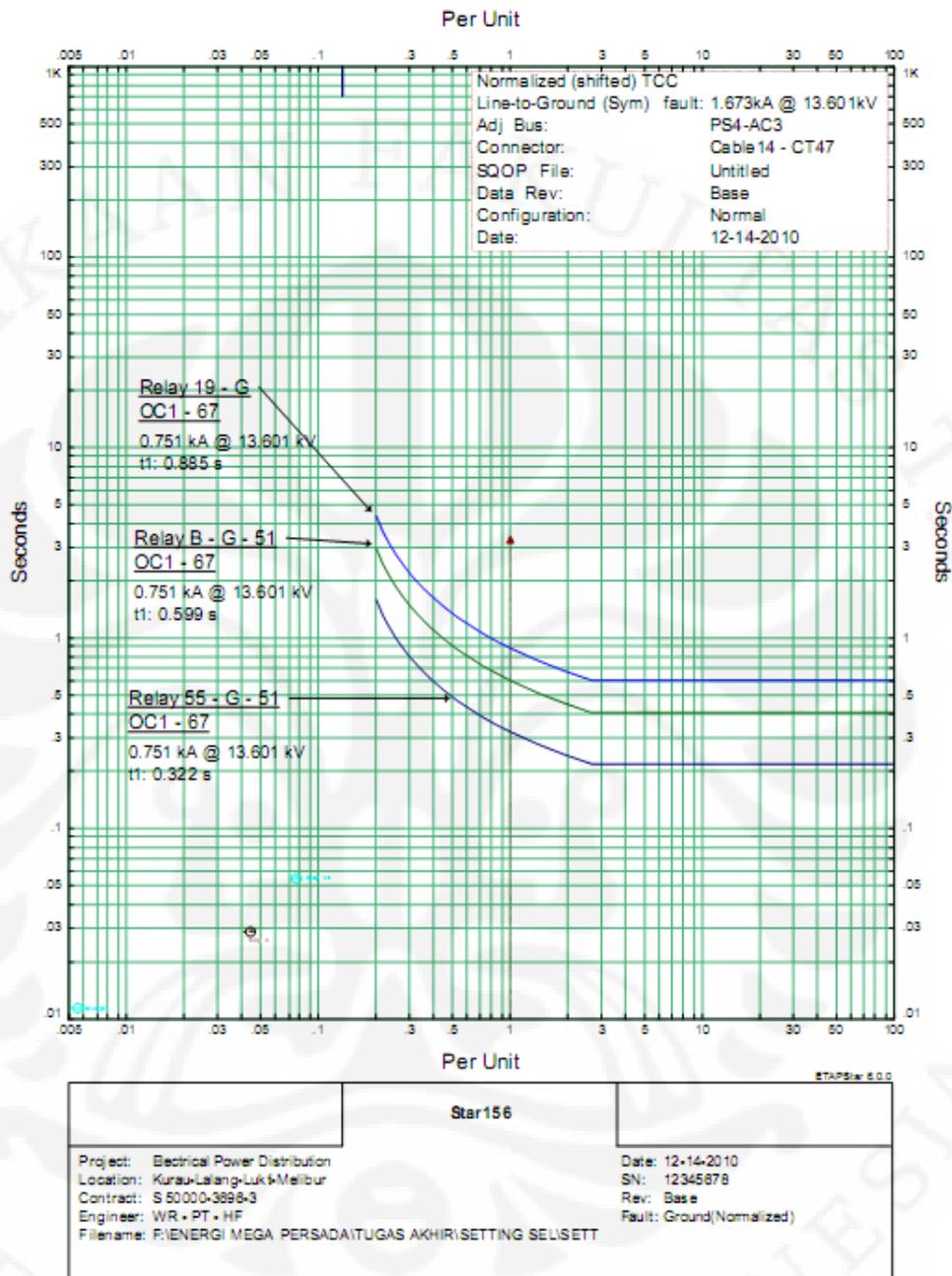
Gambar L.15 Koordinasi rele untuk arus gangguan satu fasa ke tanah dekat PS4AC3 berlawanan arah jarum jam untuk kasus F_{2b}



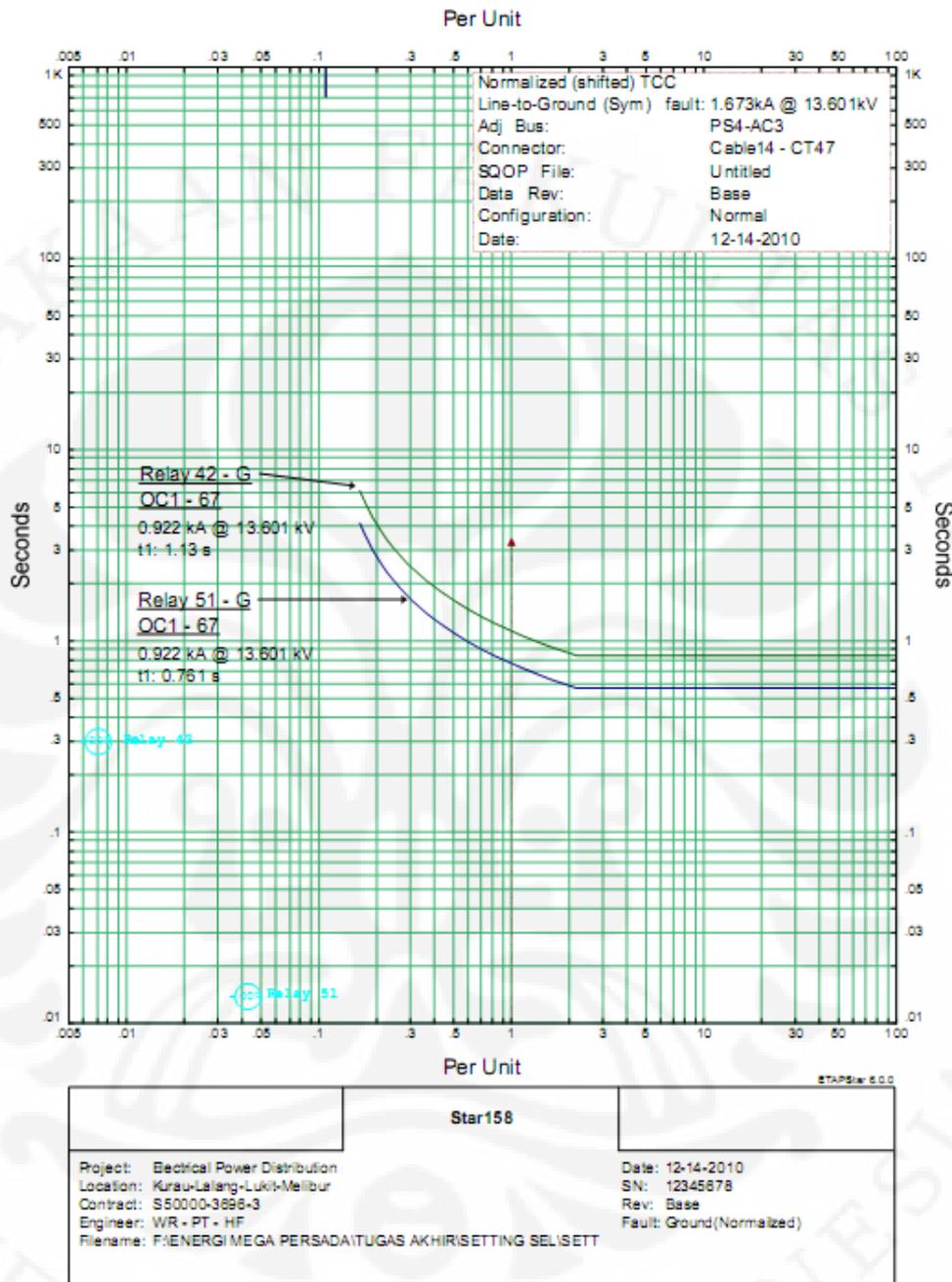
Gambar L.16 Koordinasi rele untuk arus gangguan 3 fasa dekat PS4AC3 searah jarum jam untuk kasus F_{3a}



