

**STUDI KOORDINASI SISTEM PENGAMAN PENYULANG
TRAFO IV DI GARDU INDUK WARU**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**



Disusun oleh:

**RIZE TAUFIQ RAMADHAN
NIM. 105060307111018-63**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2014**

LEMBAR PERSETUJUAN

**STUDI KOORDINASI SISTEM PENGAMAN PENYULANG
TRAFO IV DI GARDU INDUK WARU**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**



Disusun oleh:
RIZE TAUFIQ RAMADHAN
NIM. 105060307111018-63

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Drs. Ir. Mahfudz Shidiq, MT.
NIP. 19580609 198703 1 003

Drs. Ir. Moch. Dhofir, MT.
NIP. 19600701 199002 1 001

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Allah SWT. atas nikmat dan hidayah-Nya sehingga skripsi dengan judul “**Studi Koordinasi Sistem Pengaman Penyulang Trafo IV Di Gardu Induk Waru**” dapat diselesaikan. Hanya kepada-Nya kita menyembah dan memohon. Serta sholawat terhadap junjungan Rasulullah Muhammad SAW, keluarga, sahabat serta seluruh umat-Nya. Skripsi ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Elektro Konsentrasi Teknik Energi Elektrik Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.

Tidak banyak yang bisa disampaikan kecuali ungkapan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah memberikan bimbingan, arahan dan dukungan sehingga penulisan skripsi ini dapat terselesaikan. Untuk itu disampaikan ucapan terima kasih kepada :

1. Bapak M.Azis Muslim, ST., MT., Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang
2. Bapak Hadi Suyono, ST., MT., Ph.D selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang
3. Bapak Mochammad Rif'an, ST., MT. selaku Ketua Program Studi Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang
4. Ibu Dr. Rini Nur Hasanah, ST., M.Sc selaku KKDK Teknik Energi Elektrik serta dosen dan karyawan Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang
5. Bapak Ir. Mahfudz Shidiq, MT. dan Bapak Drs. Ir. Moch.Dhofir, MT selaku dosen pembimbing skripsi yang telah banyak memberikan pengarahan dan bimbingan dalam penyelesaian skripsi ini serta atas segala bentuk bantuan dan saran yang membangun.
6. Ramah dan Ibu, Ja'far Razaki dan Syafiatun, yang memberikan semangat dan selalu memanjatkan doa yang tidak pernah terputus. Skripsi ini buat Ramah dan Ibu
7. Kakak tercinta, Rezki Rofik Alhuda, terima kasih atas kasih sayang, dukungan, do'a, dan semangat yang begitu tulus.
8. Ilfia Jihan Nurisama, abi, dan umik, terima kasih selalu ada untuk memberikan dukungan dan selalu menghibur saya.

9. Teman-teman Madura, sahabat HMH, Rizal, Dedi, Edi, Eko, Sofyan, Yoga, Mu'ammarr, Kevin, Nanda, Dheo, Iqbal, Azis, Afnan, Mas bas, feri, agam, ari, arez, mas tommy. Terimakasih atas do'a, canda, tawa, semangat dan semua bantuannya.
10. Teman-teman Angkatan 2010, rekan-rekan Konsentrasi Teknik Energi Elektrik, rekan-rekan Laboratorium Sistem Daya Elektrik Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang dan Eksekutif Mahasiswa Elektro Periode 2011-2014 Himpunan Mahasiswa Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang
11. Semua pihak yang telah memberikan bantuan serta dukungan baik yang tidak dapat disebutkan satu persatu secara langsung maupun tidak langsung atas penyusunan skripsi ini

Disadari bahwa skripsi ini belum sempurna, oleh karena itu saran dan kritik mengenai penelitian ini diharapkan agar penelitian ini dapat menjadi karya tulis yang lebih baik dan berguna.

Malang, 2 Juli 2014

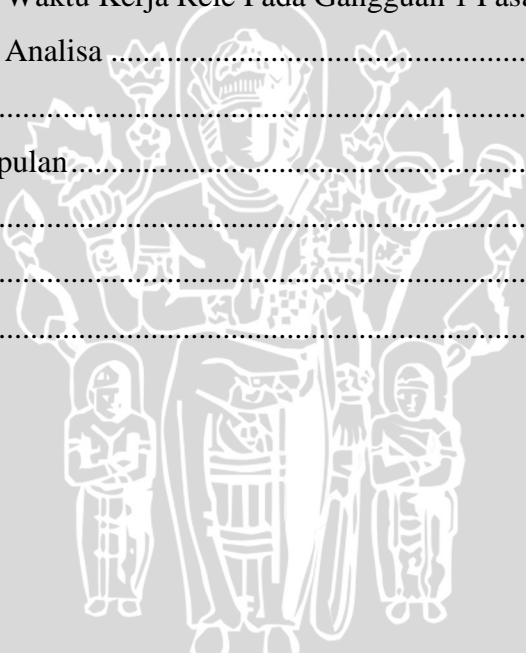
Rize Taufiq Ramadhan

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
ABSTRAK	x
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Ruang Lingkup.....	3
1.5 Tujuan.....	3
1.6 Manfaat.....	3
1.7 Sistematika Pembahasan.....	4
BAB II DASAR TEORI	5
2.1 Sistem Proteksi Tenaga Listrik.....	5
2.1.1 Pengertian Sistem Proteksi.....	5
2.1.2 Tujuan Sistem Proteksi.....	6
2.2 Persyaratan Sistem Proteksi.....	6
2.3 Gangguan Hubung Singkat.....	7
2.3.1 Komponen Simetri.....	8
2.3.2 Operator Vektor “a”.....	10
2.3.3 Perhitungan arus Gangguan Hubung Singkat.....	10
2.3.3.1 Menghitung Impedansi.....	11
2.3.3.2 Menghitung Arus Gangguan Hubung Singkat.....	15
2.4 Rele Arus Lebih (OCR).....	20
2.4.1 Pengertian Rele OCR.....	20
2.4.2 Jenis Rele OCR Berdasarkan Karakteristik Waktu.....	22
2.4.3 Prinsip Kerja Rele Arus Lebih.....	24
2.4.4 Penyetelan arus Setelan Rele Arus lebih (OCR) Jenis Inverse.....	25

2.4.5	Setelan <i>Time Multiple setting</i> (TMS) Rele Arus Lebih (OCR)	
	<i>Jenis Inverse</i>	25
2.5	Rele Hubung Tanah (GFR)	26
2.5.1	Pengertian GFR.....	26
2.5.2	Prinsip kerja GFR.....	27
2.5.3	Penyetelan Arus Setelan Rele Hubung Tanah (GFR) Jenis <i>Inverse</i>	27
2.5.4	Setelan <i>Time Multiple setting</i> (TMS) Rele Hubung Tanah (GFR) Jenis <i>Inverse</i>	27
BAB III	METODE PENELITIAN	29
3.1	Studi Literatur.....	30
3.2	Tempat dan Waktu Penelitian.....	30
3.3	Pengambilan Data.....	30
3.3.1	Data Sekunder	30
3.4	Teknis Analisis Data.....	30
3.5	Kesimpulan dan Saran	39
BAB IV	PERHITUNGAN DAN ANALISIS	40
4.1	Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat	40
4.2	Menghitung Impedansi Sumber.....	40
4.3	Menghitung Reaktansi Transformator.....	41
4.4	Menghitung Impedansi Penyulang	42
4.5	Menghitung Impedansi Ekiivalen Urutan Positif, Urutan Negatif, dan Urutan Nol.....	43
4.6	Menghitung Arus Gangguan Hubung Singkat pada Penyulang Transformator Daya IV Gardu Induk Waru.....	44
4.6.1	Arus Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa.....	45
4.6.2	Arus Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa	46
4.6.3	Arus Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah	47
4.6.4	Analisa	51
4.7	Perhitungan Penyetelan (<i>Setting</i>) Rele Proteksi	51
4.7.1	Penyetelan (<i>Setting</i>) Rele Arus Lebih (<i>Over Current Relay</i>) <i>Jenis Inverse</i> di sisi Penyulang 20 kV Transformator daya IV Gardu Induk Waru	51

4.7.2	Penyetelan (<i>Setting</i>) Rele Arus Lebih (<i>Over Current Relay</i>)	
	Jenis <i>Incoming</i> di sisi Penyulang 20 kV Transformator daya IV	
	Gardu Induk Waru	53
4.7.3	Penyetelan (<i>Setting</i>) Rele Hubung Tanah (<i>Ground Fault Relay</i>)	
	Jenis <i>Inverse</i> di sisi Penyulang 20 kV Transformator daya IV	
	Gardu Induk Waru	54
4.7.4	Penyetelan (<i>Setting</i>) Rele Hubung Tanah (<i>Ground Fault Relay</i>)	
	Jenis <i>Incoming</i> di sisi Penyulang 20 kV Transformator daya IV	
	Gardu Induk Waru	56
4.8	Pemeriksaan Waktu Kerja Rele	57
4.8.1	Waktu Kerja Rele Pada Gangguan 3 Fasa	57
4.8.2	Waktu Kerja Rele Pada Gangguan 2 Fasa	60
4.8.3	Waktu Kerja Rele Pada Gangguan 1 Fasa	62
4.8.4	Analisa	65
BAB V	PENUTUP	66
5.1	Kesimpulan	66
5.2	Saran	67
	DAFTAR PUSTAKA	68
	LAMPIRAN	69



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Komponen-komponen simetris.....	9
Gambar 2.2	Diagram fasor berbagai pangkat dari operator “a”	10
Gambar 2.3	<i>Single line</i> diagram jaringan distribusi	11
Gambar 2.4	Konversi X_S dari 150 kV ke 20 kV	12
Gambar 2.5	Gangguan hubung singkat 3 fasa.....	16
Gambar 2.6	Rangkaian ekivalen gangguan hubung singkat 3 fasa	16
Gambar 2.7	Gangguan hubung singkat 2 fasa.....	17
Gambar 2.8	Rangkaian ekivalen gangguan hubung singkat 2 fasa	18
Gambar 2.9	Gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah	19
Gambar 2.10	Rangkaian ekivalen gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah.....	19
Gambar 2.11	Karakteristik waktu seketika (instantaneous)	22
Gambar 2.12	Karakteristik waktu tertentu	22
Gambar 2.13	Karakteristik waktu terbalik (inverse)	23
Gambar 2.14	Rangkaian pengawatan rele arus lebih (OCR)	24
Gambar 2.15	Rangkaian pengawatan rele GFR	26
Gambar 3.1	Diagram Alir Metode Penelitian.....	29
Gambar 3.2	<i>Single line</i> diagram transformator daya IV Gardu Induk Waru	30
Gambar 3.3	Penyulang Pagesangan Transformator Daya IV Gardu Induk Waru	35
Gambar 3.4	Penyulang Platinum Transformator Daya IV Gardu Induk Waru.....	36
Gambar 3.5	Tahap perhitungan impedansi.....	37
Gambar 3.6	Diagram Alir Penyetelan Rele	38
Gambar 4.1	Penyulang Transformator Daya IV GI Waru dengan berbagai titik gangguan	40
Gambar 4.2	Kurva arus gangguan hubung singkat	50
Gambar 4.3	Kurva pemeriksaan waktu kerja rele 3 fasa penyulang Pagesanga ...	58
Gambar 4.4	Kurva pemeriksaan waktu kerja rele 3 fasa penyulang Platinum.....	59
Gambar 4.5	Kurva pemeriksaan waktu kerja rele 2 fasa penyulang Pagesangan ..	61
Gambar 4.6	Kurva pemeriksaan waktu kerja rele 2 fasa penyulang Platinum	62
Gambar 4.7	Kurva pemeriksaan waktu kerja rele 1 fasa ke tanah penyulang Pagesangan	63

Gambar 4.8 Kurva pemeriksaan waktu kerja rele 1 fasa ke tanah penyulang
Platinum.....64



DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Panjang jenis penghantar di gardu Induk Waru 34

Tabel 4.1 Hasil perhitungan impedansi sumber, reaktansi urutan positif, reaktansi urutan negatif, dan reaktansi urutan nol sistem 20 kV penyulang Bambe42

Tabel 4.2 Impedansi penyulang urutan positif dan negatif42

Tabel 4.3 Impedansi penyulang urutan nol 43

Tabel 4.4 Hasil perhitungan impedansi ekivalen (Z_{1eki} , Z_{2eki} , dan Z_{0eki}) menurut lokasi terjadinya gangguan44

Tabel 4.5 Hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat 3 fasa45

Tabel 4.6 Hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat 2 fasa47

Tabel 4.7 Hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah.....48

Tabel 4.8 Hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat 49

Tabel 4.9 Hasil perhitungan pemeriksaan waktu kerja rele arus lebih jenis inverse untuk gangguan 3 fasa penyulang Pagesangan transformator daya IV Gardu Induk Waru.....58

Tabel 4.10 Hasil perhitungan pemeriksaan waktu kerja rele arus lebih jenis inverse untuk gangguan 3 fasa penyulang Platinum transformator daya IV Gardu Induk Waru.....59

Tabel 4.11 Hasil perhitungan pemeriksaan waktu kerja rele arus lebih jenis inverse untuk gangguan 2 fasa penyulang Pagesangan transformator daya IV Gardu Induk Waru.....60

Tabel 4.12 Hasil perhitungan pemeriksaan waktu kerja rele arus lebih jenis inverse untuk gangguan 2 fasa penyulang Platinum transformator daya IV Gardu Induk Waru.....61

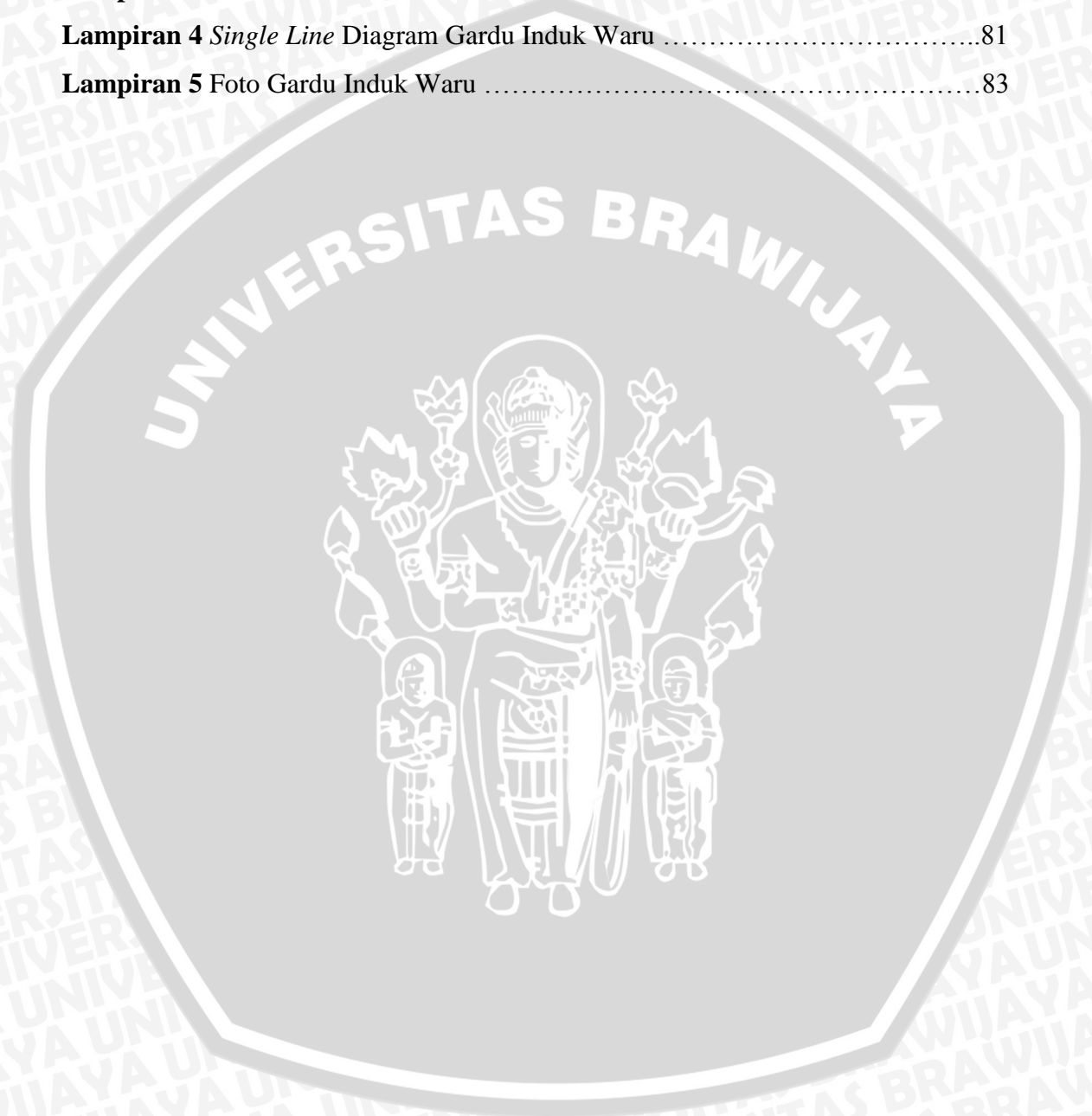
Tabel 4.13 Hasil perhitungan pemeriksaan waktu kerja rele arus lebih jenis inverse untuk gangguan 1 fasa ke tanah penyulang Pagesangan transformator daya IV Gardu Induk Waru63

Tabel 4.14 Hasil perhitungan pemeriksaan waktu kerja rele arus lebih jenis inverse untuk gangguan 1 fasa ke tanah penyulang Platinum transformator daya IV Gardu Induk Waru64



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Sheet Kabel	70
Lampiran 2 Rekap gangguan Penyulang gardu Induk Waru	71
Lampiran 3 Data Rele Proteksi Gardu Induk Waru	74
Lampiran 4 <i>Single Line</i> Diagram Gardu Induk Waru	81
Lampiran 5 Foto Gardu Induk Waru	83

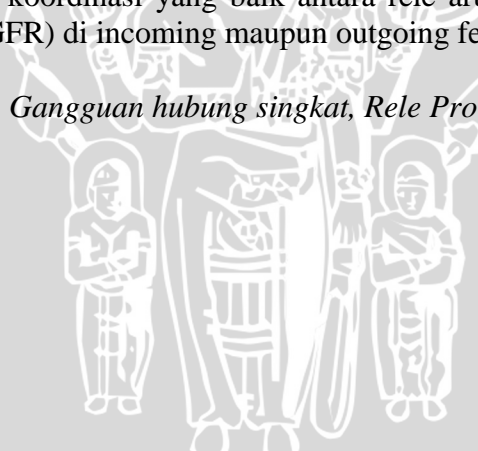


RINGKASAN

Rize Taufiq Ramadhan. Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Agustus 2014. **Studi Koordinasi Sistem Pengaman Penyulang Trafo IV di Gardu Induk Waru.** Dosen pembimbing: Mahfudz Shidiq, Ir., MT., Moch. Dhofir, Drs., Ir., MT.

Energi listrik merupakan energi utama yang digunakan hampir diseluruh sisi kehidupan. Di dalam penyaluran energi listrik diperlukan kontinuitas pelayanan yang baik kepada konsumen. Diantara bermacam-macam gangguan yang paling banyak adalah gangguan hubung singkat yang dapat menimbulkan kerusakan pada rangkaian listrik tersebut serta pada transformator dan lainnya. Jika gangguan hubung singkat dan beban lebih dibiarkan terus-menerus berlangsung dapat merusak peralatan,serta dapat menyebabkan pemadaman yang meluas. Gangguan hubung singkat dapat terjadi antara fasa (3 fasa atau 2 fasa) atau 1 fasa ke tanah dan sifatnya bisa temporer atau permanen. Untuk peningkatan keandalan (reliability), arus gangguan hubung singkat terbesar terjadi pada gangguan hubung singkat 3 fasa di bus bar 20 kV yaitu 6665,7077A dan terkecil terjadi pada arus gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah yaitu 678,1658A. Dari hasil analisis, dilakukan ressetting pada penyulang Pagesangan dan Platinum dengan setting kelambatan waktu 0,3 detik, untuk sisi *incoming* 0,7 detik. Koordinasi setting pengaman rele arus lebih (OCR) dan rele arus gangguan tanah (GFR) arus hubung singkat maksimum dan minimum, selain itu juga memberikan waktu tunda (Δt) dalam koordinasinya sesuai dengan urutan *grading time* sehingga tercapai koordinasi yang baik antara rele arus lebih (OCR) dan rele arus gangguan tanah (GFR) di *incoming* maupun *outgoing* feeder.

Kata Kunci : *Proteksi, Gangguan hubung singkat, Rele Proteksi, OCR, GFR*



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik merupakan energi utama yang digunakan hampir di seluruh sisi kehidupan. Di dalam penyaluran energi listrik diperlukan kontinuitas pelayanan yang baik kepada konsumen. Hal ini akan mempengaruhi keandalan sistem dan menyebabkan terjadinya pemadaman apabila keandalan sistem kurang baik. Keandalan sistem yang tinggi didukung oleh sistem proteksi yang baik. Sistem proteksi arus lebih yang baik harus mampu melakukan koordinasi yang sempurna, sehingga seksi yang terganggu saja yang dibebaskan dari sistem.

Penyebab terjadinya gangguan pada sistem tenaga listrik bisa berasal dari dalam maupun luar sistem jaringan. Gangguan yang berasal dari dalam biasanya disebabkan oleh penuaan dan tegangan hubung singkat. Sedangkan gangguan dari luar biasanya berupa gejala alam antara lain petir, hujan, angin, pohon, burung dan sebagainya. Diantara bermacam-macam gangguan yang paling banyak adalah gangguan hubung singkat yang dapat menimbulkan kerusakan pada rangkaian listrik tersebut pada transformator dan lainnya.