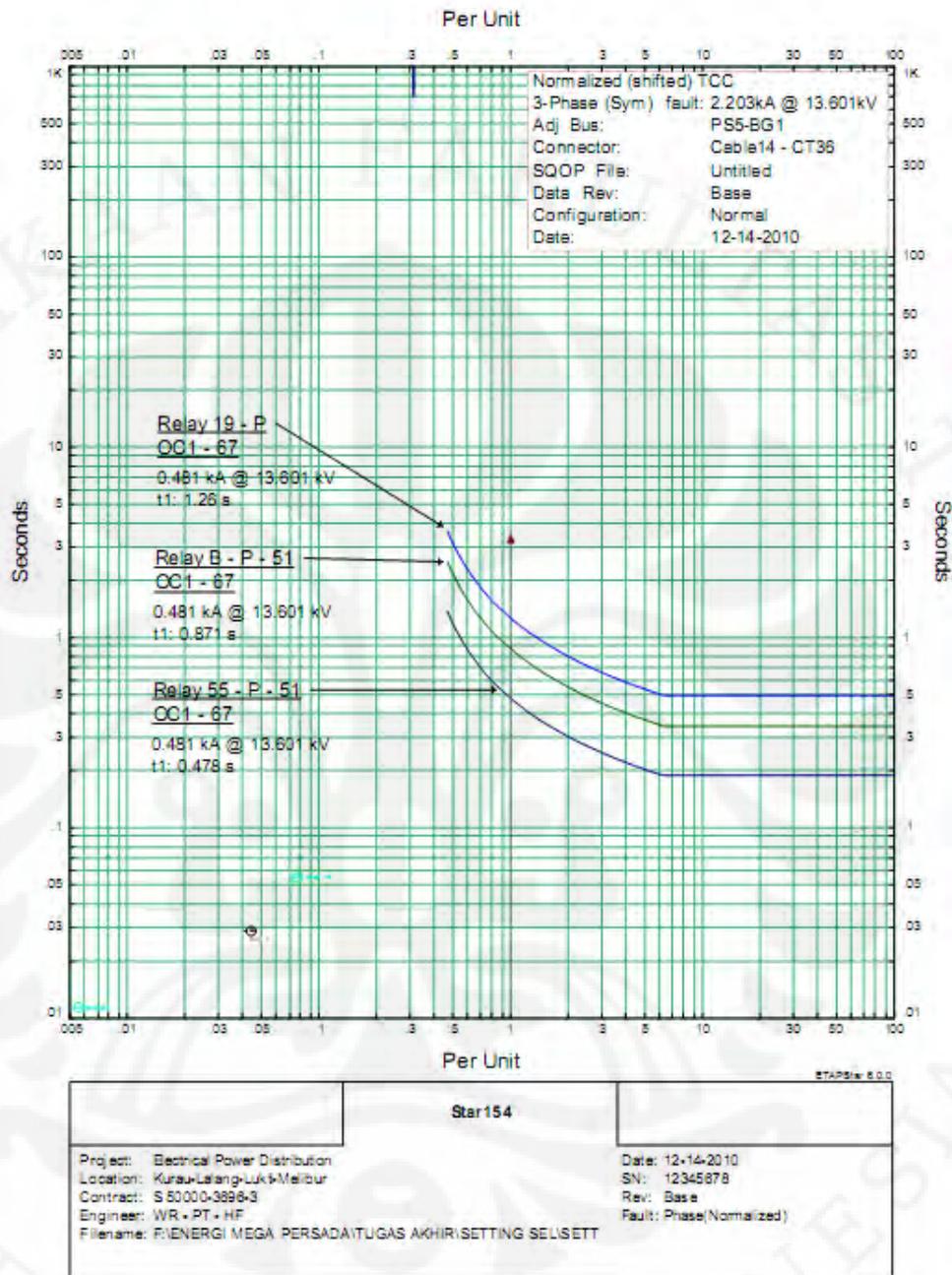
Gambar L.17 Koordinasi rele untuk arus gangguan 3 fasa dekat PS4AC3 berlawanan arah jarum jam untuk kasus F_{3a}



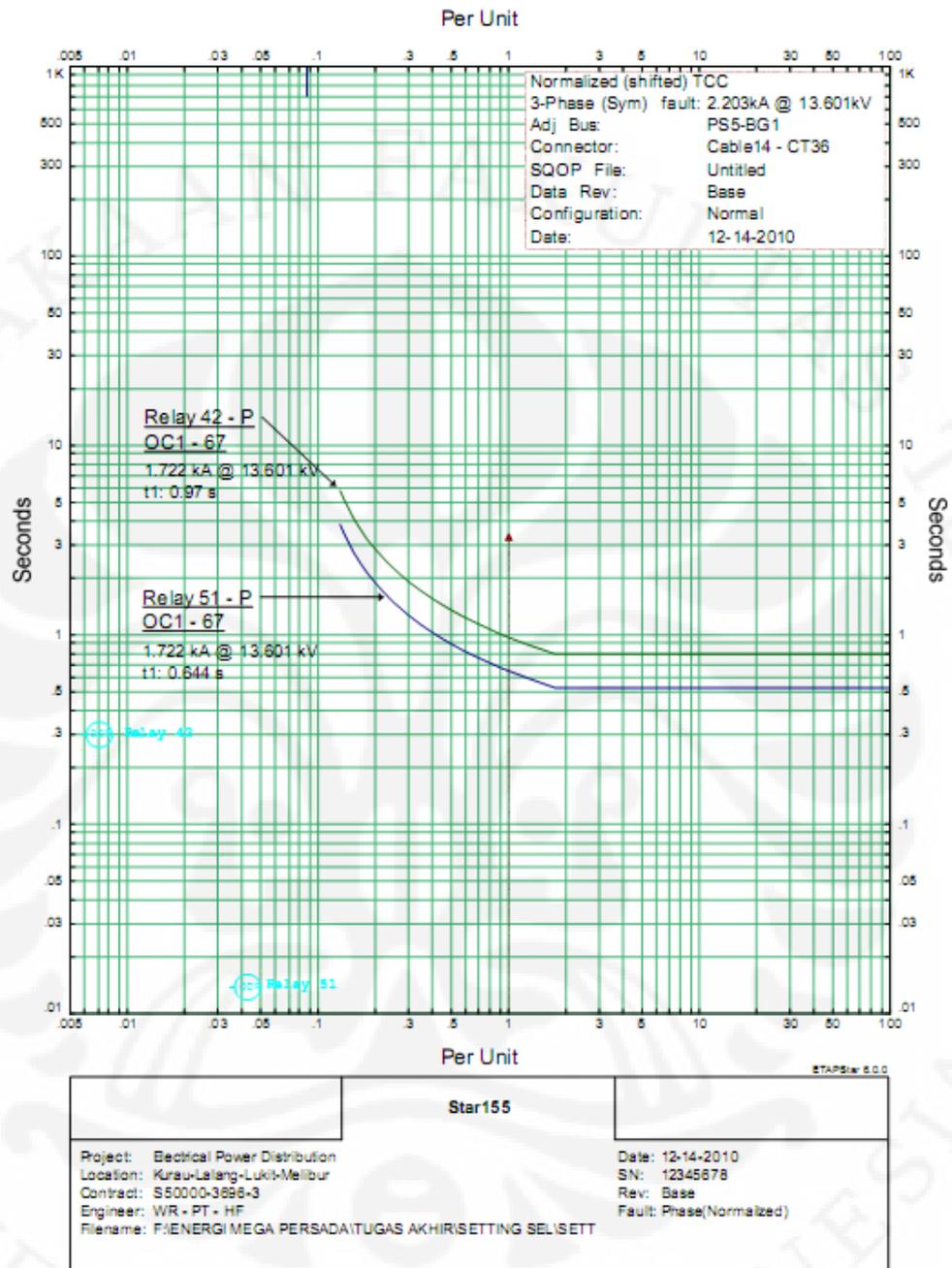
Gambar L.18 Koordinasi rele untuk arus gangguan satu fasa ke tanah dekat PS4AC3 searah jarum jam untuk kasus F_{3a}



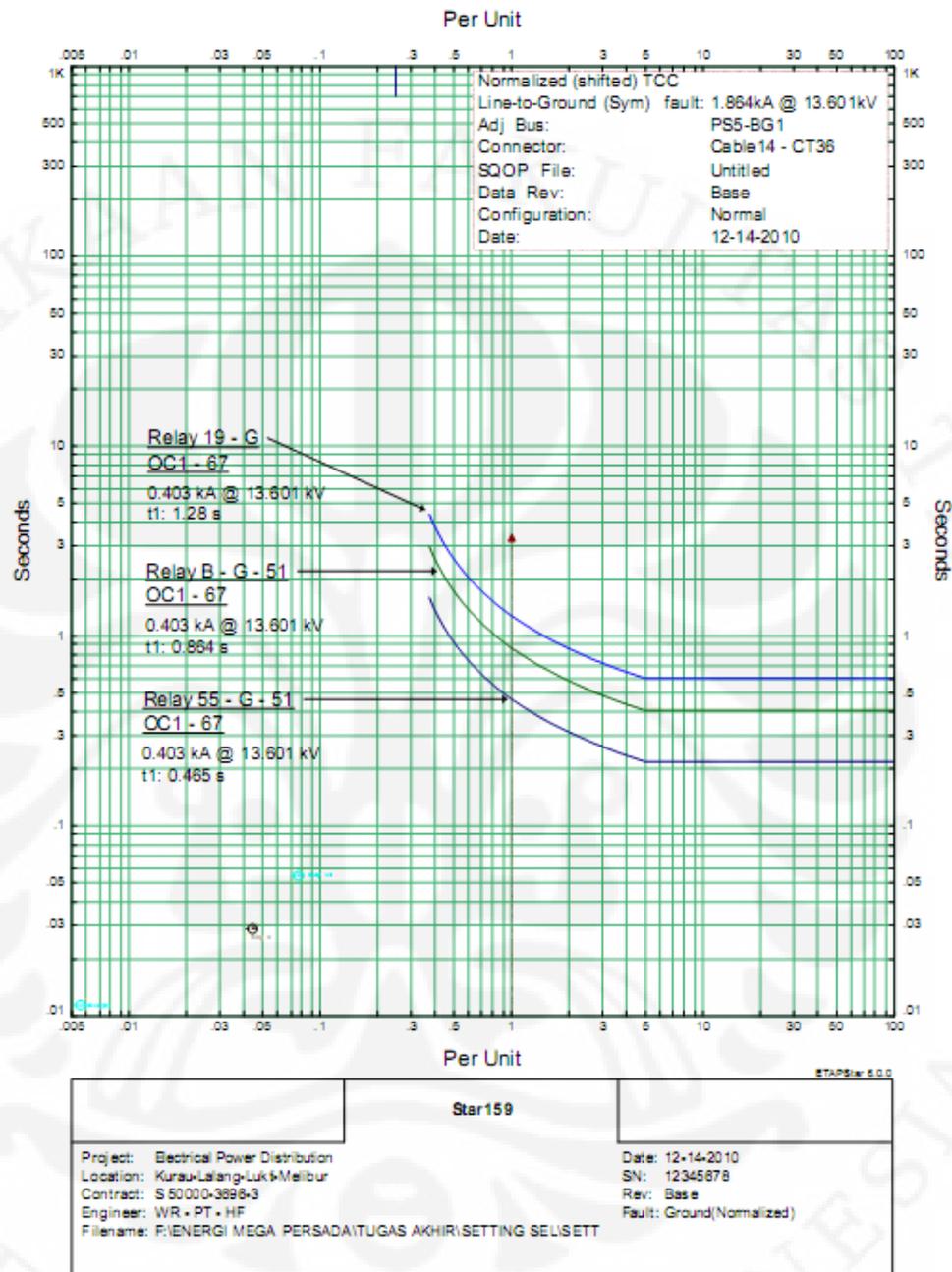
Gambar L.19 Koordinasi rele untuk arus gangguan satu fasa ke tanah dekat PS4AC3 berlawanan arah jarum jam untuk kasus F_{3a}



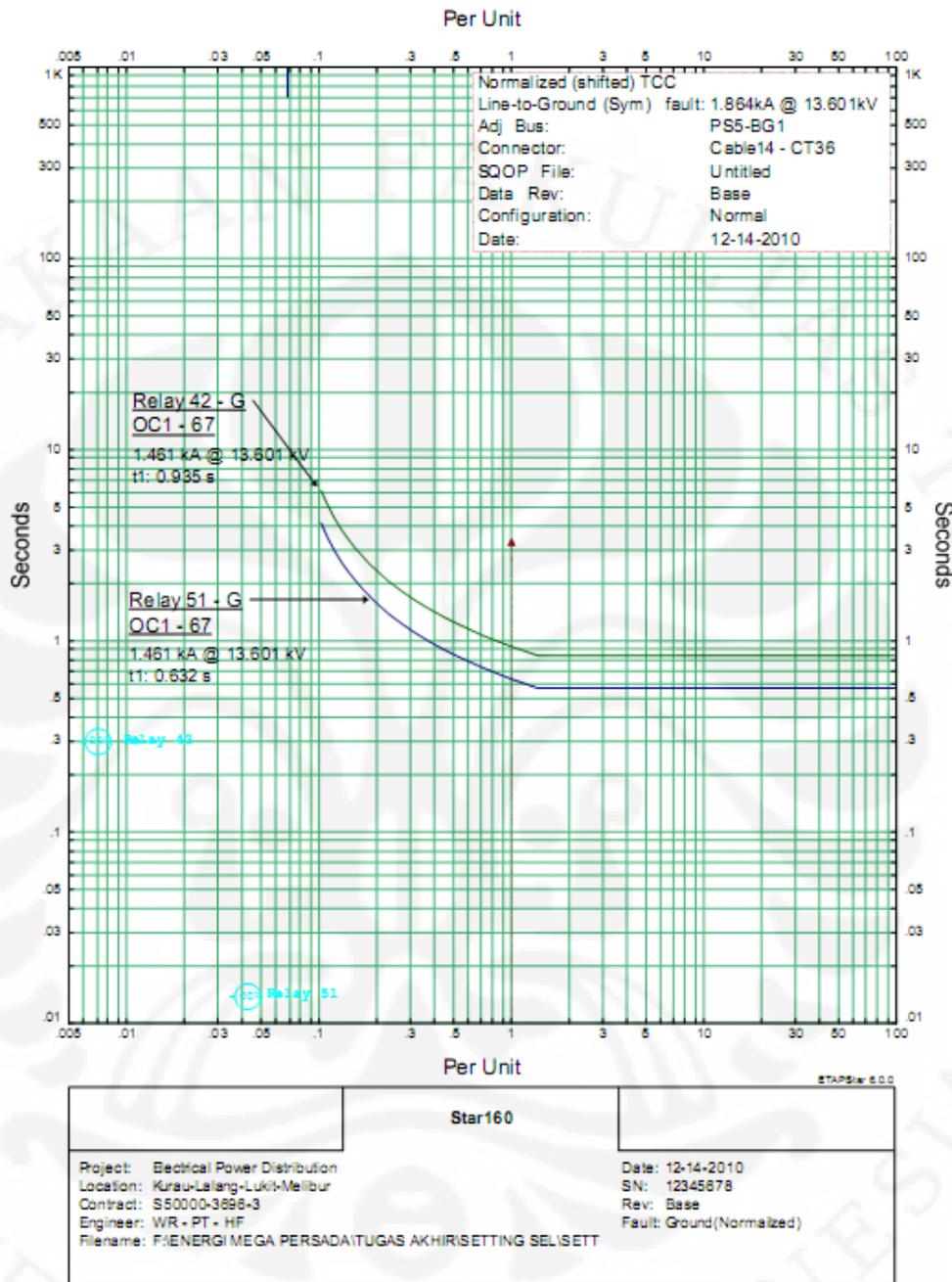