Gardu Induk Waru menyalurkan tegangan menengah 20 kV melalui 5 trafo yang dimiliki. Pada trafo 3 melayani penyulang UBM, Bungurasih, P sejati 2, dan UPB 2. Trafo 4 melayani penyulang Pagesangan, Platinum, dan Bambe. Trafo 5 melayani penyulang A. Yani, Suparman, Medaeng, dan Grahapena. Trafo 6 melayani penyulang Baja 1, Baja 2 dan Baja 3. Dan trafo 7 melayani penyulang Trias, Menanggal dan P Sehati.

Salah satu permasalahan yang ada di Gardu Induk Waru adalah gangguan hubung singkat sering terjadi pada jaringan 20 kV yaitu antara fasa (3 fasa atau 2 fasa) atau gangguan hubung singkat fasa ke tanah (2 fasa atau 1 fasa ketanah), jika koordinasi proteksi kurang baik dapat menyebabkan pemadaman yang meluas yang disebut *blackout*. Selain itu apabila terjadi gangguan pada penyulang transformator IV maka peralatan pengaman *incoming* transformator IV juga ikut bekerja. Hal ini perlu dilakukan penelitian untuk menganalisa penyebab terjadinya kurang baiknya koordinasi antara peralatan pengaman. Pada penyulang sering terjadi kasus trip pemutus tenaga (PMT) pada hal arus *setting* rele belum terlampaui, menurut survey lapangan melalui operator lapangan ada beberapa kemungkinan penyebab hal itu

terjadi diantaranya: perubahan karakteristik rele, perubahan impedansi saluran, perubahan karakteristik beban, reaktansi transformator, atau akibat kurang tepat analisa arus hubung singkat saat awal setting. Pada studi ini permasalahan yang diangkat adalah menganalisa kembali arus hubung singkat pada masing-masing penyulang untuk penyetelan ulang rele proteksi untuk peningkatan keandalan (*reliability*). Dengan begitu kontinuitas *supply* tenaga listrik terhadap konsumen dapat tetap terjamin.

Berdasarkan pokok bahasan tersebut, penelitian ini akan membahas masalah Analisis Setting Rele Arus Lebih dan Rele arus Gangguan Tanah Pada penyulang Trafo IV di Gardu Induk Waru.

1.2 Rumusan Masalah

Mengacu pada permasalahan yang diuraikan dalam latar belakang sehingga proteksi penyulang transformator dapat bekerja lebih baik, maka rumusan masalah yang ada pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Berapakah arus gangguan hubung singkat 3 fasa, 2 fasa, dan 1 fasa ke tanah.
2. Bagaimana penyetelan rele arus lebih dan rele arus gangguan tanah yang dipasang pada penyulang Transformator IV di Gardu Induk Waru.

1.3 Batasan Masalah

Agar permasalahan yang dibahas dalam penelitian ini mencapai sasaran yang diharapkan, maka batasan masalah yang perlu diberikan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pembahasan hanya pada penyulang Trafo IV di GI Waru.
2. Sistem proteksi yang dibahas adalah Rele Arus Lebih dan Rele Arus Gangguan Tanah pada sisi *incoming* dan sisi *outgoing* 20 kV.
3. Analisis *setting* rele proteksi Rele Arus Lebih dan Rele Arus Gangguan Tanah terhadap gangguan hubung singkat yang terjadi yaitu pada Busbar 20 kV GI Waru, 25%, 50%, 75%, dan 100% panjang SUTM 20 kV pada penyulang di Trafo IV.

1.4 Ruang Lingkup

Berdasarkan rumusan masalah di atas, ruang lingkup yang akan dibahas pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menghitung besar arus hubung singkat tiga fasa, dua fasa, dan satu fasa ke tanah.
2. Menghitung besar impedansi sumber (reaktansi).
3. Menghitung besar reaktansi transformator tenaga (urutan +, -, dan 0).
4. Menghitung besar impedansi penyulang per 25%, 50%, 75%, dan 100% panjang penyulang.
5. Menghitung besar impedansi ekuivalen.
6. Menghitung penyetyelan nilai rele arus lebih dan rele arus gangguan tanah.

1.5 Tujuan

Adapun tujuan penulisan penelitian ini adalah:

1. Untuk menghitung arus gangguan hubung singkat tiga fasa, fasa ke fasa, dan satu fasa ke tanah yang terjadi yaitu pada Busbar 20 kV GI Waru, 25%, 50%, 75%, dan 100% panjang SUTM 20 kV penyulang di trafo IV.
2. Untuk menentukan setelan waktu kerja Rele Arus Lebih dan Rele Arus Gangguan Tanah jenis *inverse* pada sisi masuk (*incoming*) dan sisi keluar (*outgoing*) penyulang di trafo IV agar selisih waktu kedua rele tersebut memenuhi standart PLN yaitu 0,4-0,5 detik.
3. Untuk mengetahui keandalan system proteksi dalam hal Rele Arus Lebih dan Rele Arus Gangguan Tanah pada penyulang di trafo IV yang ada di GI Waru dalam mengatasi arus gangguan hubung singkat tiga fasa, dua fasa, dan satu fasa ke tanah.

1.6 Manfaat

Meningkatkan mutu pelayanan pada masyarakat pemakai listrik serta meningkatkan kontinuitas penyaluran tenaga listrik. Serta mampu memberikan wawasan tentang sistem proteksi pada penyulang transformator IV Gardu Induk Waru yaitu Rele Arus Lebih dan Rele Arus Gangguan Tanah.

1.7 Sistematika Pembahasan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penyusunan laporan penelitian ini adalah sebagai berikut :

Bab I Pendahuluan : Berisi tentang uraian latar belakang, tujuan, rumusan masalah, batasan masalah, manfaat serta sistematika penulisan.

Bab II Tinjauan Pustaka : Membahas teori-teori yang mendukung dalam sistem proteksi transformator daya gardu induk sisi 20kv.

Bab III Metode Penelitian : Membahas tentang metode yang digunakan dalam penyusunan penelitian ini serta uraian data tentang Trafo IV GI Waru dan penyulangnya.

Bab IV Pembahasan : Berisi perhitungan gangguan hubung singkat (gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah, fasa ke fasa, dan satu fasa ke tanah), perhitungan *setting* rele proteksi (Rele Arus Lebih dan Rele Arus Gangguan Tanah) serta pembahasan dan hasil perhitungan.

Bab V Kesimpulan dan Saran : Memuat kesimpulan dan saran-saran



BAB II

DASAR TEORI

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

2.1 Sistem Proteksi Tenaga Listrik

2.1.1 Pengertian Sistem Proteksi

Sistem proteksi adalah susunan perangkat proteksi secara lengkap yang terdiri dari perangkat utama dan perangkat-perangkat lain yang dibutuhkan untuk melakukan fungsi proteksi. Gangguan pada sistem distribusi dapat diakibatkan oleh faktor alam, kelalaian manusia, atau kerusakan peralatan. (Bonar Pandjaitan 2012)

Macam-macam gangguan pada sistem distribusi dikelompokkan menjadi:

1. Gangguan yang bersifat temporer yang dapat hilang dari sendirinya atau dengan memutuskan sesaat bagian yang terganggu dari sumber tegangan.
2. Gangguan yang bersifat permanen, dimana untuk membebaskannya diperlukan tindakan perbaikan untuk menghilangkan penyebab gangguan tersebut.

Sistem proteksi penyulang tegangan menengah ialah pengamanan yang terdapat pada sel-sel tegangan menengah di Gardu Induk dan pengamanan yang terdapat pada jaringan tegangan menengah. Penyulang tegangan menengah ialah penyulang tenaga listrik yang berfungsi untuk mendistribusikan tenaga listrik tegangan menengah (6kv - 20kv).

Sedangkan sistem tenaga listrik sendiri adalah untuk menghasilkan dan menyalurkan energi listrik ke beban. Sistem tersebut harus dirancang dan dikendalikan untuk pengiriman energinya ke pengguna secara handal dan ekonomis.

2.1.2 Tujuan Sistem Proteksi

Gangguan pada sistem distribusi tenaga listrik hampir seluruhnya merupakan gangguan hubung singkat, yang akan menimbulkan arus yang cukup besar. Semakin besar sistemnya semakin besar gangguannya. Arus yang besar bila tidak segera dihilangkan akan merusak peralatan yang dilalui arus gangguan. Untuk melepaskan daerah yang terganggu itu maka diperlukan suatu sistem proteksi, yang pada

dasarnya adalah alat pengaman yang bertujuan untuk melepaskan atau membuka sistem yang terganggu, sehingga arus gangguan ini akan padam.

Adapun tujuan dari sistem proteksi antara lain (Hutaruk, 1991):

1. Untuk menghindari atau mengurangi kerusakan akibat gangguan pada peralatan yang terganggu atau peralatan yang dilalui oleh arus gangguan. Semakin cepat sistem proteksi bekerja maka pengaruh gangguan akan semakin kecil.
2. Untuk melokalisir (mengisolir) daerah gangguan menjadi sekecil mungkin.
3. Untuk dapat memberikan pelayanan listrik dengan keandalan yang tinggi.
4. Mengamankan manusia dari bahaya listrik.

2.2 Persyaratan Sistem Proteksi

Persyaratan terpenting dari sistem proteksi yaitu (Bonar Pandjaitan, 2012):

1. Kepekaan (*sensitivity*)

Rele pengaman harus mempunyai kepekaan yang tinggi terhadap besaran minimal sebagaimana direncanakan. Rele pengaman harus dapat bekerja pada awal terjadinya gangguan. Oleh karena gangguan lebih mudah diatasi pada awal kejadian. Hal ini memberi keuntungan dimana kerusakan peralatan yang harus diamankan menjadi kecil.

2. Keandalan (*Reliability*)

Keandalan merupakan kemampuan rele untuk selalu dapat bekerja dengan baik dan benar atau dengan peralatan lain selalu dapat dipercaya dan dapat diandalkan, walaupun pada kondisi sistem dan lingkungan yang kurang menguntungkan. Keandalan dapat dibagi menjadi dua unsur yaitu kemampuan rele untuk selalu dapat dengan benar apabila dibutuhkan dan kemampuan rele untuk tidak bekerja bila tidak dibutuhkan atau mencegah kerja yang tidak perlu.

3. Selektifitas (*Selectivity*)

Selektivitas suatu sistem proteksi jaringan tenaga adalah kemampuan rele proteksi untuk melakukan tripping secara tepat sesuai rencana yang telah ditentukan pada waktu mendesain sistem proteksi tersebut. Dalam pengertian lain, suatu sistem proteksi sistem tenaga harus bisa kerja secara selektif sesuai klasifikasi dan jenis gangguan yang harus diamankan.

4. Kecepatan (*Speed*)

Kecepatan kerja suatu pemangam rele pemangam adalah kemampuan rele untuk bekerja sesuai dengan waktu yang dibutuhkan. Kemampuan sistem proteksi untuk memisahkan gangguan secepat mungkin dari sistem akan mengurangi akibat yang ditimbulkan oleh gangguan tersebut. Maka kecepatan kerja rele pemangam merupakan faktor yang sangat penting.

5. Ekonomis

Suatu hal yang harus diperhatikan sebagai persyaratan rele pemangam adalah masalah biaya. Sangat mendasar untuk mendapatkan perlindungan maksimum dengan biaya minimum. Biaya tersebut harus dievaluasi dari segi tingginya biaya peralatan yang dilindungi dengan perlindungan yang tidak tepat atau tidak sesuai dengan kebutuhan.

2.3 Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubungan singkat yang mungkin terjadi dalam jaringan (Sistem kelistrikan) yaitu:

1. Gangguan hubung singkat tiga fasa
2. Gangguan hubung singkat dua fasa
3. Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah

Semua gangguan hubung singkat diatas, arus gangguannya dihitung dengan menggunakan rumus dasar yaitu:

$$I = \frac{V}{Z} \quad (2.1)$$

Dimana:

I : arus yang mengalir pada hambatan Z (A)

V : tegangan sumber (V)

Z : impedansi jaringan, nilai ekivalen dari seluruh impedansi di dalam jaringan dari sumber tegangan sampai titik gangguan (ohm)

Yang membedakan antara gangguan hubung singkat tiga fasa, dua fasa atau satu fasa ke tanah adalah impedansi yang terbentuk sesuai dengan macam gangguan itu sendiri, dan tegangan yang memasok arus ke titik gangguan.

Impedansi yang terbentuk dapat ditunjukkan seperti berikut ini:

$$Z \text{ untuk gangguan tiga fasa, } Z = Z_1$$

Z untuk gangguan dua fasa, $Z = Z_1 + Z_2$

Z untuk gangguan satu fasa, $Z = Z_1 + Z_2 + Z_0$ (2.2)

Dimana:

Z_1 : impedansi urutan positif (ohm)

Z_2 : impedansi urutan negatif (ohm)

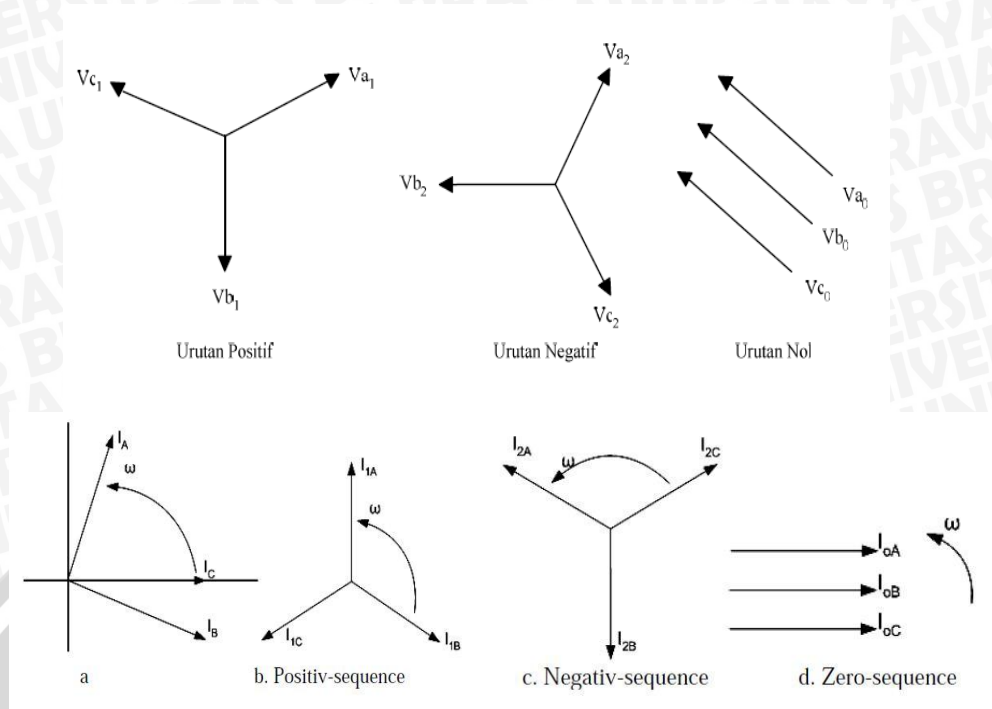
Z_0 : impedansi urutan nol (ohm)

2.3.1 Komponen Simetri

Untuk menganalisa rangkaian tiga fasa, dimana tegangan dan arusnya mempunyai fasa yang setimbang, yaitu mempunyai besaran yang sama dan elemen-elemen rangkaian pada setiap fasanya berbeda 120° dapat diselesaikan secara langsung dengan menggunakan rangkaian yang setara dengan fasa tunggal. Rangkaian tiga fasa tak setimbang sering terjadi dan sering dijumpai dalam analisa rangkaian, hal ini dapat terjadi karena adanya beban yang tidak setimbang. Untuk itu telah dikembangkan metode penyelesaian sistem banyak fasa yang tidak setimbang, yaitu dengan komponen simetri. Pada tiga fasor yang tidak setimbang dari suatu sistem yang ditunjukkan pada gambar 2.1 dibawah ini, yaitu fasor arus (I_a, I_b, I_c) atau fasor tegangan (V_a, V_b, V_c) dapat diuraikan menjadi fasor yang setimbang. Fasor inilah yang disebut komponen simetris dari sistem asalnya.

Prinsip dasar komponen simetris untuk rangkaian tiga fasa adalah bahwa tiap kelompok fasor yang tidak setimbang dalam sistem tiga fasa dapat diuraikan menjadi tiga kelompok fasor yang seimbang yaitu (Stevenson, 1993):

1. Komponen-komponen urutan positif (*positive sequence components*) yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lain dalam sudut fasa 120° dan mempunyai urutan fasa yang sama seperti fasor-fasor aslinya.
2. Komponen-komponen urutan negative (*negative sequence components*) yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lainnya dalam sudut sebesar 120° dan mempunyai urutan fasa yang berlawanan dengan fasor-fasor aslinya.
3. Komponen-komponen urutan nol (*zero sequence components*) yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan pergeseran fasanya nol antara fasor yang satu dengan yang lainnya.



Gambar 2.1 Komponen-komponen simetris

Sumber :Stevenson, 1993

2.3.2 Operator Vektor “a”

Pada penggunaan komponen simetris sistem tiga fasa memerlukan suatu fasor atau operator yang akan memutar rotasi dengan vector lainnya yang berbeda sudut 120° . Huruf “a” biasanya digunakan untuk menunjukkan operator yang menyebabkan perputaran sebesar 120° dalam arah yang berlawanan dengan arah jarum jam ditunjukkan pada gambar 2.2 dibawah ini.. Operator semacam ini adalah bilangan kompleks yang besarnya satu dan sudutnya 120° dan dedefinisikan sebagai berikut:

$$a = 1\angle 120^\circ = 1\angle -240^\circ \tag{2.3}$$

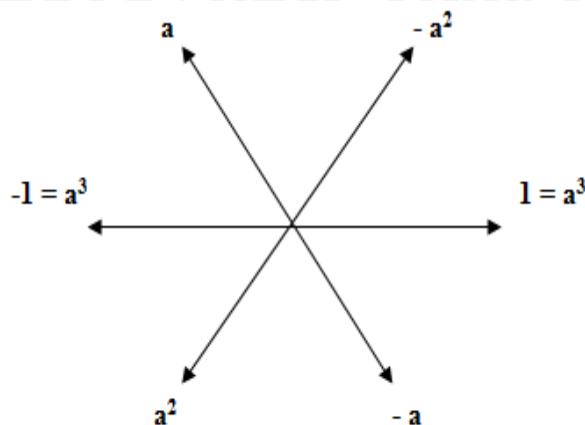
jika operator “a” dikenakan pada fasor dua kali berturut-turut, maka fasor itu akan diputar dengan sudut sebesar 240° . Untuk pengenaaan tiga kali berturut-turut fasor akan diputar dengan sudut 360° , jadi:

$$a^2 = a.a = (1\angle 120^\circ)(1\angle 120^\circ) = 1\angle 240^\circ = 1\angle -120^\circ \tag{2.4}$$

dan

$$a^3 = a.a.a = 1\angle 360^\circ = 1\angle 0^\circ \tag{2.5}$$

dalam gambar 2.2 memperlihatkan fasor yang melukiskan berbagai pangkat dari “a”.



Gambar 2.2 Diagram fasor berbagai pangkat dari operator “a”

Sumber :Stevenson, 1993

2.3.3 Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat

Perhitungan arus gangguan hubung singkat adalah analisa suatu sistem tenaga pada saat dalam gangguan hubung singkat, dimana nantinya akan diperoleh besar nilai besaran-besaran listrik yang dihasilkan sebagai akibat gangguan hubung singkat tersebut. Gangguan hubung singkat dapat didefinisikan sebagai gangguan yang terjadi akibat adanya penurunan dasar isolasi (*basic insulation strenght*) antara sesama kawat fasa, atau antara kawat fasa dengan tanah, yang menyebabkan kenaikan arus secara berlebihan atau bias juga disebut gangguan arus lebih.

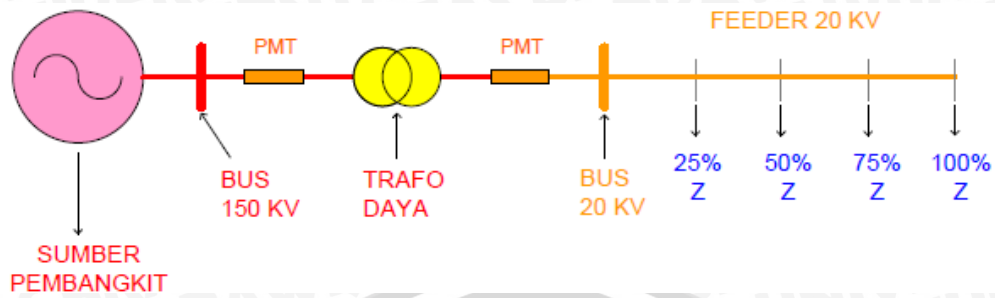
Perhitungan arus gangguan hubung singkat sangat penting untuk mempelajari sistem tenaga listrik baik pada waktu perencanaan maupun setelah beroperasi nantinya. Perhitungan arus hubung singkat dibutuhkan untuk:

- Setting dan koordinasi peralatan proteksi
- Menentukan kapasitas alat pemutus daya
- Menentukan rating hubung singkat peralatan-peralatan yang digunakan
- Menganalisa sistem jika ada hal-hal yang tidak baik yang terjadi pada waktu sistem sedang beroperasi.