Gambar L.20 Koordinasi rele untuk arus gangguan 3 fasa dekat PS5BG1 searah jarum jam untuk kasus F_{3b}



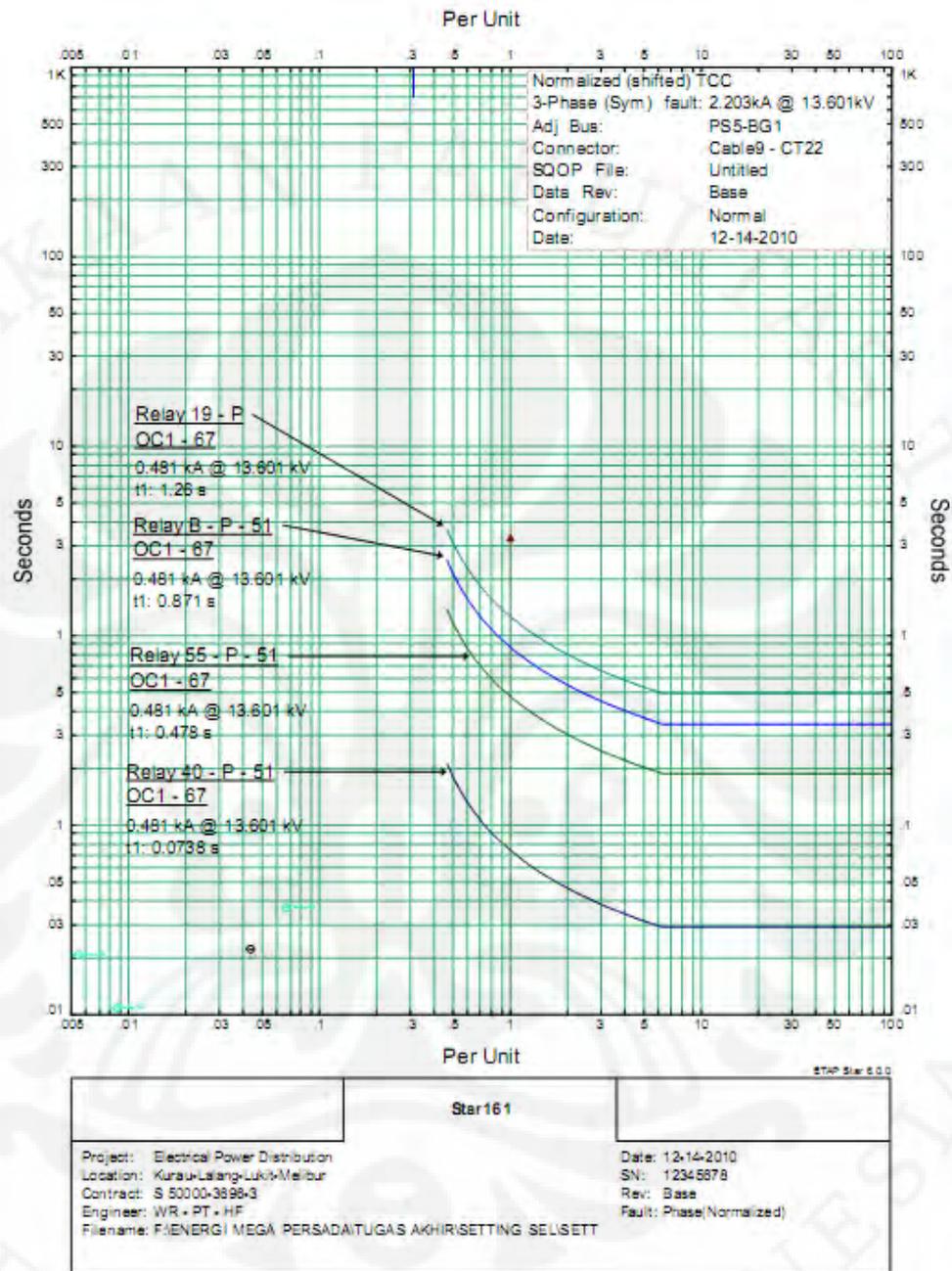
Gambar L.21 Koordinasi rele untuk arus gangguan 3 fasa dekat PS5BG1 berlawanan arah jarum jam untuk kasus F_{3b}