Untuk menghitung arus gangguan hubung singkat pada sistem seperti diatas dilakukan dengan beberapa tahap perhitungan, yaitu sebagai berikut:

2.3.3.1 Menghitung Impedansi

Perhitungan arus hubung singkat pada dari sistem 20 kV yang dipasok dari gardu induk seperti pada gambar dibawah ini,



Gambar 2.3 Single line diagram jaringan distribusi

Sumber :PT PLN (PERSERO) P3B Region Surabaya Unit Pelayanan Transmisi

Untuk menghitung arus hubung singkat pada sistem diatas, pertama-tama hitung impedansi sumber (reaktansi) dalam hal ini diambil dari data hubung singkat pada bus 150 kV, kedua menghitung reaktansi transformator tenaga, ketiga menghitung impedansi penyulang.

a. Impedansi sumber

Untuk menghitung impedansi sumber maka data yang diperlukan adalah data hubung singkat pada bus primer trafo. Besar nilai impedansi sumber (trafo) dapat diperoleh dengan menggunakan rumus:

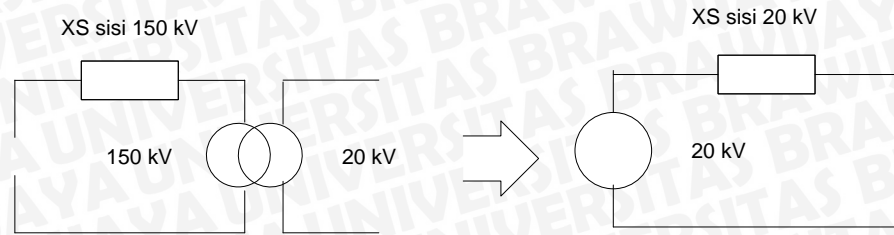
$$X_S = \frac{kV^2}{MVA} \tag{2.6}$$

Dimana:

- X_S : Impedansi sumber (ohm)
- kV : Tegangan sisi primer trafo tenaga (kV)
- MVA : Data hubung singkat di bus 150 kV (MVA)

Perlu diingat bahwa impedansi sumber ini adalah nilai ohm pada sisi 150 kV, karena arus hubung singkat yang akan dihitung adalah gangguan hubung singkat di sisi 20 kV, maka impedansi sumber tersebut harus dikonversi dulu ke sisi 20 kV, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.4 dibawah ini. Sehingga pada perhitungan arus gangguan nanti sudah menggunakan sumber 20 kV. Untuk mengkonversikan impedansi yang terletak di sisi 150 kV, dilakukan dengan cara sebagai berikut:





Gambar 2.4 Konversi X_S dari 150 kV ke 20 kV

Sumber : Sarimun, W. 2012; 165

Dasar perhitungan untuk mengetahui nilai impedansi sumber pada sisi 20 kV adalah:

$$\text{Daya sisi 150 kV} = \text{Daya sisi 20 kV}$$

$$\frac{kV_1^2}{Z_1 (\text{sisi 150 kV})} = \frac{kV_2^2}{Z_2 (\text{sisi 20 kV})}$$

$$X_S (\text{sisi 20 kV}) = \frac{20^2}{150^2} \times X_S (\text{sisi 150 kV}) \quad (2.7)$$

b. Impedansi transformator

Pada perhitungan impedansi suatu transformator yang diambil adalah harga reaktansinya, sedangkan tahananannya diabaikan karena harganya kecil. Untuk mencari nilai reaktansi trafo dalam ohm dihitung dengan cara sebagai berikut.

Langkah pertama mencari nilai ohm pada 100% untuk trafo pada 20 kV, yaitu dengan menggunakan rumus:

$$Z_B = \frac{kV^2}{MVA} \quad (2.8)$$

Dimana:

Z_B : Impedansi trafo tenaga pada 100% (ohm)

kV^2 : Tegangan sisi sekunder trafo tenaga (kV)

MVA : Kapasitas daya trafo tenaga (MVA)

Reaktansi urutan positif, negatif ($X_{t1} = X_{t2}$)

$$X_{t1} = \text{reaktansi trafo (\%)} \times Z_B \quad (2.9)$$

Reaktansi urutan nol trafo tenaga

Sebelum menghitung reaktansi urutan nol (X_{t0}) terlebih dahulu harus diketahui data trafo tenaga itu sendiri yaitu data dari kapasitas belitan delta yang ada dalam kapasitas trafo:

1. Untuk trafo tenaga dengan hubungan belitan ΔY dimana kapasitas belitan delta sama besar dengan kapasitas belitan Y, maka $X_{t0} = X_{t1}$
2. Untuk trafo tenaga dengan hubungan belitan ΔY dimana kapasitas belitan delta (d) biasanya adalah sepertiga dari kapasitas belitan Y (belitan yang dipakai untuk menyalurkan daya, sedangkan belitan delta tetap ada di dalam tetapi tidak dikeluarkan kecuali satu terminal delta untuk ditanahkan), maka nilai $X_{t0} = 3x X_{t1}$
3. Untuk trafo tenaga dengan hubungan belitan YY dan tidak mempunyai belitan delta di dalamnya, maka untuk menghitung besarnya X_{t0} berkisar antara 9 s/d $14x X_{t1}$

c. Impedansi penyulang

Menghitung impedansi penyulang, impedansi penyulang ini dihitung tergantung dari besarnya impedansi per meter penyulang yang bersangkutan, dimana besar nilainya ditentukan dari konfigurasi tiang yang digunakan untuk jaringan SUTM atau dari jenis tabel kabel tanah untuk jaringan SKTM. Dalam perhitungan disini diambil dengan impedansi $Z = (R+jX) \Omega/\text{km}$.

Dengan demikian nilai impedansi penyulang untuk lokasi gangguan yang dalam perhitungan ini disimulasikan terjadi pada lokasi dengan jarak 0%, 25%, 75%, dan 100% panjang penyulang.

Sehingga untuk impedansi penyulang dapat ditentukan dengan menggunakan rumus:

1. Urutan positif dan urutan negatif

$$Z_1 = Z_2 = \% \text{ panjang} \times \text{panjang penyulang (km)} \times Z_1 / Z_2 \text{ (ohm)} \quad (2.10)$$

Dimana:

Z_1 : impedansi urutan positif (ohm)

Z_2 : impedansi urutan negatif (ohm)

2. Urutan nol

$$Z_0 = \% \text{ panjang} \times \text{panjang penyulang (km)} \times Z_0 \text{ (ohm)} \quad (2.11)$$

Dimana:

Z_0 : Impedansi urutan nol (ohm)

d. Impedansi ekivalen jaringan

Perhitungan yang akan dilakukan di sini adalah perhitungan besarnya nilai impedansi ekivalen positif (Z_{1eki}), negatif (Z_{2eki}), dan nol (Z_{0eki}) dari titik gangguan sampai ke sumber sesuai dengan urutan diatas.

Karena dari sumber ke titik gangguan impedansi yang terbentuk adalah tersambung seri maka perhitungan Z_{1eki} dan Z_{2eki} dapat langsung dengan cara menjumlahkan impedansi tersebut, sedangkan untuk perhitungan Z_{0eki} dimulai dari titik gangguan sampai ke trafo tenaga yang netralnya ditanahkan. Akan tetapi untuk menghitung impedansi Z_{0eki} ini, harus diketahui dulu hubungan belitan trafonya.

Sehingga untuk impedansi ekivalen jaringan dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

1. Urutan positif dan urutan negatif ($Z_{1eki} = Z_{2eki}$)

$$Z_{1eki} = Z_{2eki} = X_{S(sisi\ 20\ kV)} + X_{t1} + Z_1 \text{ penyulang} \quad (2.12)$$

Dimana:

Z_{1eki} : impedansi ekivalen jaringan urutan positif (ohm)

Z_{2eki} : impedansi ekivalen jaringan urutan negatif (ohm)

$X_{S(sisi\ 20\ kV)}$: impedansi sumber sisi 20 kV (ohm)

X_{t1} : impensi trafo tenaga urutan positif dan negatif (ohm)

Z_1 : impedansi urutan positif dan negatif (ohm)

2. Urutan nol

$$Z_{0eki} = X_{t0} + 3RN + Z_0 \text{ penyulang} \quad (2.13)$$

Dimana:

Z_{0eki} : impedansi ekivalen jaringan nol (ohm)

Z_{t0} : impedansi trafo tenaga urutan nol (ohm)

RN : tahanan tanah trafo tenaga (ohm)

Z_0 : impedansi urutan nol (ohm)

Karena lokasi gangguan diasumsikan terjadi pada 0%, 25%, 75%, dan 100% panjang penyulang, maka Z_{1eki} , Z_{2eki} , dan Z_{0eki} yang didapat juga pada lokasi tersebut.

Setelah mendapatkan impedansi ekivalen sesuai dengan lokasi gangguan, selanjutnya perhitungan arus gangguan hubung singkat dapat dihitung dengan menggunakan rumus dasar seperti dijelaskan sebelumnya, hanya saja impedansi

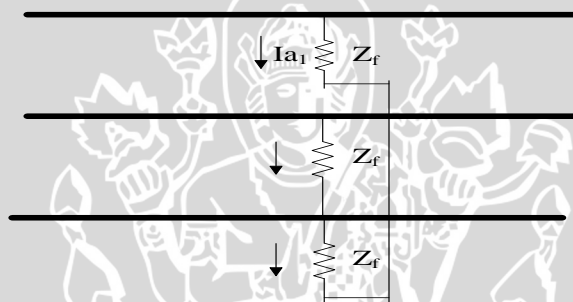
ekivalen mana yang dimasukkan ke dalam rumus dasar tersebut adalah tergantung dari hubung singkat 3 fasa, 2 fasa, dan 1 fasa ke tanah.

2.3.3.2 Menghitung Arus Gangguan Hubung singkat

Perhitungan arus gangguan hubung singkat dapat dihitung dengan menggunakan rumus dasar, impedansi ekivalen mana yang dimasukkan kedalam rumus dasar tersebut adalah jenis gangguan hubung singkat tiga fasa, dua fasa, atau satu fasa ke tanah. Sehingga formula yang digunakan untuk perhitungan arus hubung singkat tiga fasa, dua fasa, dan satu fasa ke tanah berbeda.

a. Perhitungan arus gangguan hubung singkat tiga fasa

Rangkaian gangguan tiga fasa pada suatu jaringan dengan hubungan transformator YY dengan netral ditanahkan melalui suatu tahanan. Ditunjukkan pada gambar 2.5 dibawah ini :



Gambar 2.5 Gangguan hubung singkat 3 fasa

Sumber : Stevenson, 1994

Dengan memperhatikan gambar 2.5 diatas maka dapat diketahui kondisi sebagai berikut:

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

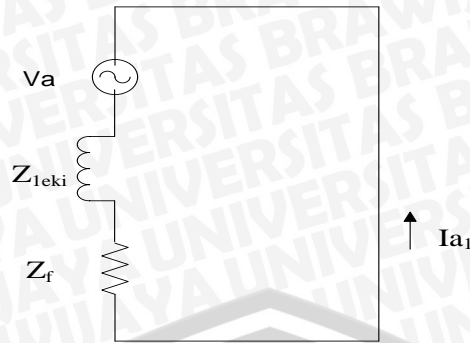
$$I_{a0} = 0 ;$$

$$I_{a2} = 0 ;$$

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

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

Kemudian, hubungan jala-jala urutan gangguan 3 fasa ditunjukkan pada gambar 2.6 dibawah ini



Gambar 2.6 Rangkaian ekivalen gangguan hubung singkat 3 fasa

Sumber : Sarimun, W. 2012; 94

Sehingga arus gangguan hubung singkat tiga fasa dapat dihitung dengan menggunakan rumus (Sarimun, 2012) :

$$I_{3fasa} = \frac{V}{Z_{1eq} + Z_f} \tag{2.14}$$

Dimana:

I_{3fasa} : Arus gangguan hubung singkat tiga fasa (A)

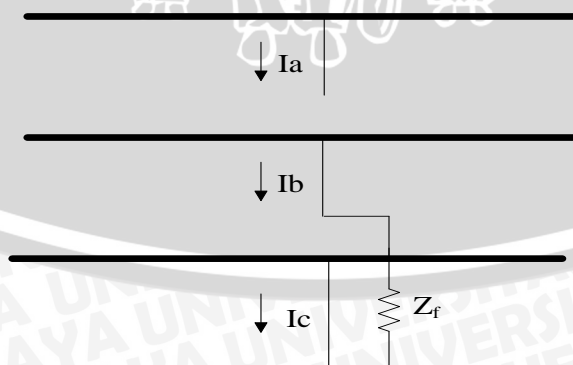
V : Tegangan fasa-netral sistem 20 kV = $\frac{20.000}{\sqrt{3}}$ (V)

Z_{1eki} : Impedansi ekivalen urutan positif (ohm)

Z_f : Impedansi gangguan (ohm)

b. Perubahan arus gangguan hubung singkat dua fasa

Gangguan hubung singkat 2 fasa pada saluran tenaga dengan hubungan transformator YY dengan netral ditanahkan melalui RNGR, ditunjukkan pada gambar 2.7 dibawah ini:



Gambar 2.7 Gangguan hubung singkat 2 fasa

Sumber : Stevenson, 1994



Dengan memperhatikan gambar 2.7 diatas maka dapat diketahui kondisi sebagai berikut:

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

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

Dari persamaan diatas didapat bahwa:

$$I_{a0} = 0 ;$$

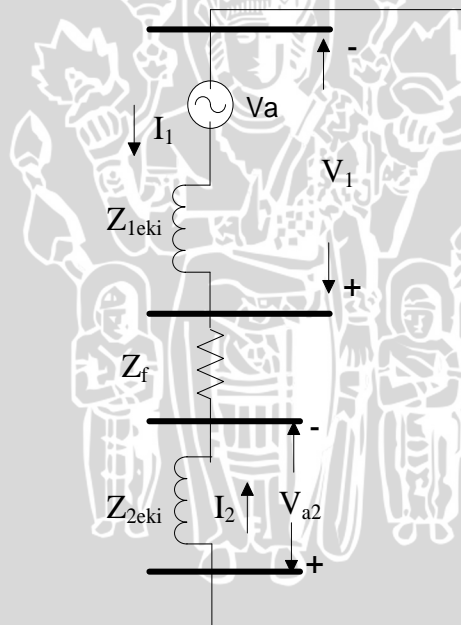
$$I_{a1} = \frac{1}{3} (a - a^2) I_b ;$$

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

Sehingga

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

Kemudian, hubungan jala-jala urutan gangguan 2 fasa ditunjukkan pada gambar 2.8 dibawah ini:



Gambar 2.8 Rangkaian ekivalen gangguan hubung singkat 2 fasa

Sumber : Sarimun, W. 2012; 91

Sehingga arus gangguan hubung singkat dua fasa dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$I_{2fasa} = \frac{V}{Z_{1eki} + Z_{2eki} + Z_f}$$

Karena $Z_{1eki} = Z_{2eki}$, maka:

$$I_{2fasa} = \frac{V}{2xZ_{1eki} + Z_f} \quad (2.15)$$

Dimana:

I_{2fasa} : Arus gangguan hubung singkat dua fasa (A)

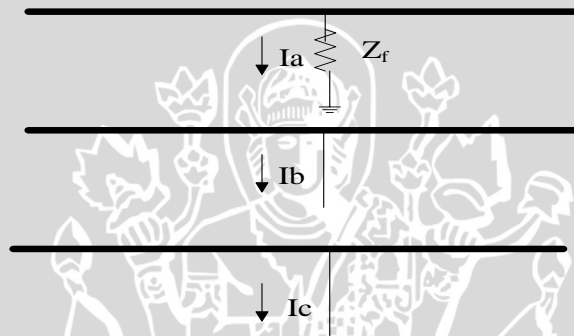
V : Tegangan fasa-fasa sistem 20 kV = 20.000 (V)

Z_{1eki} : Impedansi urutan positif (ohm)

Z_f : Impedansi gangguan (ohm)

c. Perhitungan arus gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah

Gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah pada saluran tenaga dengan hubungan transformator YY dengan netra ditanahkan melalui RNGR, ditunjukkan pada gambar dibawah ini:



Gambar 2.9 Gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah

Sumber : Stevenson, 1994

Dengan memperhatikan gambar 2.9 diatas maka dapat diketahui kondisi sebagai berikut:

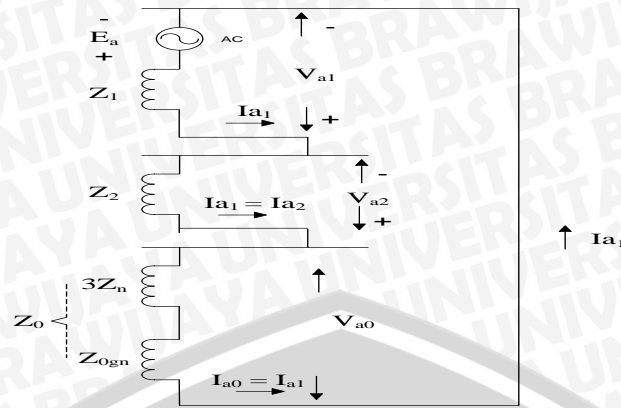
$$I_b = 0 ; I_c = 0 ; V_a = 0,$$

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

Dari persamaan diatas didapat bahwa:

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{1}{3} I_a$$

Kemudian, hubungan jala-jala urutan gangguan 1 fasa ke tanah ditunjukkan pada gambar 2.10 dibawah ini:



Gambar 2.10 Rangkaian ekivalen gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah

Sumber : Sarimun, W. 2012; 89

Sehingga arus hubung singkat satu fasa ke tanah dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$I_{1fasa} = \frac{3 \times V}{Z_{1eki} + Z_{2eki} + Z_{0eki} + Z_f}$$

Karena $Z_{1eki} = Z_{2eki}$, maka:

$$I_{1fasa} = \frac{3 \times V}{2 \times Z_{1eki} + Z_{0eki} + Z_f} \tag{2.16}$$

Dimana:

I_{1fasa} : Arus gangguan hubung singkat dus fasa (A)

V : Tegangan fasa-netral sistem $20 \text{ kV} = \frac{20.000}{\sqrt{3}}$

Z_{1eki} : Impedansi urutan positif (ohm)

Z_{0eki} : Impedansi urutan nol (ohm)

Z_f : Impedansi gangguan (ohm)

Arus gangguan hubung singkat merupakan aliran arus yang tidak normal (besar) yang disebabkan terjadinya hubungan antara sesama kawat penghantar bertegangan atau antara kawat penghantar bertegangan dengan tanah secara langsung tidak melalui media yang seharusnya (beban/isolator). Oleh karena itu arus hubung singkat dapat dikatakan arus lebih, tetapi arus lebih belum tentu dapat dikatakan arus hubung singkat. Dalam perhitungan arus gangguan hubung singkat untuk proteksi rele cukup dihitung salah satu fasa aja. Pada perhitungan arus gangguan hubung singkat tiga fasa, dua fasa, dan satu fasa ke tanah, nilai impedansi gangguan (Z_f) dianggap nol ($Z_f = 0$).



2.4 Rele Arus Lebih (OCR)

2.4.1 Pengertian Rele OCR

Rele arus lebih atau yang lebih dikenal dengan *Over Current Relay* (OCR) adalah suatu rele yang bekerjanya berdasarkan adanya kenaikan arus yang melebihi suatu nilai pengaman tertentu dalam jangka waktu tertentu, sehingga rele ini dapat dipakai sebagai pola pengaman arus lebih. (Bonar Pandjaitan, 2012)

Rele arus lebih ini berfungsi untuk memproteksi peralatan listrik terhadap arus lebih yang disebabkan oleh gangguan arus hubung singkat atau dapat pula dikatakan bahwa rele ini berfungsi merasakan adanya arus lebih dan kemudian memberi perintah kepada pemutus tenaga (PMT) untuk membuka rangkaian apabila terjadi gangguan hubung singkat sehingga kerusakan alat akibat gangguan dapat dihindari. Selain itu rele arus lebih juga berfungsi untuk mengamankan transformator dari arus yang melebihi dari arus yang dibolehkan lewat dari transformator tersebut. Umumnya rele arus lebih digunakan pada jaringan tegangan menengah atau saluran transmisi, jaringan seb-radial, pengaman untuk motor-motor tegangan menengah yang kecil, pengaman cadangan (untuk transformator daya, generator, motor yang besar, jaringan transmisi tegangan tinggi), bila dilengkapi dengan rele arah dapat digunakan sebagai pengaman saluran transmisi sirkuit ganda dan pengaman gangguan tanah sampai tegangan ekstra tinggi, hanya disini yang membedakan adalah fungsi dari rele tersebut. Yang dimaksud fungsi disini adalah:

1. Berfungsi sebagai pengaman utama (*Main Protection*)

Sebagai pengaman utama SUTM/SKTM bertujuan untuk:

- a. Mencegah kerusakan SUTM/SKTM dari gangguan hubung singkat
- b. Membatasi luas daerah terganggu (pemadaman sekecil mungkin)
- c. Berfungsi sebagai pengaman cadangan (Bac-up Protection)

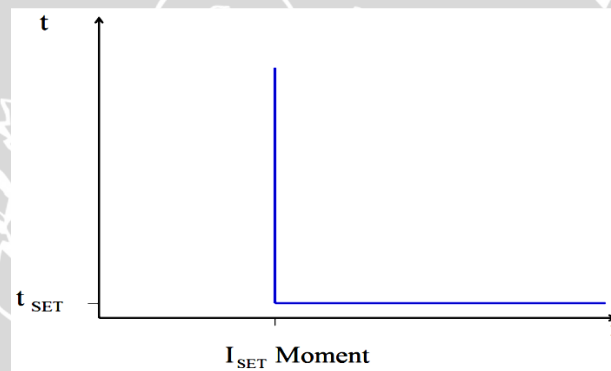
Sebagai pengaman cadangan trafo atau SUTT bertujuan sama dengan yang diatas yaitu mencegah kerusakan trafo atau SUTT dari gangguan hubung singkat dan membatasi luas daerah terganggu (pemadaman) sekecil mungkin, hanya bekerja apabila pengaman utama di peralatan tersebut tidak bekerja. Selain itu rele arus lebih dijadikan pengaman cadangan karena untuk mengkoordinasi sulit untuk mendapatkan selektifitas yang baik. Pengaman menggunakan rele arus lebih mempunyai beberapa keuntungan yaitu:

- Dapat mengamankan arus lebih yang terjadi karena hubung singkat atau beban lebih
- Penyetelan mudah untuk jaruangan radial
- Pengaman sederhana
- Dapat sebagai pengaman utama dan berfungsi juga sebagai pengaman cadangan
- Harga relatif murah

2.4.2 Jenis Rele OCR Berdasarkan Karakteristik Waktu

- Rele arus lebih seketika (*instantaneous*)

Relai arus lebih seketika memiliki karakteristik jangka waktu relai mulai *pick-up* sampai selesainya kerja relai sangat pendek (20-100ms) tanpa adanya penundaan waktu. (Taqiyyuddin, 2006)

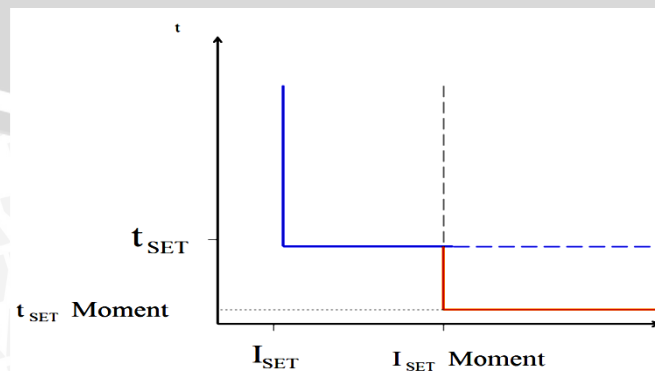


Gambar 2.11 Karakteristik waktu seketika (*instantaneous*)

Sumber: Setiyo Saksomo, tanpa tahun: 31

- Rele arus lebih waktu tertentu (*definite time*)

Rele arus lebih waktu tertentu adalah rele yang bekerja dengan settingan waktu. Jangka waktu mulai relai pick up sampai kerja relai diperpanjang dengan harga tertentu tidak tergantung besarnya arus.

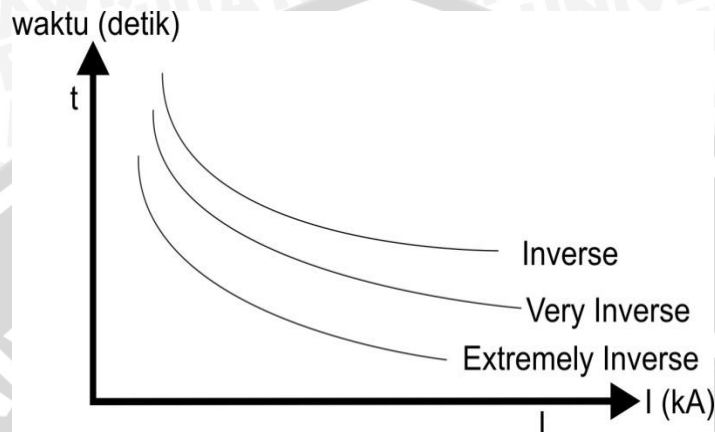


Gambar 2.12 Karakteristik waktu tertentu

Sumber: Setiyo Saksomo, tanpa tahun: 31

c. Rele arus lebih waktu inverse (*inverse time*)

Rele arus lebih waktu inverse adalah releyang waktu operasinya dipengaruhi oleh besarnya arus. Jadi semakin besar arus gangguan maka waktu kerja releakan semakin cepat, arus gangguan berbanding terbalik dengan waktu kerja rele.



Gambar 2.13 Karakteristik waktu terbalik (*inverse*)

Sumber: Setiyo Saksomo, tanpa tahun: 31

Pada rele jenis ini karakteristik kecuraman waktu-arus dikelompokkan menjadi:

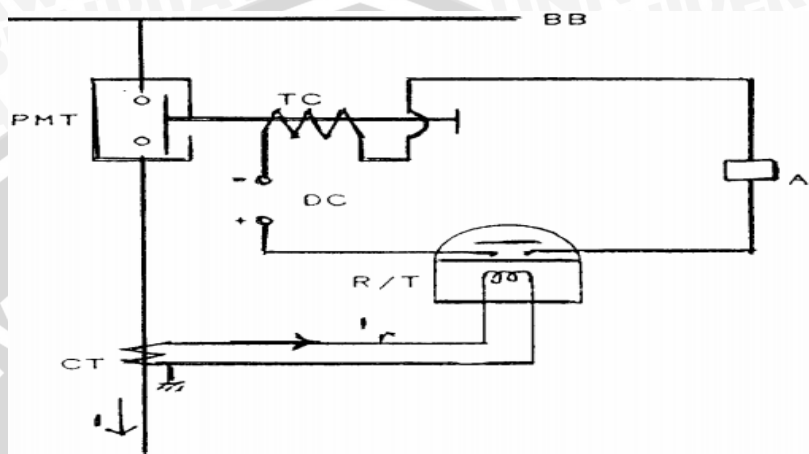
- Normal inverse
- Very inverse
- Extremely inverse

Pada dasarnya peralatan listrik dapat dibedakan menjadi dua kelompok yaitu tanpa menggunakan komponen semikonduktor dan menggunakan komponen semikonduktor. Komponen semikonduktor adalah komponen elektronika yang pada umumnya merupakan bagian dari perangkat pengontrol atau pengubah daya. Sedangkan peralatan listrik yang tidak menggunakan komponen semikonduktor lebih tahan terhadap surja petir. Berbeda dengan peralatan listrik yang menggunakan komponen semikonduktor yang sangat sensitif terhadap surja petir.

Komponen semikonduktor sangat rentan terhadap perubahan tegangan atau arus yang mendadak. Apabila batas toleransi perubahan tegangan atau arus tersebut berlebih maka peralatan tersebut akan rusak. Hal ini akan menyebabkan seluruh sistem peralatan akan tidak berfungsi lagi.

2.4.3 Prinsip Kerja Rele Arus Lebih

Prinsip kerja rele arus lebih adalah berdasarkan adanya arus lebih yang dirasakan rele, baik disebabkan adanya gangguan hubung singkat atau overload (bebani lebih) untuk kemudian memberikan perintah trip ke PMT sesuai dengan karakteristik waktunya.



Gambar 2.14 Rangkaian pengawatan rele arus lebih (OCR)

Sumber : B, Ravindranath, 1976:76

Cara kerjanya dapat diuraikan sebagai berikut:

- Pada kondisi normal arus beban (I_b) mengalir pada SUTM/SKTM dan oleh trafo arus besaran arus ini di transformasikan ke besaran sekunder (I_r). Arus (I_r) mengalir pada kumparan rele tetapi karena arus ini masih lebih kecil dari pada suatu harga yang ditetapkan (setting), maka rele tidak bekerja.
- Bila terjadi gangguan hubung singkat, arus (I_b) akan naik dan menyebabkan arus (I_r) naik pula, apabila arus (I_r) naik melebihi suatu harga yang telah ditetapkan (diatas setting), maka rele akan bekerja dan memberikan perintah trip pada tripping coil untuk bekerja dan membuka PMT, sehingga SUTM/SKTM yang terganggu dipisahkan dari jaringan.

2.4.4 Penyetelan Arus Setelan Rele Arus Lebih (OCR) Jenis *Inverse*

- Arus Setelan (*Setting*) Primer Rele Arus Lebih Jenis *inverse*

Rele jenis *inverse* biasa diset sebesar 1,05 s/d 1,1 x I_n (Sarimun, W. 2012). maka besarnya arus setelan rele arus lebih jenis *inverse* pada bagian primer adalah sebesar:

$$I_P = 1,05 \times I_n \quad \text{Ampere} \quad (2.17)$$

Dimana :

I_P : Arus setelan (*setting*) pada bagian primer (Ampere)

I_n : Arus nominal peralatan (Ampere)

2. Arus Setelan (*Setting*) Sekunder Rele Arus Lebih Jenis *inverse*

Arus Setelan (*setting*) sekunder rele arus lebih jenis *inverse* pada bagian sekunder sebesar:

$$I_S = I_P \times \frac{1}{n_{CT}} \quad \text{Ampere} \quad (2.18)$$

Dimana:

I_S : Arus setelan (*setting*) pada bagian sekunder (Ampere)

n_{CT} : Perbandingan ratio trafo arus (CT)

2.4.5 Setelan *Time Multiple Setting* (TMS) Rele Arus Lebih (OCR) jenis *inverse*

Setelan (*setting*) waktu rele arus lebih (OCR) jenis *inverse* dihitung menggunakan rumus kurva waktu dengan arus adalah seperti persamaan berikut (Sarimun, W. 2012):

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{fault}}{I_S}\right)^{0,02} - 1} \times TMS \quad \text{Detik} \quad (2.19)$$

Dimana:

t : waktu kerja dari rele arus lebih jenis *inverse*

TMS : *Time Multiple Setting* (setelan waktu yang diinginkan)

I_S : Arus setelan rele arus lebih jenis *inverse* primer (Ampere)

I_{fault} : Arus gangguan (Ampere)

Maka nilai TMS pada Rele Arus Lebih (OCR) dapat dicari dengan menggunakan persamaan:

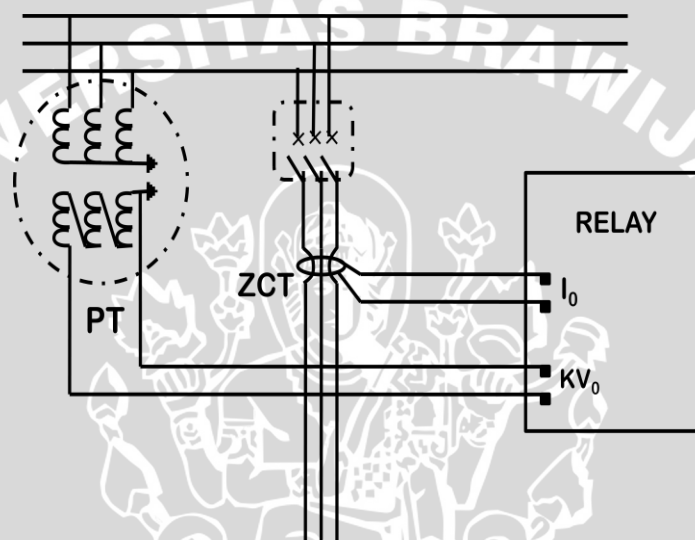
$$TMS = \frac{\left(\frac{I_{fault}}{I_S}\right)^{0,02} - 1}{0,14} \times t \quad (2.20)$$

Untuk menentukan nilai TMS yang akan disetkan pada rele arus lebih sisi *incoming* transformator tenaga yaitu arus hubung singkat $I_{f\ 3fasa}$ di bus 20 kV, sedangkan untuk sisi 150 kV diambil arus hubung singkat $I_{f\ 3fasa}$ disisi 150 kV.

2.5 Rele Arus Gangguan Tanah (GFR)

2.5.1 Pengertian GFR

Rele arus lebih tanpa arah atau GFR adalah rele yang bekerja apabila dilalui arus yang melebihi settinganya (dari ZCT). Arus lebih yang dideteksi rele ini berasal dari gangguan fasa – tanah.



Gambar 2.15 rangkaian pengawatan rele GFR

Sumber : B, Ravindranath, 1976:76

Rele Arus Gangguan Tanah yang lebih dikenal dengan GFR (Ground Fault Rele) pada dasarnya mempunyai prinsip kerja sama dengan rele arus lebih (OCR) namun memiliki perbedaan dalam kegunaannya. Bila rele OCR mendeteksi adanya hubung singkat antara fasa, maka GFR mendeteksi adanya hubung singkat ke tanah. Diatas ini merupakan gambar rangkaian pengawatan GFR.

2.5.2 Prinsip Kerja GFR

Pada kondisi normal beban seimbang I_r , I_s , I_t sama besar, sehingga pada kawat netral tidak timbul arus dan rele arus gangguan tanah tidak dialiri

arus. Bila terjadi ketidak seimbangan arus atau terjadi gangguan hubung singkat ke tanah, maka akan timbul arus urutan nol pada kawat netral, sehingga rele arus gangguan tanah akan bekerja.

2.5.3 Penyetelan Arus Setelan Rele Arus gangguan Tanah (GFR) Jenis *inverse*

1. Arus Setelan (*Setting*) Primer Rele Arus Gangguan Tanah Jenis *inverse*

Besarnya arus setelan (*setting*) Rele Arus Gangguan Tanah (GFR) pada bagian primer sebesar (Sarimun, W. 2012):

$$I_S = 10\% \times I_n \quad \text{Ampere} \quad (2.21)$$

Dimana:

I_S : Arus setelan (*setting*) pada bagian primer (Ampere)

I_n : Arus nominal peralatan (Ampere)

10% : Toleransi ketidakseimbangan beban / Forum transmisi PLN

2. Arus Setelan (*Setting*) Sekunder Rele Arus Gangguan Tanah Jenis *inverse*

Arus setelan Rele Arus Gangguan Tanah (GFR) pada bagian sekunder sebesar:

$$I_P = I_S \times \frac{1}{n_{CT}} \quad \text{Ampere} \quad (2.22)$$

Dimana:

I_P : Arus setelan (*setting*) pada bagian sekunder (Ampere)

n_{CT} : Perbandingan ratio trafo arus

2.5.4 Setelan *Time Multiple Setting* (TMS) Rele Arus Gangguan Tanah (GFR) jenis *inverse*

Setelan (*setting*) waktu Rele Arus Gangguan Tanah (GFR) jenis *inverse* dihitung menggunakan rumus kurva waktu dengan arus adalah seperti persamaan sebagai berikut ini (Sarimun, W. 2012):

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{fault}}{I_S}\right)^{0,02} - 1} \times TMS \quad \text{Detik} \quad (2.23)$$

Dimana:

t : waktu kerja dari rele arus gangguan tanah (detik)

TMS : *Time Multiple Setting* (setelan waktu yang diinginkan)

I_s : Arus setelan rele arus gangguan tanah primer (Ampere)

I_{fault} : Arus gangguan (Ampere)

Maka nilai TMS pada Rele Arus Gangguan Tanah (GFR) dapat dicari dengan menggunakan persamaan:

$$\text{TMS} = \frac{\left(\frac{I_{\text{fault}}}{I_s}\right)^{0,02} - 1}{0,14} \times t \quad (2.24)$$

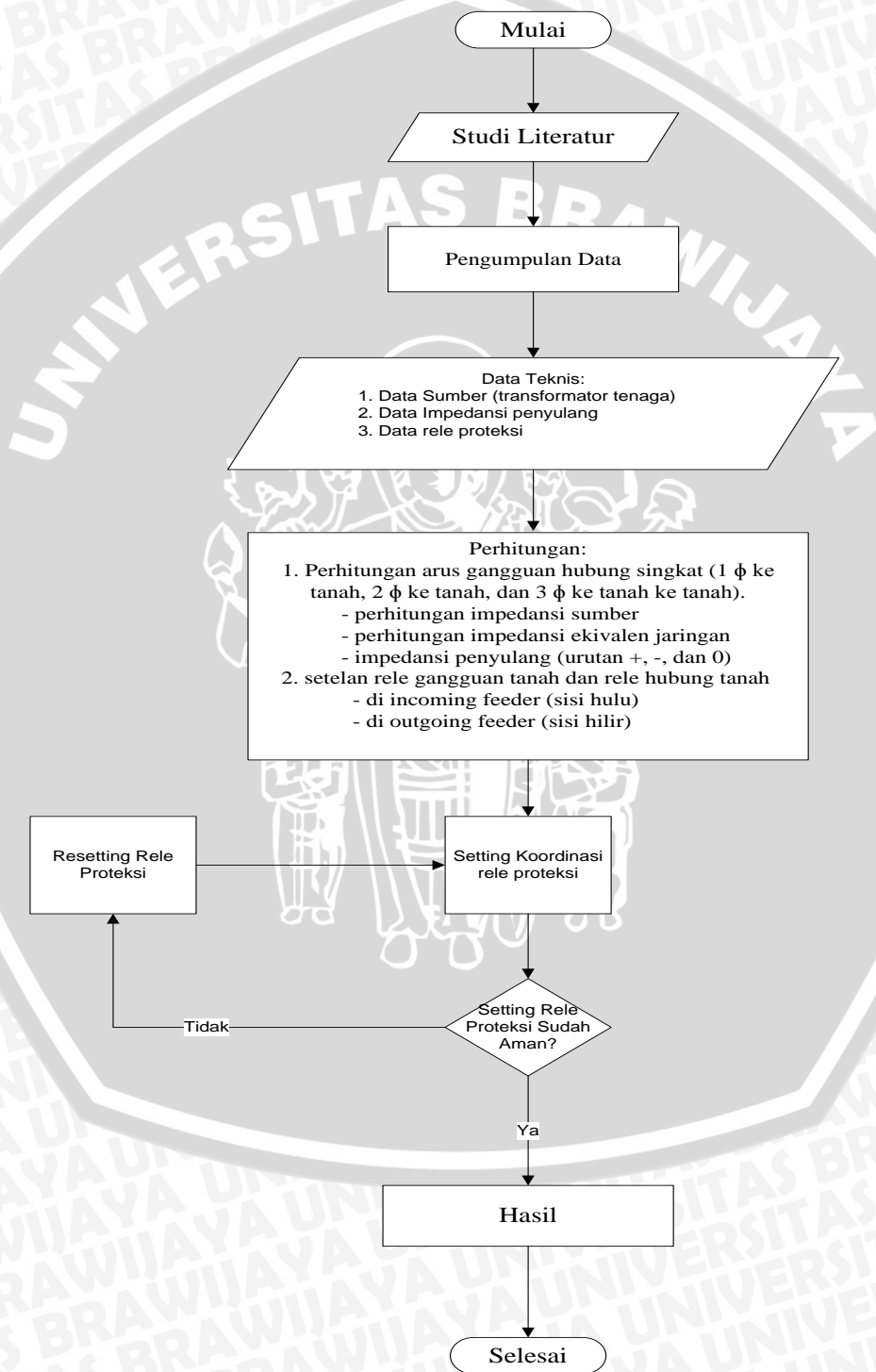
Selisih waktu kerja dari rele OCR dan GFR disisi masuk (*incoming*) 20 kV lebih lama 0,4 – 0,5 detik dari waktu kerja rele disisi penyulang disebut *Grading Time*, yang maksudnya agar rele disisi penyulang bekerja lebih dulu.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Penyusunan skripsi ini didasarkan pada masalah yang bersifat aplikatif, yaitu koordinasi sistem pengaman penyulang 20 kV transformator daya, Langkah-langkah yang perlu dilakukan ditunjukkan dalam diagram alir sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram Alir Metode Penelitian

3.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mempelajari buku-buku literatur maupun, dari situs internet yang terkait dengan sistem tenaga listrik, perhitungan arus hubung singkat, pengaturan rele arus lebih dan rele arus gangguan tanah serta segala hal yang menunjang dalam penyusunan skripsi ini. Besar perhitungan arus hubung singkat tiga fasa, satu fasa ke tanah, antar fasa, dan dua fasa ke tanah berpengaruh terhadap setelan rele arus lebih dan rele arus gangguan tanah.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Survai dilakukan dengan tujuan melihat obyek yang dijadikan penelitian. Penelitian ini dilakukan di PT. PLN (Persero) P3B Jawa dan Bali APP (Area Pelaksana Pemeliharaan) Surabaya Gardu Induk Waru. Waktu penelitian bulan April 2014.

3.3 Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan untuk memperoleh data-data yang diperlukan dalam penyelesaian penelitian. Data-data yang dikumpulkan berupa data primer dan data sekunder.