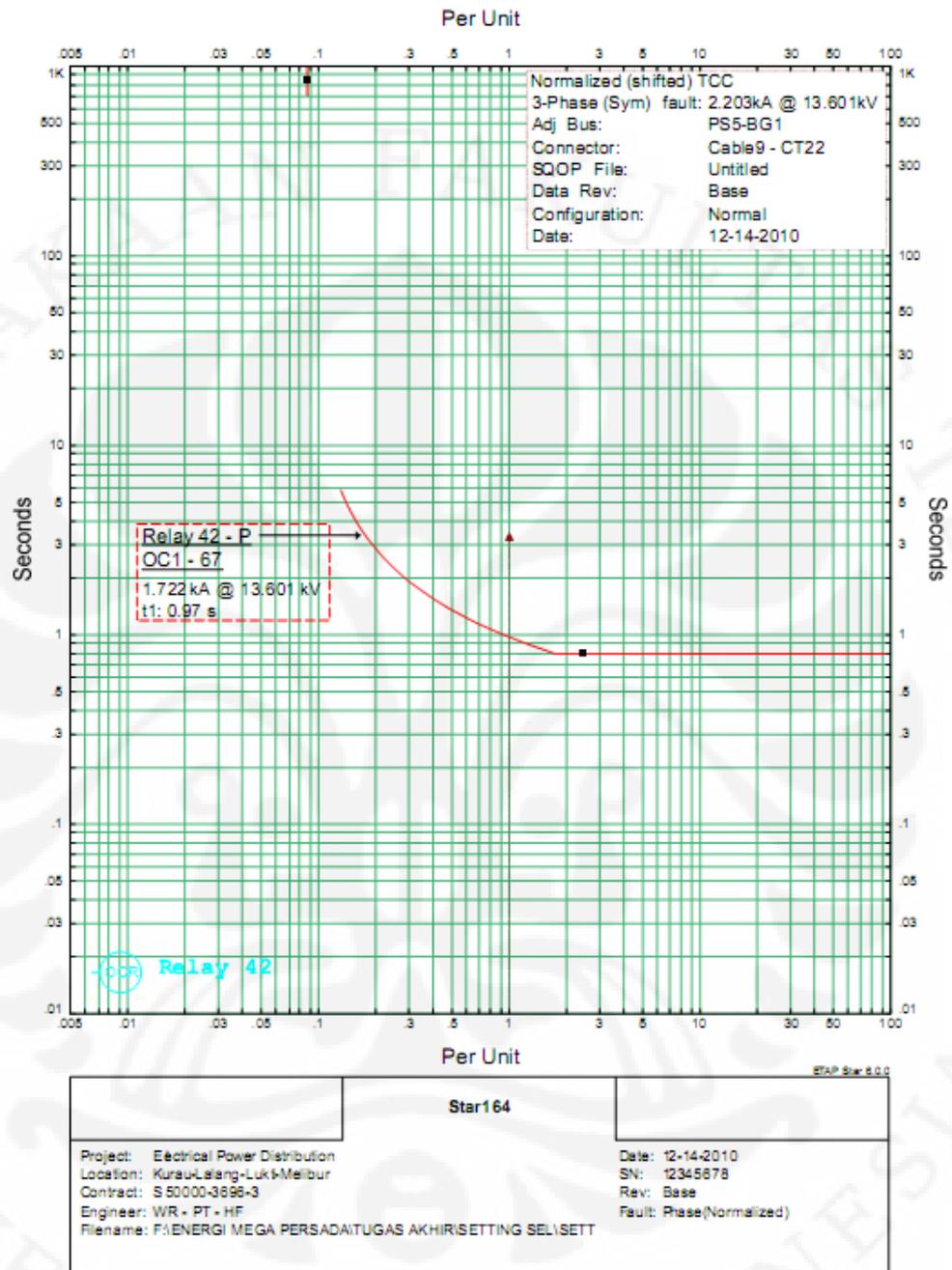
Gambar L.22 Koordinasi rele untuk arus gangguan satu fasa ke tanah dekat PS5BG1 searah jarum jam untuk kasus F_{3b}



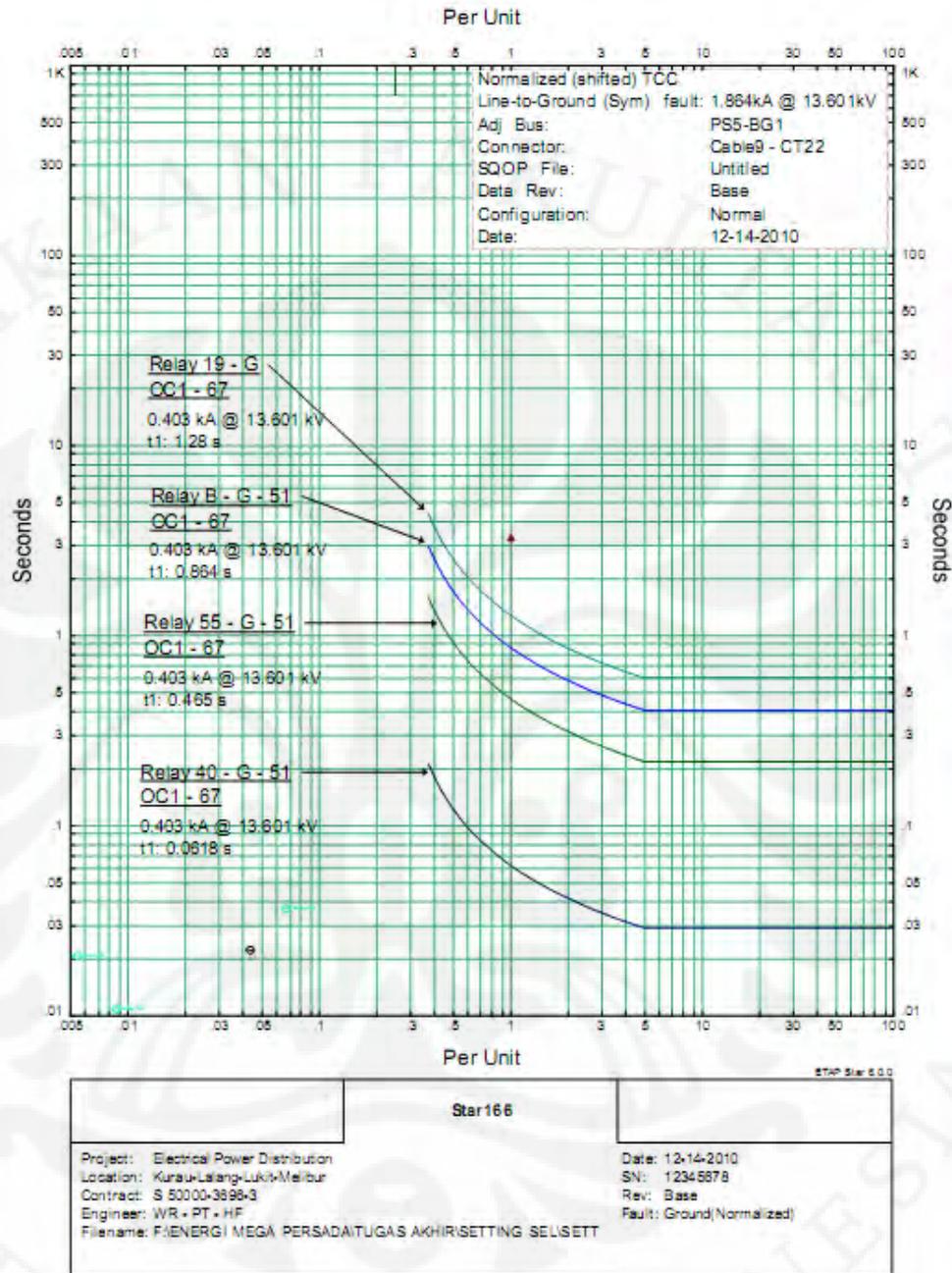
Gambar L.23 Koordinasi rele untuk arus gangguan satu fasa ke tanah dekat PS5BG1 berlawanan jarum jam untuk kasus $F_{3\phi}$