3.3.1 Data sekunder

Data sekunder adalah data yang bersumber dari buku referensi, jurnal, skripsi, thesis, disertasi, *web browsing* dan forum-forum resmi yang menunjang dalam penyusunan penelitian. Data sekunder yang dibutuhkan antara lain:

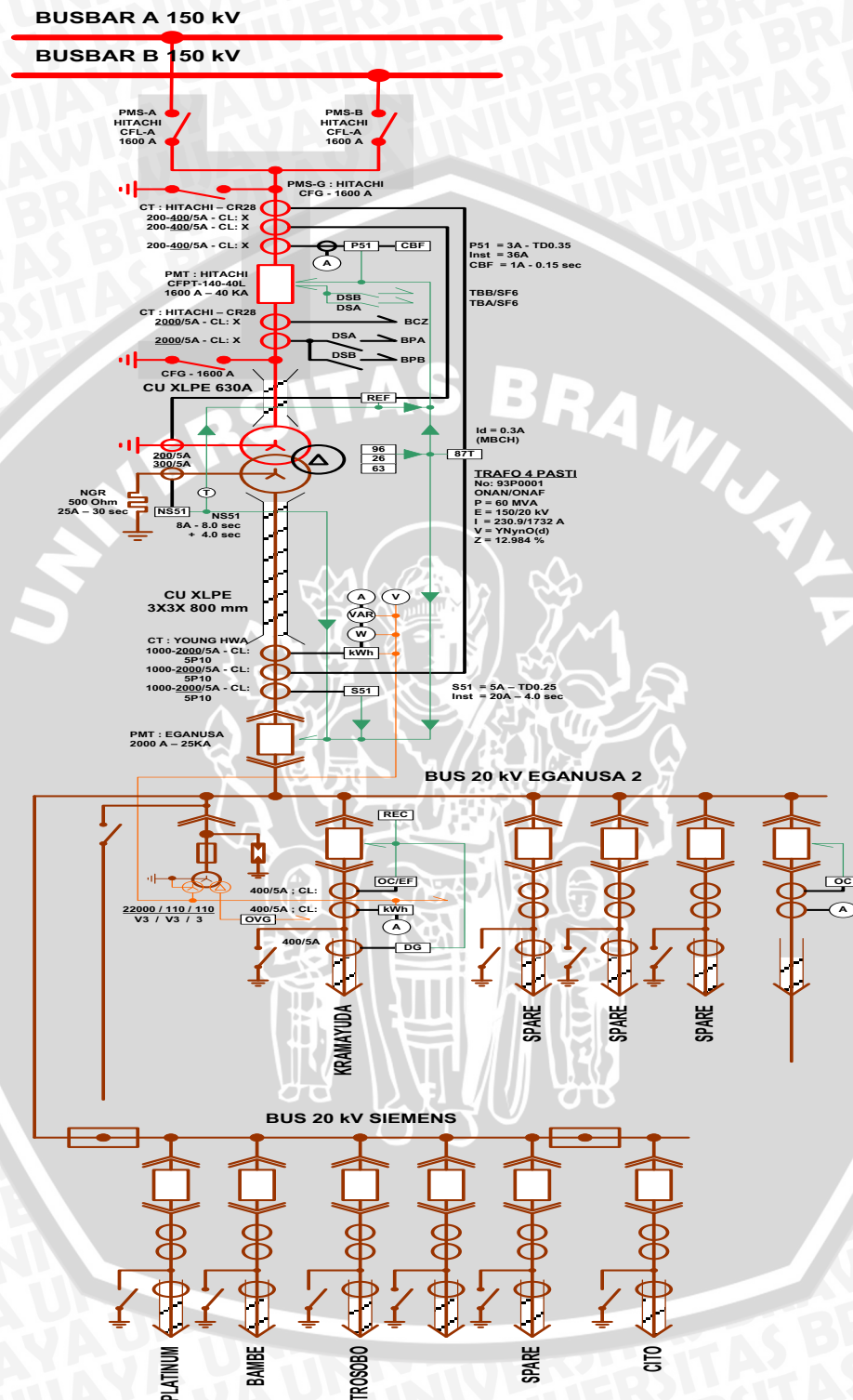
1. Diagram satu garis Gardu Induk Waru.
2. Data Transformator PASTI 150/20 kV 60 MVA di Gardu Induk Waru.
3. Data Rele Arus Lebih dan Rele Arus Gangguan Tanah pengaman penyulang Transformator PASTI 150/20 kV 60 MVA di Gardu Induk Waru.
4. Data spesifikasi kabel penyulang 20 kV Transformator PASTI 150/20 kV 60 MVA di Gardu Induk Waru.

3.4 Teknik Analisis Data

Pengambilan data dilakukan di Gardu Induk Waru, adapun data yang diperlukan untuk analisis berupa:

1. *Single line* diagram Gardu Induk Waru yang diteliti.

Single line diagram Transformator Daya IV di GI Waru terlihat pada Gambar 3.2



Gambar 3.2 *Single line* diagram transformator daya IV Gardu Induk Waru

Sumber: Gardu Induk Waru

2. Data Transformator Tenaga, Data Rele Arus Lebih Sisi *incoming* 20 kV, Data Rele Arus Lebih sisi penyulang 20 kV, Panjang jenis penghantar penyulang Transformator IV di Gardu Induk Waru.

a. Data Transformator Tenaga

- Merk : PASTI
- Tipe : ONAN/ONAF
- Daya : 60 MVA
- Tegangan : 150/20 kV
- Impedansi (Z%) : 12,984 %
- Teg Primer : 150 kV
- Teg Sekunder : 20 kV
- Ratio CT Trafo : 2000/5 A
- Arus Nominal Trafo : 1732
- Hub. Belitan Trafo : YNynO(d)
- Ground Resistor : 16 ohm

b. Data Rele Arus Lebih Sisi *incoming* 20 kV

- Merk : GE
- Tipe : MIFIIP100E20HICCO
- No Seri : 91156916
- Karakteristik : Normal Inverse
- I Nominal : 5 A
- Tms : 0,225
- Ratio CT : 2000/5

Data Rele Arus Gangguan Tanah Sisi *incoming* 20 kV

- Merk : GE
- Tipe : MIFIIP100E20HICCO
- No Seri : 91156916
- Karakteristik : Normal Inverse
- I Nominal : 5 A
- Tms : 0,125
- Ratio CT : 2000/5

c. Data Rele Arus Lebih sisi penyulang 20 kV

Data OCR Sisi Penyulang 20 Kv (Platinum)

Merk : VAMP
Tipe : 40
Karakteristik : Normal Inverse
I Nominal : 5 A
Tms : 0,16
Ratio CT : 300/5 A

Data GFR Sisi Penyulang 20 Kv (Platinum)

Merk : VAMP
Tipe : 40
Karakteristik : Normal Inverse
I Nominal : 5 A
Tms : 0,16
Ratio CT : 300/5 A

Data OCR Sisi Penyulang 20 Kv (Pagesangan)

Merk : GE MULTILIN
Tipe : 650
Karakteristik : Normal Inverse
I Nominal : 5 A
Tms : 0,16
Ratio CT : 300/5 A

Data GFR Sisi Penyulang 20 Kv (Pagesangan)

Merk : GE MULTILIN
Tipe : 650
Karakteristik : Normal Inverse
I Nominal : 5 A
Tms : 0,16
Ratio CT : 300/5 A

d. Data jenis penghantar di Gardu Induk Waru

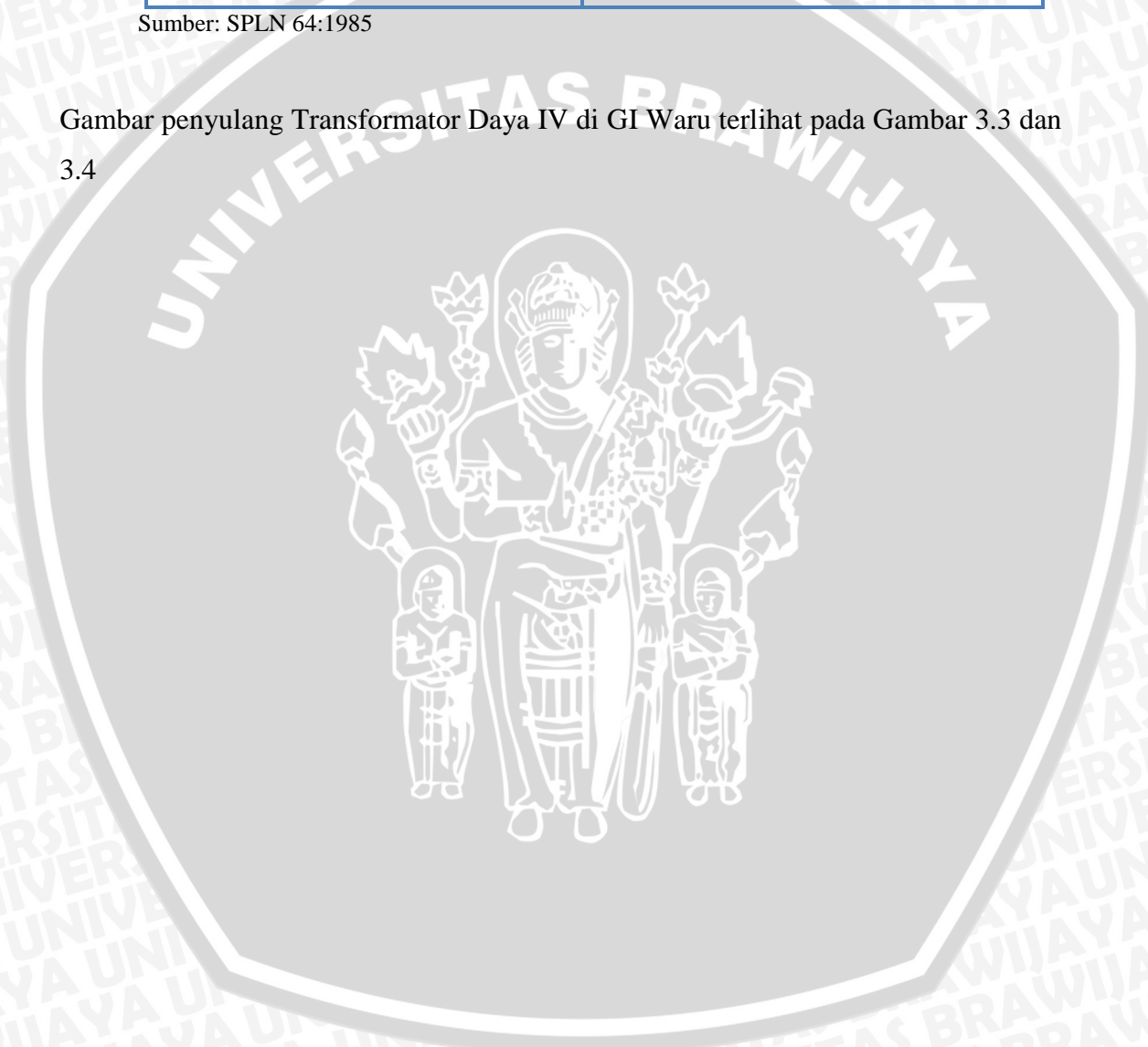
Tabel 3.1 Panjang jenis penghantar di gardu Induk Waru

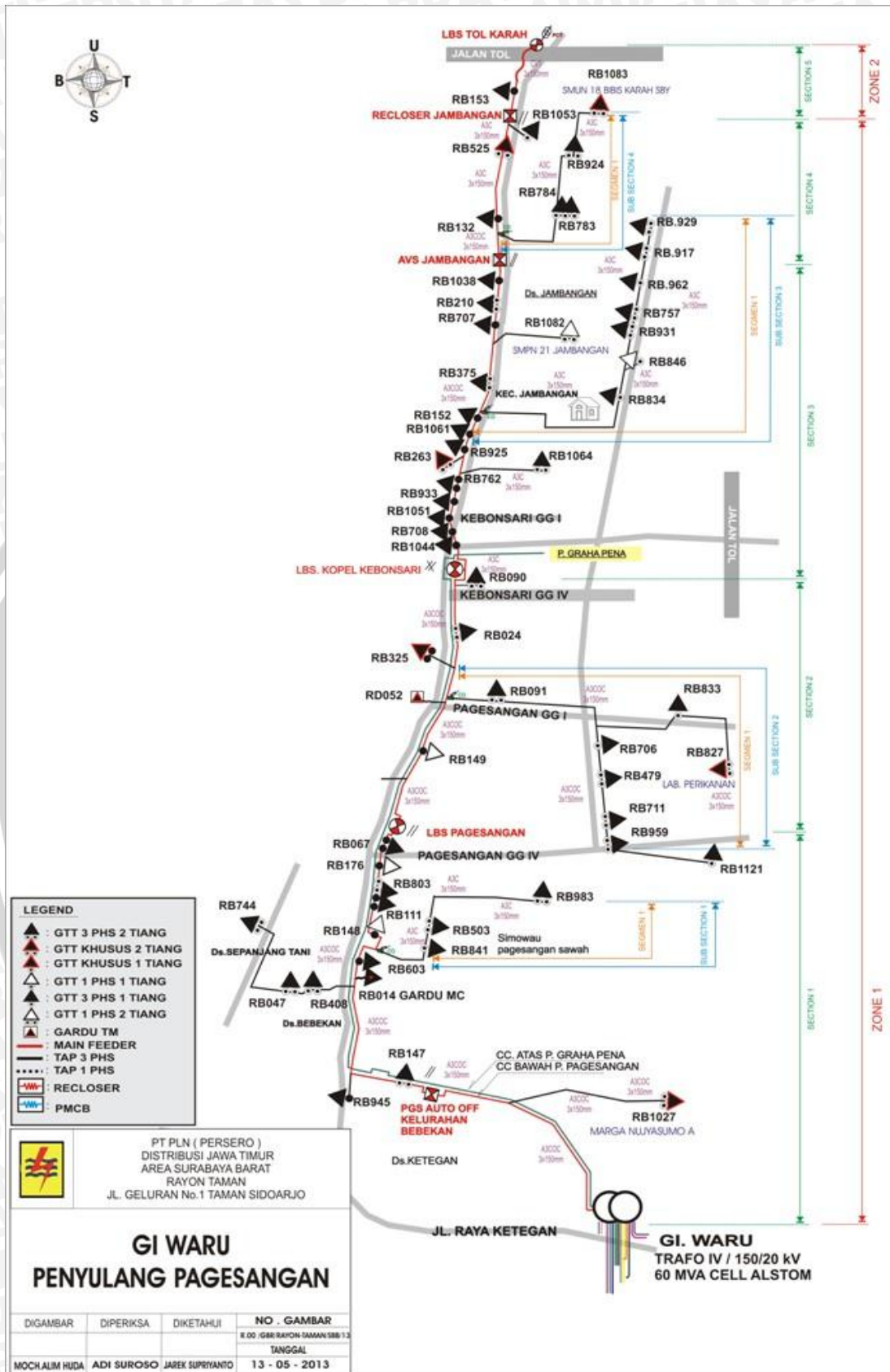
Jenis Penghantar Kawat/Kabel	Kawat AAAC
Ukuran (mm²)	240 mm ²
Panjang (km)	Penyulang pagesangan : 10,45 km Penyulang platinum : 4,17 km
Impedansi urutan positif (Z_1)	0,1344 + j 0,3158 Ω /km
Impedansi urutan nol (Z_0)	0,2824 + j 1,6033 Ω /km

Sumber: SPLN 64:1985

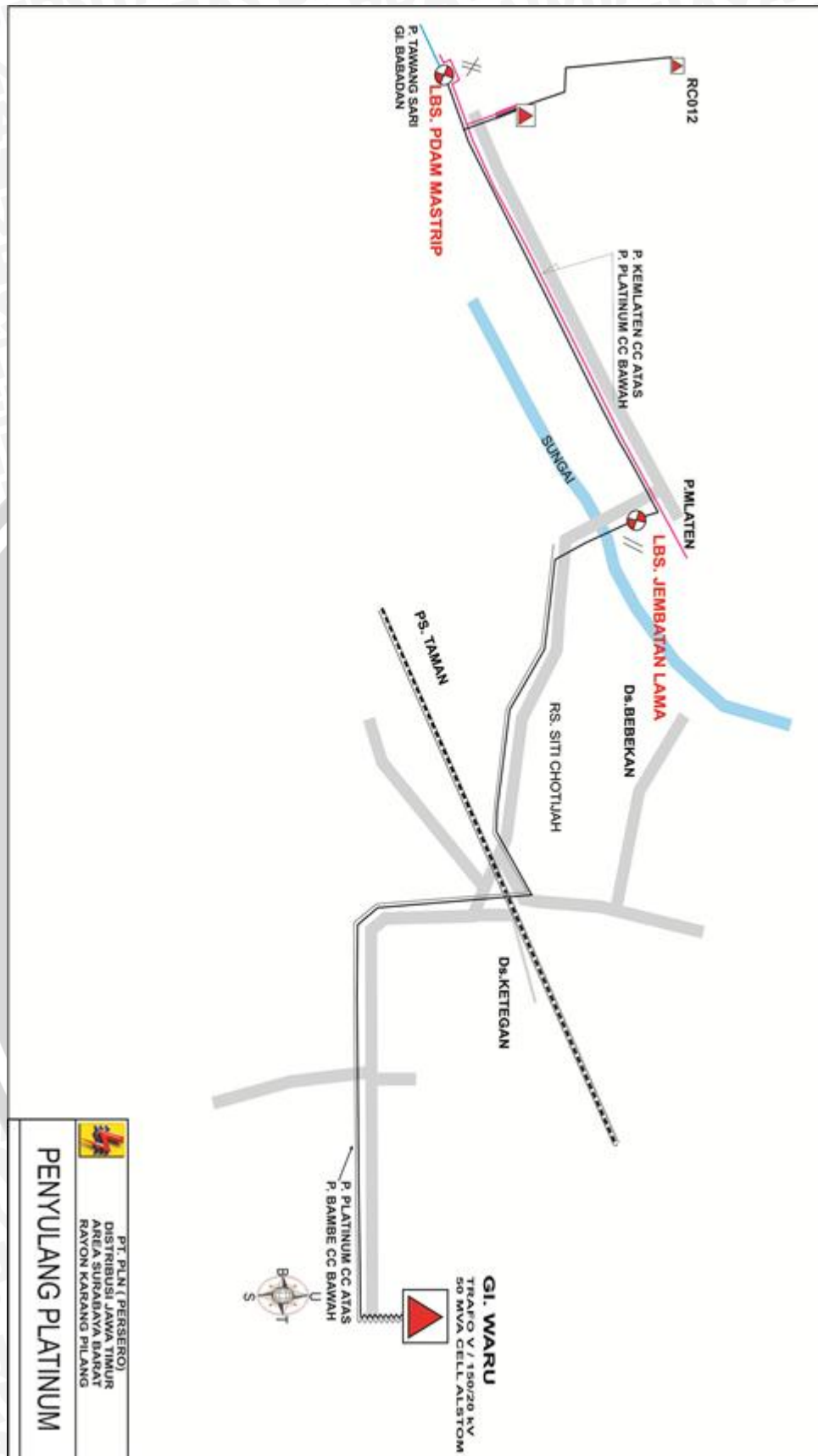
Gambar penyulang Transformator Daya IV di GI Waru terlihat pada Gambar 3.3 dan

3.4





Gambar 3.3 Penyulang Pagesangan Transformator Daya IV Gardu Induk Waru
Sumber: PT. PLN (Persero) Distribusi Jawa Timur Area Surabaya Barat



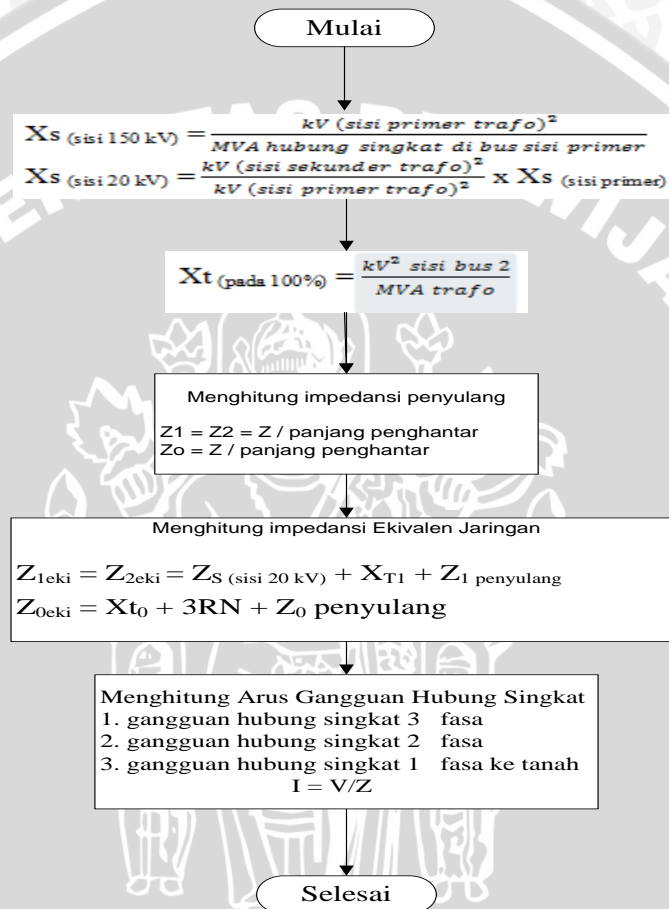
Gambar 3.4 Penyulang Platinum Transformator Daya IV Gardu Induk Waru
Sumber: PT. PLN (Persero) Distribusi Jawa Timur Area Surabaya Barat

3. Prosedur perhitungan

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

- a. Menghitung impedansi transformator, reaktansi transformator, impedansi penyulang, impedansi ekivalen jaringan.

Tahap perhitungan impedansi masing-masing komponen ditunjukkan oleh diagram alir pada gambar 3.5



Gambar 3.5 Tahap Perhitungan Impedansi

- b. Menganalisis impedansi urutan berdasarkan diagram satu garis penyulang transformator daya IV Gardu Induk Waru. Impedansi urutan yang dianalisis adalah impedansi urutan positif, impedansi urutan negatif, dan impedansi urutan nol.