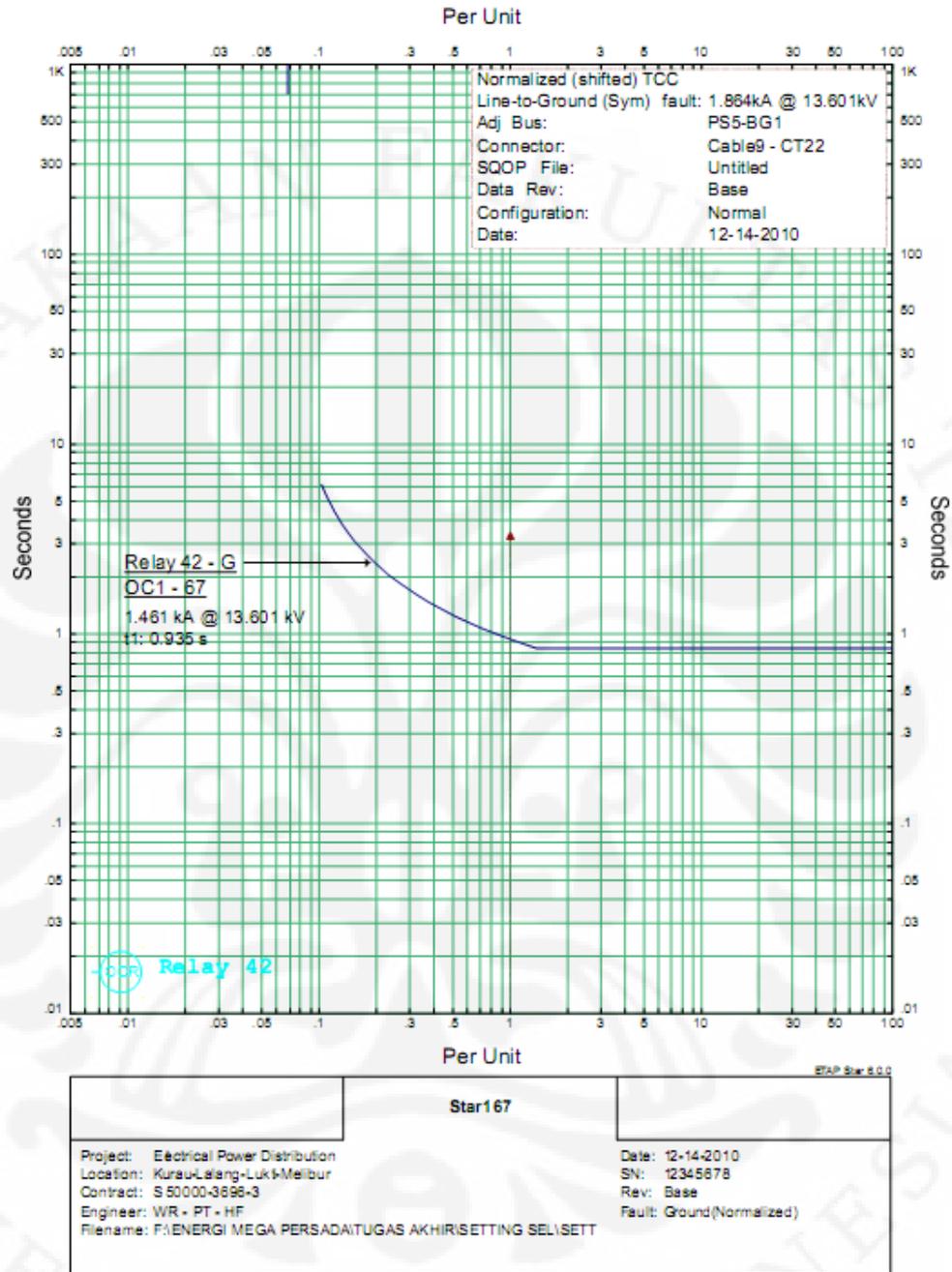
Gambar L.24 Koordinasi rele untuk arus gangguan 3 fasa dekat PS5BG1 searah jarum jam untuk kasus F_{4a}



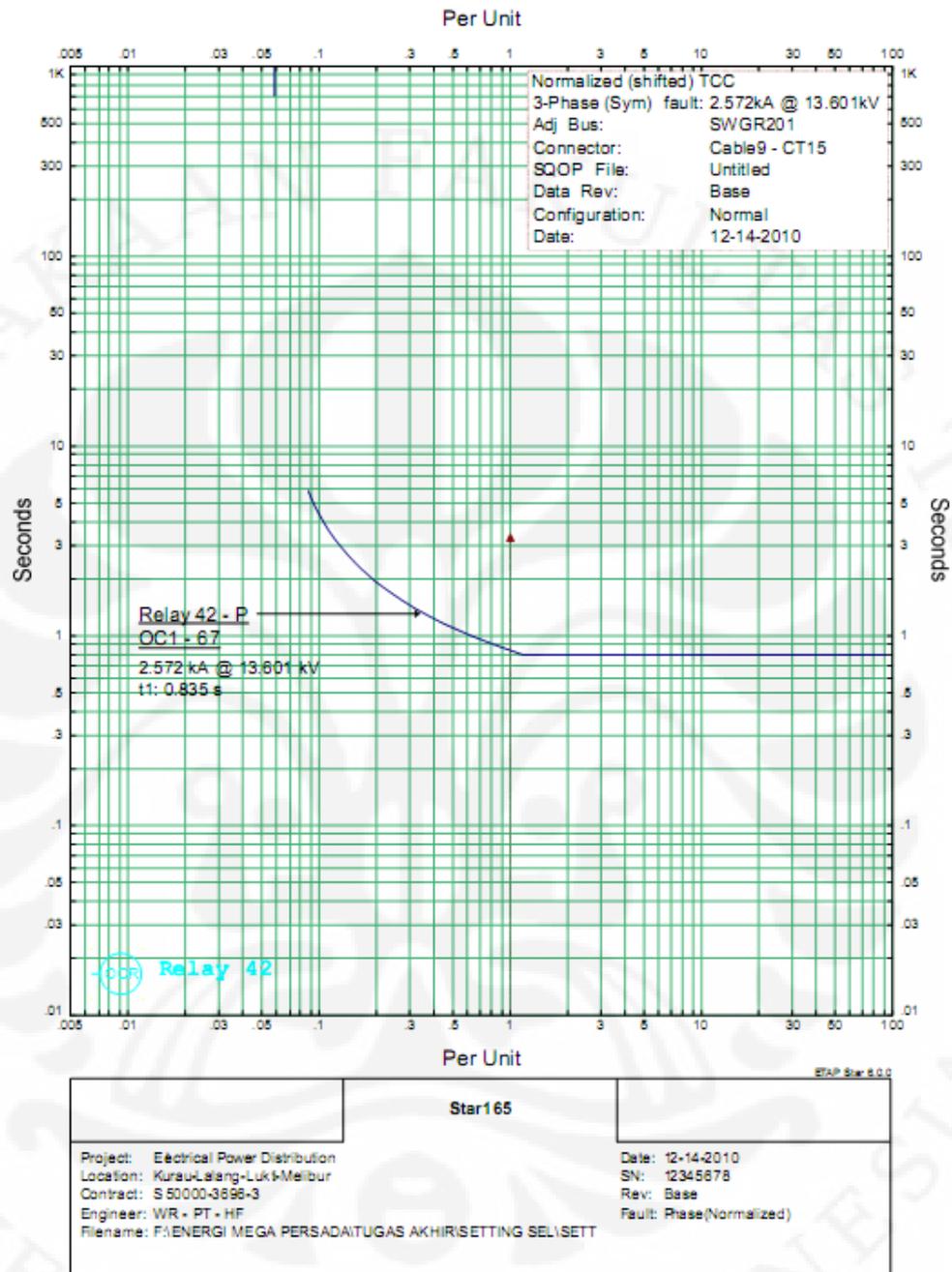
Gambar L.25 Koordinasi rele untuk arus gangguan 3 fasa dekat PS5BG1 