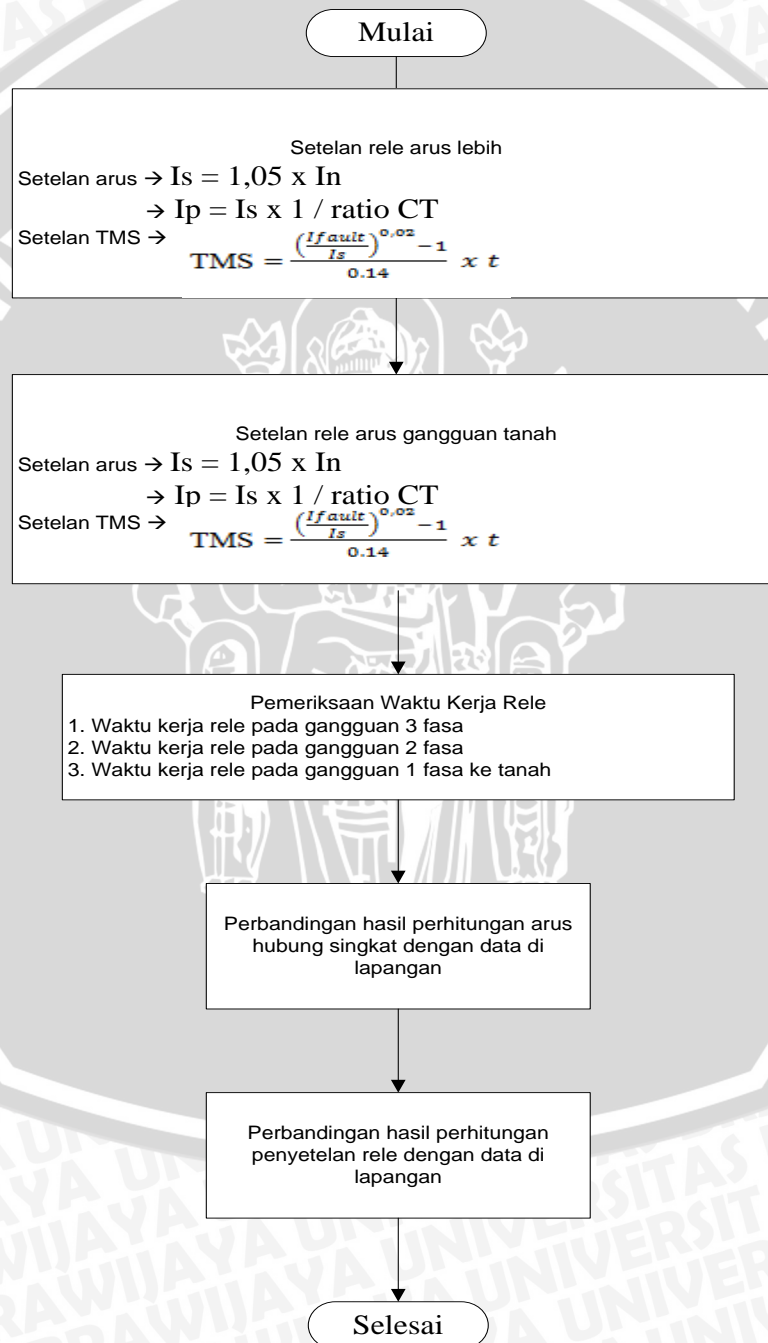
- c. Menganalisis arus gangguan hubung singkat.

Dengan menggunakan persamaan 2.14, 2.15, dan 2.16 maka dapat dihitung arus gangguan hubung singkat tiga fasa, dua fasa, dan satu fasa ke tanah.

d. Menghitung *setting* rele arus lebih dan rele arus gangguan tanah

Setting rele arus lebih dan rele arus gangguan tanah yang dianalisis adalah *setting* arus dan *setting* waktu. *Setting* arus didapat dengan menghitung besaran arus terbesar yang terjadi pada saat gangguan hubung singkat. Dan untuk *setting* waktunya berdasarkan karakteristik waktu kerja rele arus lebih dan rele arus gangguan tanah tiap-tiap penyulang.

Diagram alir penyetulan rele ditunjukkan oleh gambar 3.6



Gambar 3.6 Diagram Alir Penyetulan Rele

3.5 Kesimpulan dan Saran

Pada tahap ini dilakukan pengambilan kesimpulan berdasarkan teori, hasil perhitungan serta analisis. Sebagai akhir dari penelitian yang dilakukan dapat ditarik kesimpulan dari semua proses analisis yang telah dilakukan, dan pemberian saran kepada pembaca yang akan melakukan studi terkait dengan penelitian ini.



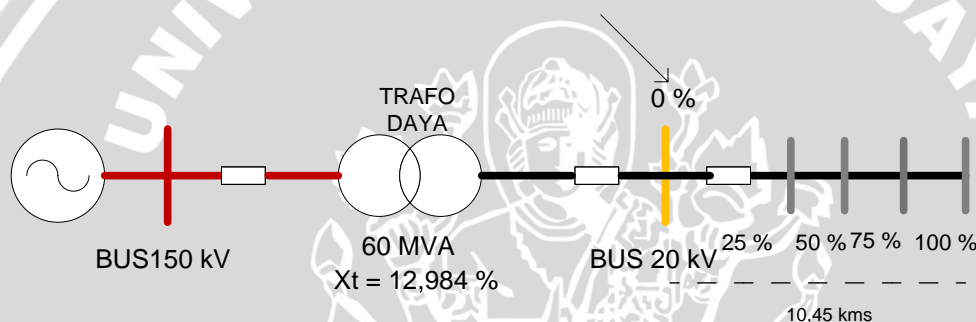
BAB IV PERHITUNGAN DAN ANALISIS

4.1 Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat yang mungkin terjadi di dalam jaringan (sistem kelistrikan) ada 3, yaitu:

1. Gangguan hubung singkat 3 fasa
2. Gangguan hubung singkat 2 fasa
3. Gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah

Perhitungan gangguan hubung singkat ini dihitung berdasarkan panjang penyulang, yaitu diasumsikan terjadi di 25%, 50%, 75%, dan 100% panjang penyulang (lihat gambar 4.1)



Gambar 4.1 Penyulang Transformator Daya IV GI Waru dengan berbagai titik gangguan

Sumber : penulis

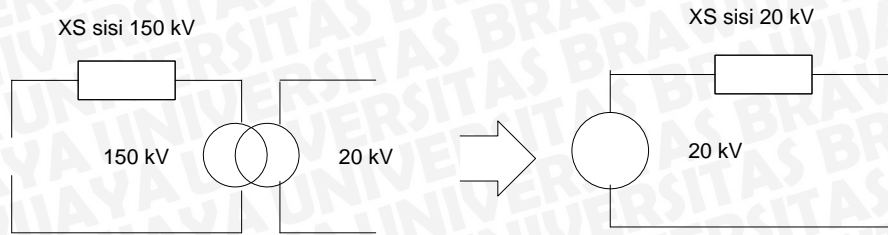
4.2 Menghitung Impedansi Sumber

Impedansi sumber dapat dihitung dengan memasukkan data dari data Transformator Tenaga IV Gardu Induk Waru, yaitu tegangan sisi primer trafo tenaga 150 kV dan daata hubung singkat di bus primer (150 kV) di Gardu Induk Waru adalah sebesar 461,5 MVA kedalam persamaan (2.6).

Maka impedansi dasar (X_s) adalah:

$$X_S = \frac{kV^2}{MVA} = \frac{150^2}{461,5} = 48,7541 \Omega$$

Untuk mengetahui nilai impedansi di sisi sekunder (yaitu di bus 20 kV) harus dikonversi dulu ke sisi sekunder, menggunakan persamaan (2.7) seperti yang ditunjukkan pada subbab 2.3.3.1 bagian a. menghitung impedansi sumber, gambar (2.4).



Maka impedansi disisi 20 kV adalah:

$$\begin{aligned} X_S (\text{sisi } 20 \text{ kV}) &= \frac{20^2}{150^2} \times X_S (\text{sisi } 150 \text{ kV}) \\ &= \frac{20^2}{150^2} \times 48,7541 \\ &= 0,8667 \Omega \end{aligned}$$

4.3 Menghitung Reaktansi Transformator

Besarnya reaktansi trafo tenaga IV di gardu Induk Waru adalah 12,984 %, agar dapat mengetahui besarnya reaktansi urutan positif, reaktansi urutan negatif dan reaktansi urutan nol dalam ohm, maka perlu dihitung dulu besar ohm pada 100 % nya. Yaitu kedalam persamaan rumus (2.8).

Besar nilai ohm pada 100 % yaitu:

$$Z_B = \frac{kV^2}{MVA} = \frac{20^2}{60} = 6,6667 \Omega$$

Nilai reaktansi trafo tenaga:

1. Reaktansi urutan positif dan negatif ($X_{t1} = X_{t2}$)

$$X_{t1} = \text{reaktansi trafo (\%)} \times Z_B$$

$$X_{t1} = 12,984\% \times 6,6667 = 0,8656 \Omega$$

$$X_{t1} = X_{t2} = 0,8656 \Omega$$

2. Reaktansi urutan nol (X_{t0})

Trafo daya yang mensuplai penyulang Gardu Induk Waru mempunyai hubungan YNynO(d) yang mempunyai belitan delta di dalamnya, maka besarnya $X_{t0} = 3 \times X_{t1} = 3 \times 0,8656 = 2,5968$

Hasil perhitungan impedansi sumber, reaktansi urutan positif, reaktansi urutan negatif, dan reaktansi urutan nol ditunjukkan pada Tabel 4.1 berikut:

Tabel 4.1 Hasil perhitungan impedansi sumber, reaktansi urutan positif, reaktansi urutan negatif, dan reaktansi urutan nol sistem 20 kV penyulang Bambe

No.	Impedansi Sumber (X_s sisi 20 kV)	Reaktansi urutan positif (X_{t1})	Reaktansi urutan negatif (X_{t2})	Reaktansi urutan nol (X_{t0})
1	0,8667 ohm	0,8656 ohm	0,8656 ohm	2,5968 ohm

Sumber : Hasil perhitungan

4.4 Menghitung Impedansi Penyulang

Nilai impedansi penyulang untuk mengetahui besar impedansi penyulang pada suatu titik gangguan tertentu dapat disimulasikan pada lokasi gangguan 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% dari panjang penyulang. Dengan memasukkan data dari Tabel 3.1 kedalam persamaan (2.10) dan (2.11) didapat besar nilai impedansi penyulang sebagai berikut:

- a. Panjang penyulang Pagesangan = 10,45 km

$$Z_1 = Z_2 = (0,1344 + j 0,3158) \Omega/\text{km} \times 10,45 \text{ km} = 1,4045 + j 3,3001 \Omega$$

$$Z_0 = (0,2824 + j 1,6033) \Omega/\text{km} \times 10,45 \text{ km} = 2,9511 + j 16,7545 \Omega$$

- b. Panjang penyulang Platinum = 4,17 km

$$Z_1 = Z_2 = (0,1344 + j 0,3158) \Omega/\text{km} \times 4,17 \text{ km} = 0,5605 + j 1,3169 \Omega$$

$$Z_0 = (0,2824 + j 1,6033) \Omega/\text{km} \times 4,17 \text{ km} = 1,1776 + j 6,6858 \Omega$$

Besar nilai impedansi urutan positif (Z_1), urutan negatif (Z_2), dan urutan nol (Z_0) penyulang untuk setiap titik gangguannya adalah sebagai berikut:

1. Untuk urutan positif dan negatif

Tabel 4.2 Impedansi penyulang urutan positif dan negatif

% Panjang	Impedansi penyulang Pagesangan (Z_1 dan Z_2)
0%	$0 \% \times (1,4045 + j 3,3001) = 0 \Omega$
25%	$25 \% \times (1,4045 + j 3,3001) = 0,3511 + j 0,8250 \Omega$
50%	$50 \% \times (1,4045 + j 3,3001) = 0,7022 + j 1,6501 \Omega$
75%	$75 \% \times (1,4045 + j 3,3001) = 1,0534 + j 2,4751 \Omega$
100%	$100 \% \times (1,4045 + j 3,3001) = 1,4045 + j 3,3001 \Omega$

% Panjang	Impedansi penyulang Platinum (Z_1 dan Z_2)
0%	$0 \% \times (0,5605 + j 1.3169) = 0 \Omega$
25%	$25 \% \times (0,5605 + j 1.3169) = 0,1401 + j 0,3292 \Omega$
50%	$50 \% \times (0,5605 + j 1.3169) = 0,2802 + j 0,6584 \Omega$
75%	$75 \% \times (0,5605 + j 1.3169) = 0,4203 + j 0,9877 \Omega$
100%	$100 \% \times (0,5605 + j 1.3169) = 0,5604 + j 1.3169 \Omega$

Sumber : Hasil perhitungan

2. Untuk urutan nol

Tabel 4.3 Impedansi penyulang urutan nol

% Panjang	Impedansi penyulang Pagesangan (Z_0)
0%	$0 \% \times (2,9511 + j 16,7545) = 0 \Omega$
25%	$25 \% \times (2,9511 + j 16,7545) = 0,7378 + j 4,1886 \Omega$
50%	$50 \% \times (2,9511 + j 16,7545) = 1,4755 + j 8,3772 \Omega$
75%	$75 \% \times (2,9511 + j 16,7545) = 2,2133 + j 12,5659 \Omega$
100%	$100 \% \times (2,9511 + j 16,7545) = 2,9511 + j 16,7545 \Omega$

% Panjang	Impedansi penyulang Platinum (Z_0)
0%	$0 \% \times (1,1776 + j 6,6858) = 0 \Omega$
25%	$25 \% \times (1,1776 + j 6,6858) = 0,2944 + j 1,6714 \Omega$
50%	$50 \% \times (1,1776 + j 6,6858) = 0,5888 + j 3,3429 \Omega$
75%	$75 \% \times (1,1776 + j 6,6858) = 0,8832 + j 5,0143 \Omega$
100%	$100 \% \times (1,1776 + j 6,6858) = 1,1776 + j 6,6858 \Omega$

Sumber : Hasil perhitungan

4.5 Menghitung Impedansi Ekuivalen Urutan Positif, Urutan negatif, dan Urutan Nol

Dengan memanfaatkan hasil impedansi penyulang pada Tabel 4.1, 4.2, dan 4.3 kedalam persamaan (2.12) dan (2.13), didapat hasil impedansi ekuivalen (Z_{1eki} , Z_{2eki} , dan Z_{0eki}) pada beberapa lokasi gangguan hubung singkat di penyulang Gardu Induk Waru.

Perhitungan besarnya nilai impedansi ekuivalen urutan positif (Z_{1eki}), urutan negatif (Z_{2eki}):

$$Z_{1eki} = Z_{2eki} = X_{S(sisi\ 20\ kV)} + X_{t1} + Z_1 \text{ penyulang}$$

$$Z_{1eki\ 0\%} = j0,8667 + j0,8656 + 0$$

$$= j1,7323$$

Perhitungan besarnya nilai impedansi ekivalen urutan nol (Z_{0eki}):

$$\begin{aligned} Z_{0eki} &= X_{t0} + 3RN + Z_0 \text{ penyulang} \\ &= j2,5968 + (3 \times 12) + 0 \\ &= 36 + j 2,5968 \end{aligned}$$

Dengan cara yang sama untuk perhitungan impedansi ekivalen (Z_{1eki} , Z_{2eki} , dan Z_{0eki}) dapat dilihat pada Tabel 4.4 berikut ini:

Tabel 4.4 Hasil perhitungan impedansi ekivalen (Z_{1eki} , Z_{2eki} , dan Z_{0eki}) menurut lokasi terjadinya gangguan

No.	Lokasi (% panjang) Bus 20 kV GI Waru Penyulang Pagesangan	Impedansi ekivalen		
		Z_{1eki}	Z_{2eki}	Z_{0eki}
1	0%	$0 + j 1,7323$	$0 + j 1,7323$	$36 + j 2,5968$
2	25%	$0,3511 + j 2,5573$	$0,3511 + j 2,5573$	$36, 7378 + j 6,7854$
3	50%	$0,7023 + j 3,3824$	$0,7023 + j 3,3824$	$37, 4755 + j 10,9740$
4	75%	$1,0534 + j 4,2074$	$1,0534 + j 4,2074$	$38,2133 + j 15,1627$
5	100%	$1,4045 + j 5,0324$	$1,4045 + j 5,0324$	$38,9511 + j 19,3513$

No.	Lokasi (% panjang) Bus 20 kV GI Waru Penyulang Platinum	Impedansi ekivalen		
		Z_{1eki}	Z_{2eki}	Z_{0eki}
1	0%	$0 + j 1,7323$	$0 + j 1,7323$	$36 + j 2,5968$
2	25%	$0,1401 + j 2,0615$	$0,1401 + j 2,0615$	$36,2944 + j 4,2682$
3	50%	$0,2802 + j 2,3907$	$0,2802 + j 2,3908$	$36,5888 + j 5,9397$
4	75%	$0,4204 + j 2,72$	$0,4204 + j 2,72$	$36,8832 + j 7,6111$
5	100%	$0,5604 + j 3,0492$	$0,5604 + j 3,0492$	$37,1776 + j 9,2826$

Sumber : Hasil perhitungan

4.6 Menghitung Arus Gangguan Hubung Singkat Pada Penyulang Transformator Daya IV Gardu Induk Waru

Setelah mendapatkan nilai dari impedansi ekivalen sesuai lokasi gangguan, selanjutnya perhitungan arus gangguan hubung singkat dapat dihitung. Hanya saja impedansi ekivalen yang dimaksud adalah yang tergantung dari jenis gangguan hubung singkatnya, dimana gangguan hubung singkat tersebut bias gngguan hubung singkat 3 fasa, 2 fasa, dan 1 fasa ke tanah menggunakan persamaan (2.14), (2.15) dan (2.16) adalah sebagai berikut:

4.6.1 Arus Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa

Perhitungan arus gangguan hubung singkat tiga fasa dengan menggunakan Tabel 4.4, kedalam persamaan (2.14) sehingga didapat hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat tiga fasa.

Sehingga arus gangguan hubung singkat 3 fasa dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 I_{3\text{fasa}} &= \frac{V}{Z_{1\text{eki}}} = \frac{\frac{20.000}{\sqrt{3}}}{Z_{1\text{eki}}} \\
 &= \frac{\frac{20.000}{\sqrt{3}}}{0 + j 1,7323} \\
 &= \frac{\frac{20.000}{\sqrt{3}}}{\sqrt{0^2 + 1,7323^2}} \\
 &= 6665,7007 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Dengan cara yang sama maka untuk perhitungan arus gangguan hubung singkat tiga fasa pada titik lokasi gangguan penyulang 20 kV Transformator Daya IV Gardu Induk Waru yang lain seperti ditunjukkan pada Tabel 4.5 berikut ini:

Tabel 4.5 Hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat 3 fasa

(% panjang) Penyulang Pagesangan	Arus gangguan hubung singkat 3 fasa
0 %	6665,7077 A
25 %	4473,348 A
50 %	3342,5583 A
75 %	2662,2781 A
100 %	2210,0728 A

(% panjang) Penyulang Platinum	Arus gangguan hubung singkat 3 fasa
0 %	6665,7077 A
25 %	5588,3735 A
50 %	4797,1321 A
75 %	4195,4075 A
100 %	3724,5171 A

Sumber : Hasil perhitungan

4.6.2 Arus Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa

Perhitungan arus gangguan hubung singkat dua fasa dengan menggunakan Tabel 4.4, kedalam persamaan (2.15) sehingga didapat hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat dua fasa.

Sehingga arus gangguan hubung singkat 2 fasa dapat dihitung sebagai berikut:

$$I_{2\text{fasa}} = \frac{V}{Z_{1\text{eki}} + Z_{2\text{eki}}}$$

Seperti halnya pada gangguan 3 fasa, gangguan hubung singkat 2 fasa juga dihitung untuk lokasi gangguan yang diasumsikan terjadi pada 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% panjang penyulang. Dalam hal ini karena nilai $Z_{1\text{eki}} = Z_{2\text{eki}}$, sehingga persamaan arus gangguan hubung singkat 2 fasa dapat disederhanakan menjadi:

$$\begin{aligned} I_{2\text{fasa}} &= \frac{V}{2 \times Z_{1\text{eq}}} \\ &= \frac{20.000}{2 \times (0 + j 1,7323)} \\ &= \frac{20.000}{\sqrt{0^2 + 3,4646^2}} \\ &= 5772,6722 \text{ A} \end{aligned}$$

Dengan cara yang sama maka untuk perhitungan arus gangguan hubung singkat dua fasa pada titik lokasi gangguan penyulang 20 kV Transformator Daya IV Gardu Induk Waru yang lain seperti ditunjukkan pada Tabel 4.6 berikut ini:

Tabel 4.6 hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat 2 fasa

(% panjang) Penyulang Pagesangan	Arus gangguan hubung singkat 2 fasa
0 %	5772,6722 A
25 %	3874,033 A
50 %	2894,7404 A
75 %	2305,6005 A
100 %	1913,9792 A

(% panjang) Penyulang Platinum	Arus gangguan hubung singkat 2 fasa
0 %	5772,6722 A
25 %	4839,6734 A
50 %	4154,4383 A
75 %	3633,3294 A
100 %	3225,5264 A

Sumber : Hasil perhitungan

4.6.3 Arus Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Perhitungan arus gangguan hubung singkat dua fasa dengan menggunakan Tabel 4.4, kedalam persamaan (2.16) sehingga didapat hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah.

Sehingga arus gangguan hubung singkat 3 fasa dapat dihitung sebagai berikut:

$$I_{1fasa} = \frac{3 \times V}{Z_{1eki} + Z_{2eki} + Z_{0eki}}$$

Seperti halnya pada gangguan 3 fasa dan 2 fasa, gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah juga dihitung untuk lokasi gangguan yang diasumsikan terjadi pada 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% panjang penyulang.

Karena $Z_{1eki} = Z_{2eki}$, maka:

$$\begin{aligned} I_{1fasa} &= \frac{3 \times V}{2 \times Z_{1eki} + Z_{0eki}} \\ &= \frac{3 \times \frac{20.000}{\sqrt{3}}}{2 \times (0 + j 1,7323) + (36 + j 2,5968)} \\ &= \frac{60.000}{\sqrt{3}} \\ &= 948,8942 \text{ A} \end{aligned}$$

Dengan cara yang sama maka untuk perhitungan arus gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah pada titik lokasi gangguan penyulang 20 kV Transformator Daya IV Gardu Induk Waru yang lain seperti ditunjukkan pada Tabel Tabel 4.7 berikut ini:

Tabel 4.7 hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah

(% panjang) Penyulang Pagesangan	Arus gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah
0 %	948,8942 A
25 %	881,7724 A
50 %	810,5884 A
75 %	741,6554 A
100 %	678,1658 A

(% panjang) Penyulang Platinum	Arus gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah
0 %	948,8942 A
25 %	923,1489 A
50 %	895,9201 A
75 %	867,8086 A
100 %	839,3433 A

Sumber : Hasil perhitungan

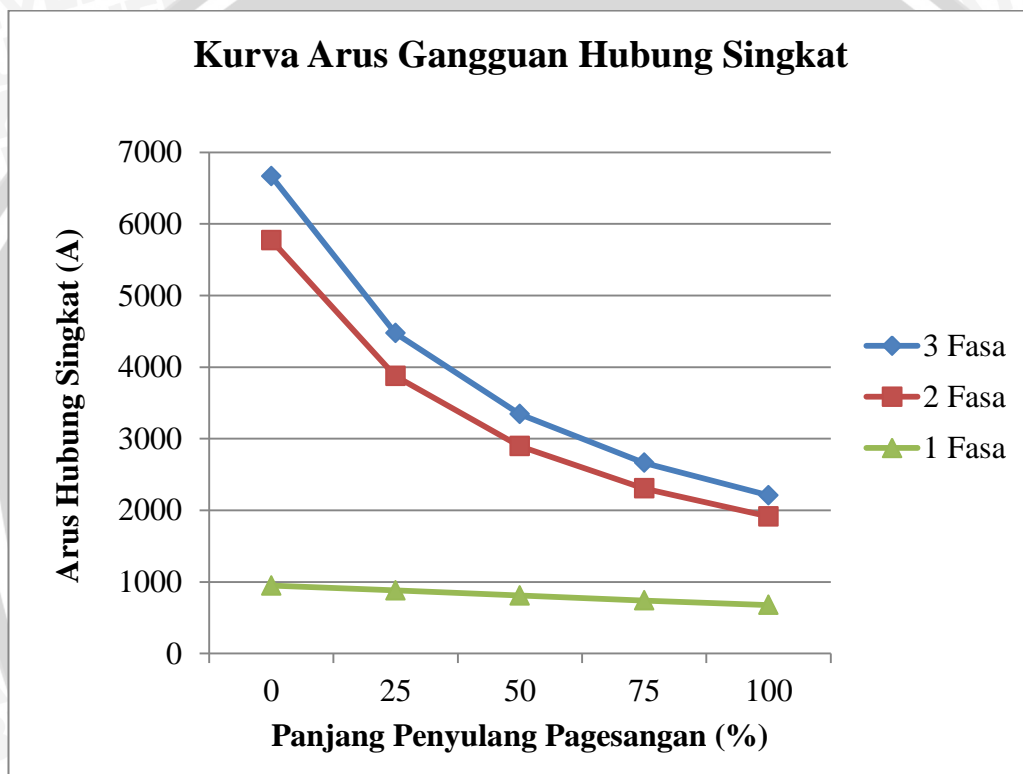
Dengan hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat 3 fasa, 2 fasa, dan 1 fasa ke tanah ini dapat digunakan untuk penyetelan rele arus lebih. Maka dapat dibuat suatu perbandingan besarnya arus gangguan terhadap lokasi titik gangguan dengan menggunakan tabel dibawah ini.

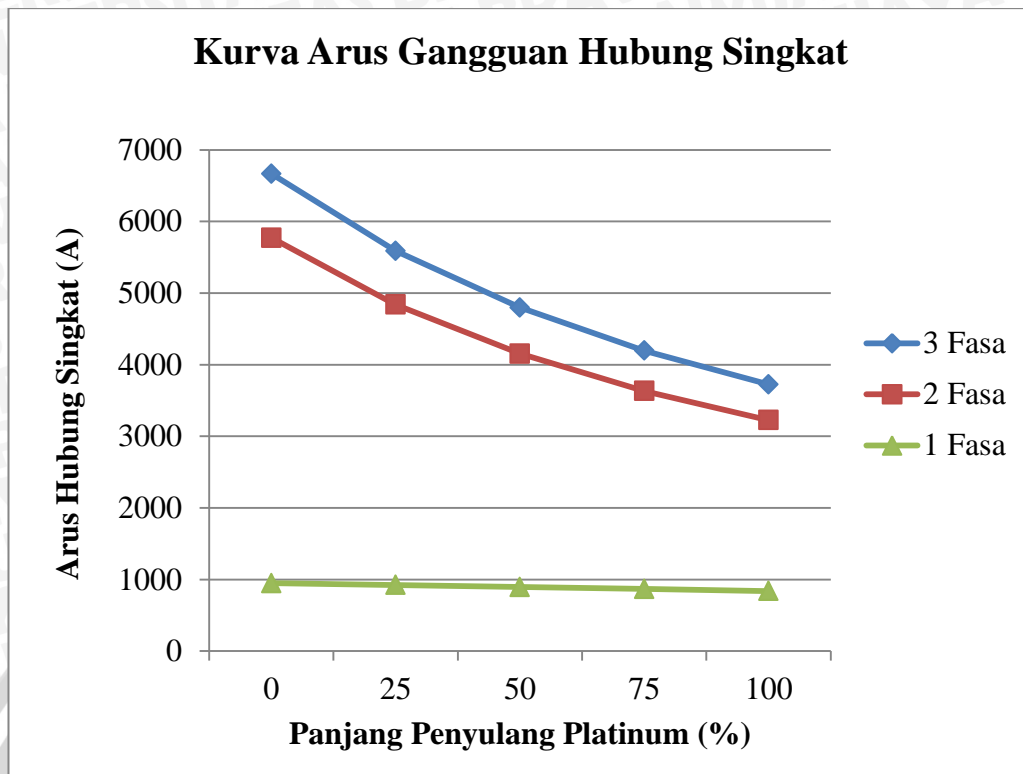
Tabel 4.8 Hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat

Panjang peyulang Pagesangan (%)	Jarak	Arus Hubung Singkat (A)		
		3 Fasa	2 Fasa	1 Fasa
0	0	6665,7077	5772,6722	948,8942
25	2,6125	4473,348	3874,033	881,7724
50	5,225	3342,5583	2894,7404	810,5884
75	7,8375	2662,2781	2305,6005	741,6554
100	10,45	2210,0728	1913,9792	678,1658

Panjang peyulang Platinum (%)	Jarak	Arus Hubung Singkat (A)		
		3 Fasa	2 Fasa	1 Fasa
0	0	6665,7077	5772,6722	948,8942
25	1,0425	5588,3735	4839,6734	923,1489
50	2,085	4796,9341	4154,2668	895,9201
75	3,1275	4195,4075	3633,3294	867,8086
100	4,17	3724,5171	3225,5264	839,3433

Sumber : Hasil perhitungan





Gambar 4.2 Kurva arus gangguan hubung singkat

Sumber : Hasil perhitungan

4.6.4 Analisa

Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa besarnya arus gangguan hubung singkat dipengaruhi oleh jarak titik gangguan, semakin jauh jarak titik gangguan maka semakin kecil arus gangguan hubung singkatnya dan sebaliknya. Selain itu dapat dilihat bahwa arus gangguan hubung singkat terbesar pada kedua penyulang transformator daya IV Gardu Induk Waru adalah arus gangguan hubung singkat 3 fasa, apabila ditinjau dari gangguan terhadap fasa.

4.7 Perhitungan Penyetelan (*Setting*) Rele Proteksi

Hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat, pada tahap selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai setelan rele arus lebih, terutama nilai TMS (*Time Multiple Setting*) dari rele arus lebih jenis *standart inverse (normaly inverse)*. Setelah nilai setelan rele didapat, maka nilai-nilai arus gangguan hubung singkat pada setiap lokasi gangguan yang diasumsikan dipakai untuk memeriksa waktu kerja rele arus lebih apakah masih dapat dinilai selektif atau didapatkan kerja selektifitas yang optimum (rele bekerja tidak terlalu lama tetapi menghasilkan selektifitas yang baik

4.7.1 Penyetelan (*Setting*) Rele Arus Lebih (*Over Current Relay*) Jenis *Inverse* di sisi Penyulang 20 kV Transformator Daya IV Gardu Induk Waru

Untuk setelan rele yang terpasang di penyulang dihitung berdasarkan arus beban maksimum. Untuk rele *inverse* biasanya diset sebesar 1,05 sampai dengan 1,1 x I_{\max} , sedangkan untuk rele *definite* diset sebesar 1,2 sampai dengan 1,3 x I_{\max} . persyaratan lain yang harus dipenuhi yaitu untuk penyetelan waktu minimum dari rele arus lebih (terutama di penyulang tidak lebih kecil dari 0,3 detik). Keputusan ini diambil agar rele tidak sampai trip lagi akibat adanya arus inrush dari trafo-trafo distribusi yang sudah tersambung di jaringan distribusi, pada saat PMT penyulang tersebut dimasukkan.

Dengan memanfaatkan data pada sub bab 3.4 kedalam persamaan (2.17) dan (2.18) dapat dihitung setelan rele arus lebih yaitu sebagai berikut:

a. Setelan Arus OCR Sisi Penyulang 20 kV

- Arus *Setting* Primer

$$I_s = 1,05 \times I_n$$

$$I_s = 1,05 \times 286,4 \text{ A}$$

$$= 300,72 \text{ A}$$

- Arus *Setting* Sekunder

$$I_p = I_s \times \frac{1}{n_{CT}}$$

$$I_p = 300,72 \times \frac{5}{300}$$

$$= 5,012 \text{ A} \sim \text{dibulatkan menjadi } 5 \text{ A}$$

b. Setelan TMS (*Time Multiplier Setting*)

Arus gangguan yang dipilih untuk menentukan besarnya setting TMS rele arus lebih sisi penyulang 20 kV transformator tenaga yaitu arus gangguan hubung singkat 3 fasa di 25% panjang penyulang. Waktu kerja paling hilir yang ditetapkan $t = 0,3$ detik. Keputusan ini diambil agar rele tidak sampai trip lagi akibat adanya arus inrush dari trafo-trafo distribusi yang sudah tersambung di jaringan distribusi, pada saat PMT penyulang tersebut dimasukkan. Jadi didapat:

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{fault}}{I_s}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$0,3 = \frac{0,14}{\left(\frac{4473,348}{300,72}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

TMS = 0,1189 untuk penyulang pagesangan

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{fault}}{I_s}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$0,3 = \frac{0,14}{\left(\frac{5588,3735}{300,72}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

TMS = 0,1290 untuk penyulang platinum

4.7.2 Penyetelan (*Setting*) Rele Arus Lebih (*Over Current Relay*) Jenis *Inverse* di sisi *incoming* 20 kV Transformator Daya IV Gardu Induk Waru

Penentuan setelan rele arus lebih pada sisi *incoming* 20 kv transformator tenaga sama halnya dengan di penyulang, yaitu harus diketahui terlebih dahulu nilai arus nominal transformator tenaga tersebut.

Dengan memanfaatkan data pada sub bab 3.4 kedalam persamaan (2.17) dan (2.18) dapat dihitung setelan rele arus lebih yaitu sebagai berikut:

Data transformator tenaga yang diperoleh

- Merk : PASTI
- Tipe : ONAN/ONAF
- Daya : 60 MVA
- Tegangan : 150/20 kV
- Impedansi (Z%) : 12,984 %
- Teg Primer : 150 kV
- Teg Sekunder : 20 kV
- Ratio CT Trafo : 2000/5 A
- Arus Nominal Trafo : 1732
- Hub. Belitan Trafo : YNynO(d)
- Ground Resistor : 16 ohm

a. Setelan Arus OCR Sisi *incoming* 20 kV

- Arus *Setting* Primer

Arus nominal trafo pada sisi 20 kV

$$\begin{aligned} I_n (\text{sisi } 20 \text{ kV}) &= \frac{KVA}{kV \sqrt{3}} \\ &= \frac{60000}{20 \sqrt{3}} \\ &= 1732,0508 \text{ A} \end{aligned}$$

$$I_s = 1,05 \times I_n$$

$$\begin{aligned} I_s &= 1,05 \times 1732,0508 \text{ A} \\ &= 1818,6533 \text{ A} \end{aligned}$$

- Arus *Setting* Sekunder

$$I_p = I_s \times \frac{1}{n_{CT}}$$

$$\begin{aligned} I_p &= 1818,6533 \times \frac{5}{2000} \\ &= 4,5466 \text{ A} \sim \text{dibulatkan menjadi } 5 \text{ A} \end{aligned}$$

- b. Setelan TMS (*Time Multiplier Setting*)

Arus gangguan yang dipilih untuk menentukan besarnya setting TMS rele arus lebih sisi *incoming* 20 kV transformator tenaga yaitu arus gangguan hubung singkat 3 fasa di 25% panjang penyulang. Waktu kerja *incoming* didapat dengan waktu kerja rele disisi hilir +0,4 detik.

$t_{incoming} = 0,3 + 0,4 = 0,7$ detik, jadi didapat:

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{fault}}{I_s}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$0,7 = \frac{0,14}{\left(\frac{4473,348}{1818,6533}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

TMS = 0,0908 untuk penyulang pagesangan

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{fault}}{I_s}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$0,7 = \frac{0,14}{\left(\frac{5588,3735}{1818,6533}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

TMS = 0,1135 untuk penyulang platinum

4.7.3 Penyetelan (*Setting*) Rele Arus Gangguan Tanah (*Ground Fault Relay*) Jenis *Inverse* di sisi Penyulang 20 kV Transformator Daya IV Gardu Induk Waru

Untuk setelan dipenyulang menggunakan pedoman yaitu setelan arus hubung tanah dipenyulang di set $10\% \times$ arus gangguan 1 fasa ke tanah terkecil dipenyulang tersebut. Halini digunakan untuk menampung tahanan busur.

Dengan memanfaatkan data pada sub bab 3.4 kedalam persamaan (2.21) dan (2.22) dapat dihitung setelan rele arus lebih yaitu sebagai berikut:

a. Setelan Arus GFR Sisi Penyulang 20 kV

- Arus *Setting* Primer

$I_s = 10\% \times$ (gangguan di 100% panjang penyulang Pagesangan)

$$\begin{aligned} I_s &= 0,1 \times 678,1658 \text{ A} \\ &= 67,8166 \text{ A} \end{aligned}$$

$I_s = 10\% \times$ (gangguan di 100% panjang penyulang Platinum)

$$\begin{aligned} I_s &= 0,1 \times 839,3433 \text{ A} \\ &= 83,9343 \text{ A} \end{aligned}$$

- Arus *Setting* Sekunder

$$I_p = I_s \times \frac{1}{n_{CT}}$$

$$\begin{aligned} I_p &= 67,8166 \times \frac{5}{300} \\ &= 1,1303 \text{ A} \end{aligned}$$

untuk penyulang Pagesangan

$$I_p = I_s \times \frac{1}{n_{CT}}$$

$$\begin{aligned} I_p &= 83,9343 \times \frac{5}{300} \\ &= 1,3989 \text{ A} \end{aligned}$$

untuk penyulang Platinum

b. Setelan TMS (*Time Multiplier Setting*)

Arus gangguan yang dipilih untuk menentukan besarnya setting TMS rele arus gangguan tanah sisi penyulang 20 kV transformator tenaga yaitu arus

gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah di 25% panjang penyulang.

Waktu kerja paling hilir yang ditetapkan $t = 0,3$ detik.

Jadi didapat:

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{Ifault}{Is}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$0,3 = \frac{0,14}{\left(\frac{881,7724}{67,8166}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$TMS = 0,1128 \quad \text{untuk penyulang Pagesangan}$$

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{Ifault}{Is}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$0,3 = \frac{0,14}{\left(\frac{923,1489}{83,9343}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$TMS = 0,1053 \quad \text{untuk penyulang Platinum}$$

4.7.4 Penyetelan (*Setting*) Rele Arus Gangguan Tanah (*Ground Fault Relay*) Jenis *Inverse* di sisi *incoming* 20 kV Transformator Daya IV Gardu Induk Waru

Setelan rele arus gangguan tanah di *incoming* 20 kV harus lebih sensitive, hal ini berfungsi sebagai cadangan bagi rele di penyulang 20 kV dibuat $8\% \times$ arus gangguan tanah terkecil.

a. Setelan Arus GFR Sisi *incoming* 20 kV

- Arus *Setting* Primer

$$Is = 8\% \times (\text{gangguan di } 100\% \text{ panjang penyulang Pagesangan})$$

$$Is = 0,08 \times 678,1658 \text{ A}$$

$$= 54,2533 \text{ A}$$

$$Is = 8\% \times (\text{gangguan di } 100\% \text{ panjang penyulang Platinum})$$

$$Is = 0,08 \times 839,3433 \text{ A}$$

$$= 67,1475 \text{ A}$$

- Arus *Setting* Sekunder

$$Ip = Is \times \frac{1}{n_{CT}}$$

$$I_p = 54,2533 \times \frac{5}{300}$$

$$= 0,9042 \text{ A}$$

untuk penyulang Pagesangan

$$I_p = I_s \times \frac{1}{n_{CT}}$$

$$I_p = 67,1475 \times \frac{5}{300}$$

$$= 1,1191 \text{ A}$$

untuk penyulang Platinum

b. Setelan TMS (*Time Multiplier Setting*)

Arus gangguan yang dipilih untuk menentukan besarnya setting TMS rele arus gangguan tanah sisi *incoming* 20 kV transformator tenaga yaitu arus gangguan hubung singkat 3 fasa di 25% panjang penyulang. Waktu kerja *incoming* didapat waktu kerja rele hilir + 0,4 detik.

$t_{incoming} = 0,3 + 0,4 = 0,7$ detik, jadi didapat:

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{fault}}{I_s}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$0,7 = \frac{0,14}{\left(\frac{881,7724}{54,2533}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$TMS = 0,2867$$

untuk penyulang Pagesangan

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{fault}}{I_s}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$0,7 = \frac{0,14}{\left(\frac{923,1489}{67,1475}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$TMS = 0,2691$$

untuk penyulang Platinum

4.8 Pemeriksaan Waktu Kerja Rele Proteksi

Pemeriksaan waktu kerja rele ialah untuk mengetahui waktu kerja rele terhadap besarnya arus gangguan di tiap titik gangguan yang diasumsikan terjadi pada 25%, 50%, 75%, dan 100% panjang penyulang.

4.8.1 Waktu Kerja Rele Pada Gangguan 3 Fasa

Karena nilai arus gangguan hubung singkat yang didapat dari hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat adalah dalam nilai arus primer, maka dalam pemeriksaan selektifitas nilai arus primernya juga diambil, untuk lokasi gangguan 0% panjang penyulang, waktu kerja rele arus lebih di penyulang dan *incoming* 20 kV adalah sebagai berikut:

Waktu kerja rele di penyulang Pagesangan:

Penyulang 20 kV

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{\text{fault}}}{I_s}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{6665,7077}{300,72}\right)^{0,02} - 1} \times 0,1189$$

$$t = 0,2604$$

incoming 20 kV

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{\text{fault}}}{I_s}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

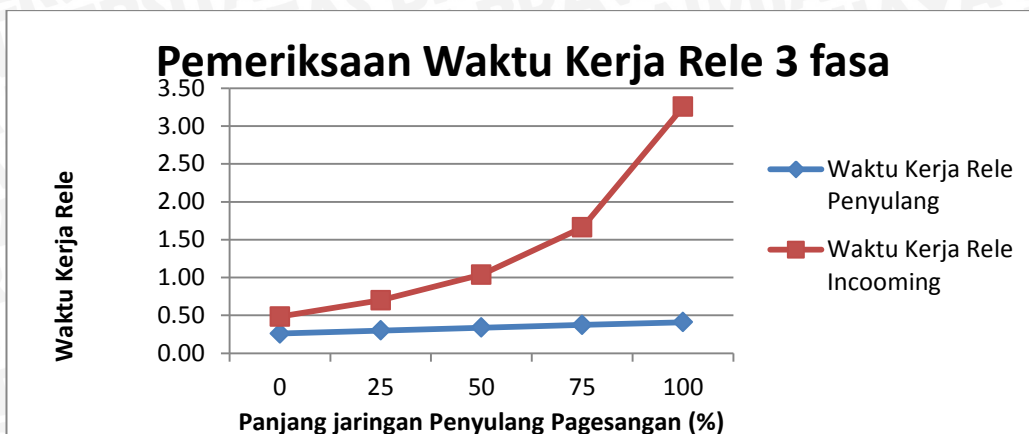
$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{6665,7077}{1818,6533}\right)^{0,02} - 1} \times 0,0908$$

$$t = 0,4830$$

dengan cara yang sama maka untuk perhitungan pemeriksaan waktu kerja rele arus lebih untuk lokasi gangguan 25%, 50%, 75%, dan 100% dapat dilihat pada Tabel 4.9 dibawah ini.