berlawanan arah jarum jam untuk kasus F_{4a}



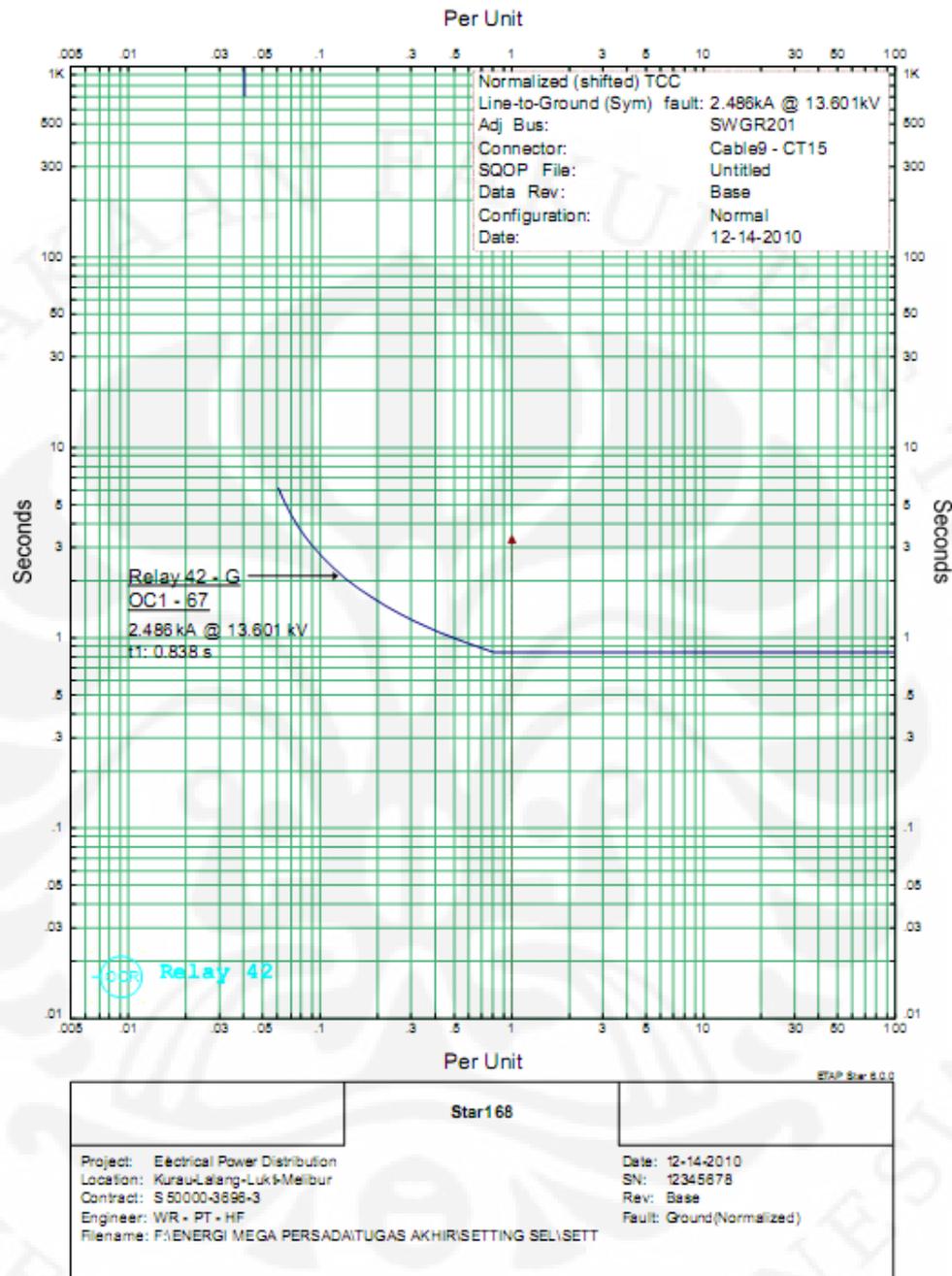
Gambar L.26 Koordinasi rele untuk arus gangguan satu fasa ke tanah dekat PS5BG1 searah jarum jam untuk kasus F_{4a}



Gambar L.27 Koordinasi rele untuk arus gangguan satu fasa ke tanah dekat PS5BG1 berlawanan jarum jam untuk kasus F_{4a}



Gambar L.28 Koordinasi rele untuk arus gangguan 3 fasa dekat SWGR201 berlawanan jarum jam untuk kasus F_{4b}



Gambar L.29 Koordinasi rele untuk arus gangguan satu fasa ke tanah dekat SWGR201 berlawanan jarum jam untuk kasus F_{4b}