Tabel 4.9 Hasil perhitungan pemeriksaan waktu kerja rele arus lebih jenis inverse untuk gangguan 3 fasa penyulang Pagesangan transformator daya IV Gardu Induk Waru

Lokasi Gangguan Penyulang Pagesangan (% panjang)	Waktu Kerja Rele penyulang (detik)	Waktu Kerja Rele <i>incoming</i> (detik)	Selisih Waktu / <i>Grading</i> Time (detik)
0%	0,2604	0,4830	0,2226
25%	0,3	0,7	0,3998
50%	0,3396	1,0380	0,7006
75%	0,3734	1,6615	1,2881
100%	0,4090	3,2543	2,8453



Gambar 4.3 Kurva pemeriksaan waktu kerja rele 3 fasa penyulang PAGESANGAN

Sumber : Hasil perhitungan

Waktu kerja rele di penyulang Platinum:

Penyulang 20 kV

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{fault}}{I_s}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{6665,7077}{300,72}\right)^{0,02} - 1} \times 0,1290$$

$$t = 0,2825$$

incoming 20 kV

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{fault}}{I_s}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

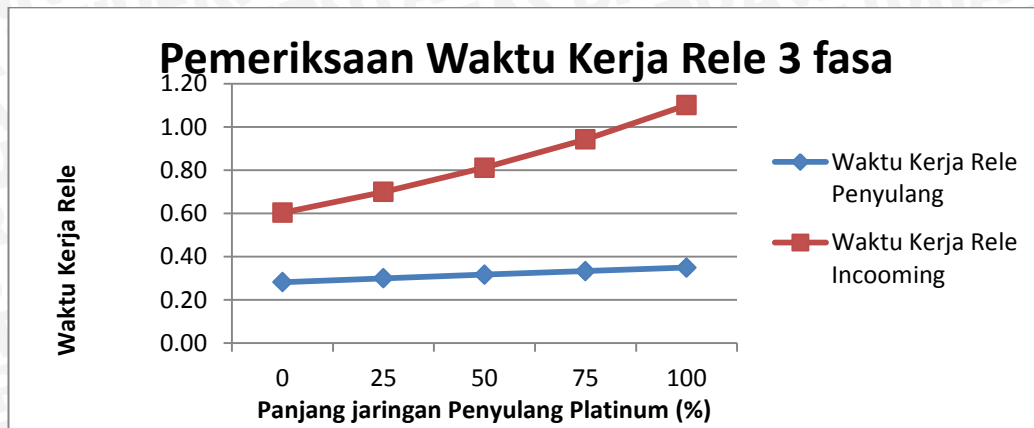
$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{6665,7077}{1818,6533}\right)^{0,02} - 1} \times 0,1135$$

$$t = 0,6038$$

dengan cara yang sama maka untuk perhitungan pemeriksaan waktu kerja rele arus lebih untuk lokasi gangguan 25%, 50%, 75%, dan 100% dapat dilihat pada Tabel 4.10 dibawah ini.

Tabel 4.10 Hasil perhitungan pemeriksaan waktu kerja rele arus lebih jenis inverse untuk gangguan 3 fasa penyulang Platinum transformator daya IV Gardu Induk Waru

Lokasi Gangguan Penyulang Platinum (%) panjang)	Waktu Kerja Rele penyulang (detik)	Waktu Kerja Rele incoming (detik)	Selisih Waktu / Grading Time (detik)
0%	0,2825	0,6038	0,3213
25%	0,3001	0,6998	0,3998
50%	0,3171	0,8113	0,4942
75%	0,3337	0,9426	0,6089
100%	0,3499	1,0004	0,7505



Gambar 4.4 Kurva pemeriksaan waktu kerja rele 3 fasa penyulang Platinum

Sumber : Hasil perhitungan

4.8.2 Waktu Kerja Rele Pada Gangguan 2 Fasa

Waktu kerja rele arus lebih pada penyulang dan incoming 20 kV trafo untuk gangguan 2 fasa yang terjadi dilokasi 0%, 25%, 75%, dan 100% panjang penyulang juga dapat dihitung dengan menggunakan rumus yang sama.

Untuk lokasi gangguan 0% panjang penyulang, waktu kerja rele arus lebih di penyulang dan incoming 20 kV adalah

Waktu kerja rele di Pagesangan:

Penyulang 20 kV

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{fault}}{I_s}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{5772,6722}{300,72}\right)^{0,02} - 1} \times 0,1189$$

$$t = 0,2734$$

incoming 20 kV

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{fault}}{I_s}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{5772,6722}{1818,6533}\right)^{0,02} - 1} \times 0,0908$$

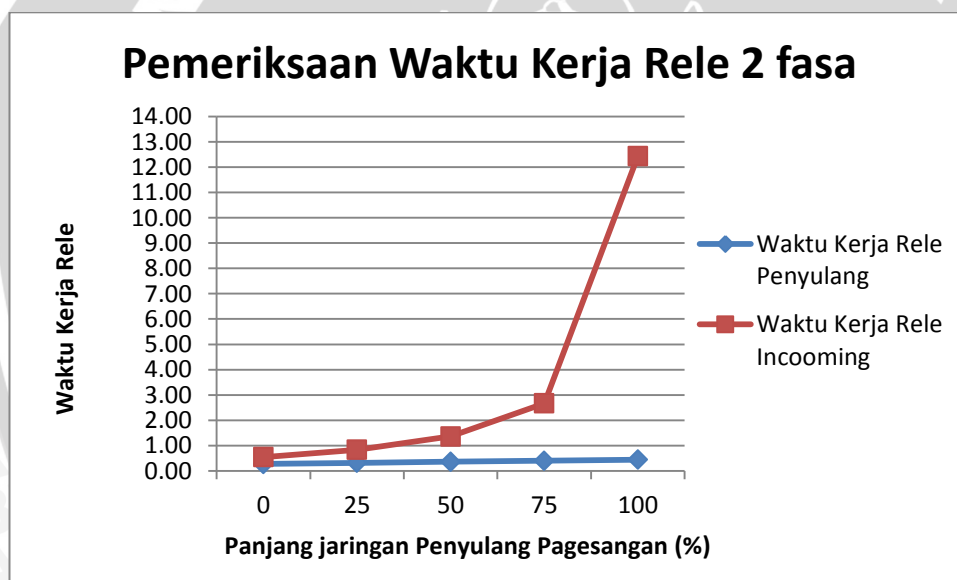
$$t = 0,5440$$

dengan cara yang sama maka untuk perhitungan pemeriksaan waktu kerja rele arus lebih untuk lokasi gangguan 25%, 50%, 75%, dan 100% dapat dilihat pada Tabel 4.11 dibawah ini.



Tabel 4.11 Hasil perhitungan pemeriksaan waktu kerja rele arus lebih jenis inverse untuk gangguan 2 fasa penyulang Pagesangan transformator daya IV Gardu Induk Waru

Lokasi Gangguan Penyulang Pagesangan (% panjang)	Waktu Kerja Rele penyulang (detik)	Waktu Kerja Rele <i>incoming</i> (detik)	Selisih Waktu / <i>Grading Time</i> (detik)
0%	0,2734	0,5440	0,2706
25%	0,3174	0,8342	0,5168
50%	0,3593	1,3611	1,0019
75%	0,4003	2,6727	2,2724
100%	0,4414	12,4349	11,9935



Gambar 4.5 Kurva pemeriksaan waktu kerja rele 2 fasa penyulang Pagesangan

Sumber : Hasil perhitungan

Waktu kerja rele di penyulang Platinum:

Penyulang 20 kV

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{Ifault}{Is}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{5772,6722}{300,72}\right)^{0,02} - 1} \times 0,1290$$

$$t = 0,2967$$

incoming 20 kV

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{Ifault}{Is}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

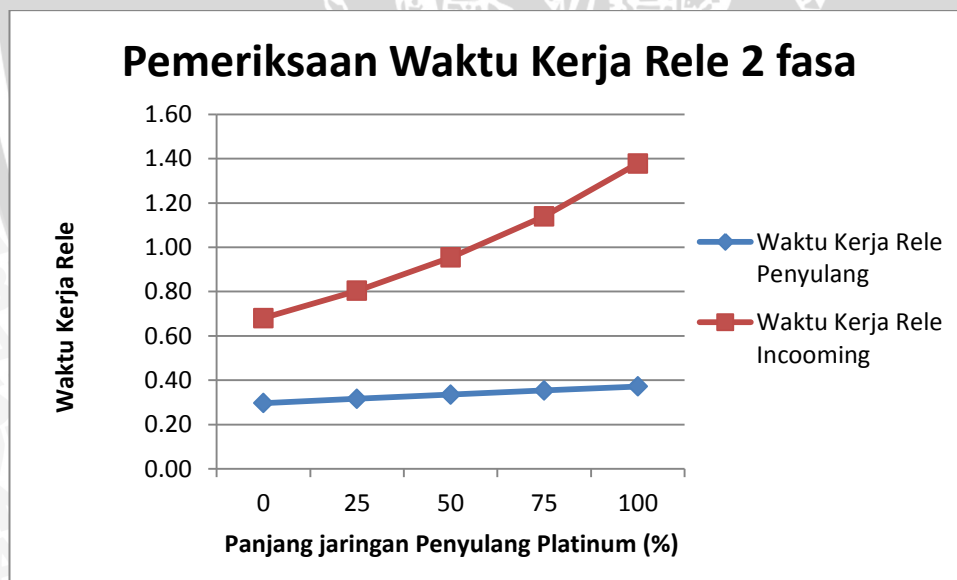
$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{5772,6722}{1818,6533}\right)^{0,02} - 1} \times 0,1135$$

$$t = 0,6799$$

dengan cara yang sama maka untuk perhitungan pemeriksaan waktu kerja rele arus lebih untuk lokasi gangguan 25%, 50%, 75%, dan 100% dapat dilihat pada Tabel 4.12 dibawah ini.

Tabel 4.12 Hasil perhitungan pemeriksaan waktu kerja rele arus lebih jenis inverse untuk gangguan 2 fasa penyulang Platinum transformator daya IV Gardu Induk Waru

Lokasi Gangguan Penyulang Platinum (% panjang)	Waktu Kerja Rele penyulang (detik)	Waktu Kerja Rele <i>incoming</i> (detik)	Selisih Waktu / <i>Grading Time</i> (detik)
0%	0,2967	0,6799	0,3833
25%	0,3161	0,8038	0,4878
50%	0,3349	0,9539	0,6189
75%	0,3534	1,1401	0,7867
100%	0,3716	1,3786	1,0070



Gambar 4.6 Kurva pemeriksaan waktu kerja rele 2 fasa penyulang Platinum

Sumber : Hasil perhitungan

4.8.3 Waktu Kerja Rele Pada Gangguan 1 Fasa

Waktu kerja rele arus lebih pada penyulang dan incoming 20 kV trafo untuk gangguan 1 fasa yang terjadi dilokasi 0%, 25%, 75%, dan 100% panjang penyulang juga dapat dihitung dengan menggunakan rumus yang sama.

Untuk lokasi gangguan 0% panjang penyulang, waktu kerja rele arus lebih di penyulang dan *incoming* 20 kV adalah

Waktu kerja rele di PAGESANGAN:

Penyulang 20 kV

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{fault}}{I_s}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{948,8942}{67,8166}\right)^{0,02} - 1} \times 0,1128$$

$$t = 0,2914$$

incoming 20 kV

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{fault}}{I_s}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

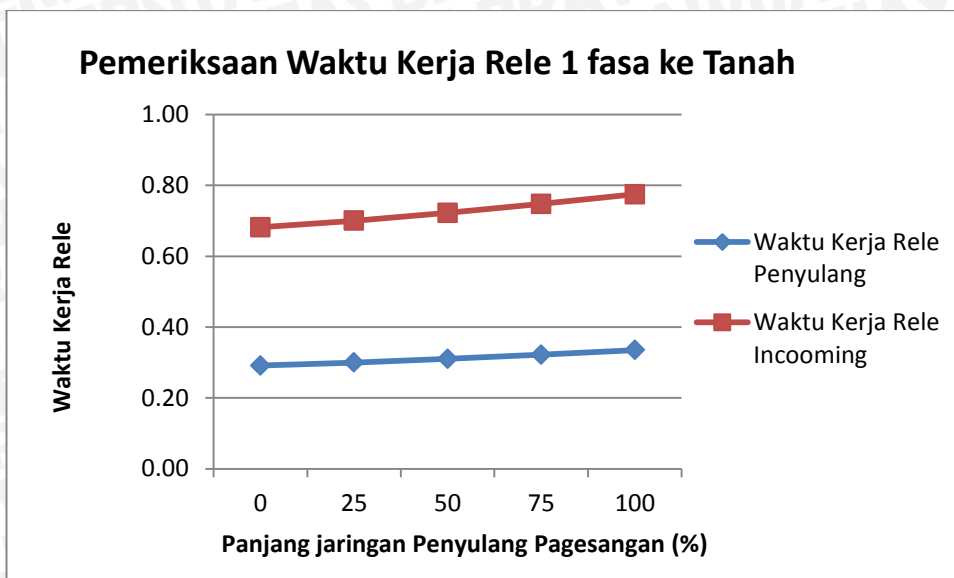
$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{948,8942}{54,2533}\right)^{0,02} - 1} \times 0,2867$$

$$t = 0,6815$$

Dengan cara yang sama maka untuk perhitungan pemeriksaan waktu kerja rele arus lebih untuk lokasi gangguan 25%, 50%, 75%, dan 100% dapat dilihat pada Tabel 4.13 dibawah ini.

Tabel 4.13 Hasil perhitungan pemeriksaan waktu kerja rele arus lebih jenis inverse untuk gangguan 1 fasa ke tanah penyulang PAGESANGAN transformator daya IV Gardu Induk Waru

Lokasi Gangguan Penyulang PAGESANGAN (% panjang)	Waktu Kerja Rele penyulang (detik)	Waktu Kerja Rele <i>incoming</i> (detik)	Selisih Waktu / <i>Grading</i> Time (detik)
0%	0,2914	0,6815	0,3901
25%	0,3000	0,7000	0,4000
50%	0,3104	0,7224	0,4120
75%	0,3223	0,7476	0,4254
100%	0,3351	0,7748	0,4397



Gambar 4.7 Kurva pemeriksaan waktu kerja rele 1 fasa ke tanah penyulang Pemasangan

Sumber : Hasil perhitungan

Waktu kerja rele di penyulang Platinum:

Penyulang 20 kV

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{\text{fault}}}{I_s}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{948,8942}{83,9343}\right)^{0,02} - 1} \times 0,1053$$

$$t = 0,2965$$

incoming 20 kV

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{\text{fault}}}{I_s}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

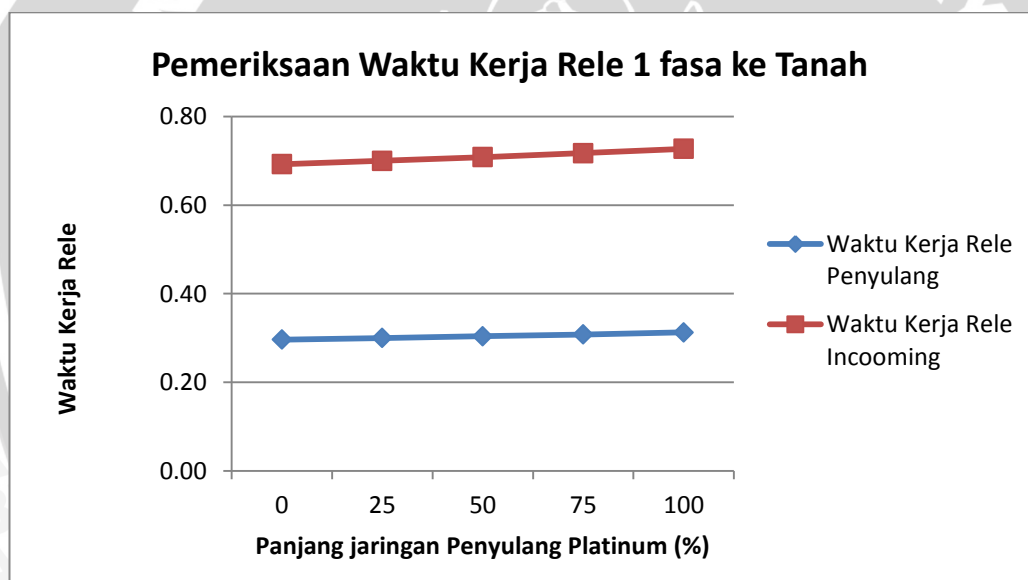
$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{948,8942}{67,1475}\right)^{0,02} - 1} \times 0,2691$$

$$t = 0,6925$$

dengan cara yang sama maka untuk perhitungan pemeriksaan waktu kerja rele arus lebih untuk lokasi gangguan 25%, 50%, 75%, dan 100% dapat dilihat pada Tabel 4.14 dibawah ini.

Tabel 4.14 Hasil perhitungan pemeriksaan waktu kerja rele arus lebih jenis inverse untuk gangguan 1 fasa ke tanah penyulang Platinum transformator daya IV Gardu Induk Waru

Lokasi Gangguan Penyulang Platinum (% panjang)	Waktu Kerja Rele penyulang (detik)	Waktu Kerja Rele <i>incoming</i> (detik)	Selisih Waktu / <i>Grading</i> <i>Time</i> (detik)
0%	0,2965	0,6925	0,3960
25%	0,3000	0,7000	0,4000
50%	0,3039	0,7083	0,4044
75%	0,3081	0,7174	0,4092
100%	0,3127	0,7271	0,4144



Gambar 4.8 Kurva pemeriksaan waktu kerja rele 1 fasa ke tanah penyulang Platinum

Sumber : Hasil perhitungan

4.8.4 Analisa

Dari Tabel 4.9 dapat dilihat bahwa waktu kerja rele di penyulang lebih cepat dibandingkan waktu kerja di *incoming* (*grading time*) adalah 0,3998, selain itu dapat dilihat jarak lokasi gangguan mempengaruhi besar kecilnya selisih waktu (*grading time*). Semakin jauh jarak lokasi gangguan maka semakin besar selisih waktu kerja rele disisi penyulang dengan waktu kerja ele di *incoming* dan begitu juga sebaliknya, hal ini bertujuan untuk memberi kesempatan pada rele di penyulang untuk bekerja

terlebih dahulu sebagai pengaman utama (*main protection*) apabila terjadi gangguan hubung singkat di penyulang dan rele di *incoming* bekerja sebagai pengaman cadangan (*back-up protection*) apabila rele dipenyulang tidak bekerja. Sehingga penyetelan sistem proteksi sesuai dengan ketentuan PLN yaitu 0,4 - 0,5 detik.

Dapat dilihat juga waktu kerja rele untuk gangguan 3 fasa lebih cepat dibandingkan waktu kerja rele untuk gangguan 2 fasa pada titik gangguan tertentu, dengan kata lain besar kecilnya arus gangguan mempengaruhi cepat lambatnya waktu kerja rele apabila ditinjau berdasarkan fasa, sehingga semakin besar arus gangguan maka semakin cepat waktu kerja rele dan begitu juga sebaliknya.



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil perhitungan dan pembahasan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Arus gangguan hubung singkat terbesar terjadi pada gangguan hubung singkat 3 fasa di bus bar 20 kV yaitu 6665,7077A dan terkecil terjadi pada arus gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah yaitu 678,1658A
2. Arus hubung singkat 1 fasa ke tanah nilainya lebih kecil dari arus gangguan hhubung singkat 3 fasa dan 2 fasa (lihat Tabel 4.8)
3. Penyetelan Rele Arus Lebih dan Rele Arus Gangguan Tanah yang didapat dari hasil perhitungan adalah:

- Setelan rele penyulang Pagesangan

OCR sisi *incoming* 20 kV

$$I_{\text{set primer}} = 1818,6533 \text{ A}$$

$$I_{\text{set sekunder}} = 5 \text{ A}$$

$$\text{TMS} = 0,0908$$

OCR sisi penyulang 20 kV

$$I_{\text{set primer}} = 300,72 \text{ A}$$

$$I_{\text{set sekunder}} = 5 \text{ A}$$

$$\text{TMS} = 0,1189$$

GFR sisi *incoming* 20 kV

$$I_{\text{set primer}} = 54,2533 \text{ A}$$

$$I_{\text{set sekunder}} = 0,9042 \text{ A}$$

$$\text{TMS} = 0,2867$$

GFR sisi penyulang 20 kV

$$I_{\text{set primer}} = 67,8166 \text{ A}$$

$$I_{\text{set sekunder}} = 1,1303 \text{ A}$$

$$\text{TMS} = 0,1128$$

- Setelan rele penyulang Platinum

OCR sisi *incoming* 20 kV

$$I_{\text{set primer}} = 1818,6533 \text{ A}$$

$$I_{\text{set sekunder}} = 5 \text{ A}$$

$$\text{TMS} = 0,1135$$

OCR sisi penyulang 20 kV

$$I_{\text{set primer}} = 300,72 \text{ A}$$

$$I_{\text{set sekunder}} = 5 \text{ A}$$

$$\text{TMS} = 0,1290$$

GFR sisi *incoming* 20 kV

$$I_{\text{set primer}} = 67,1475 \text{ A}$$

GFR sisi penyulang 20 kV

$$I_{\text{set primer}} = 83,9343 \text{ A}$$

$$I_{\text{set sekunder}} = 1,1191 \text{ A}$$

$$I_{\text{set sekunder}} = 1,3989 \text{ A}$$

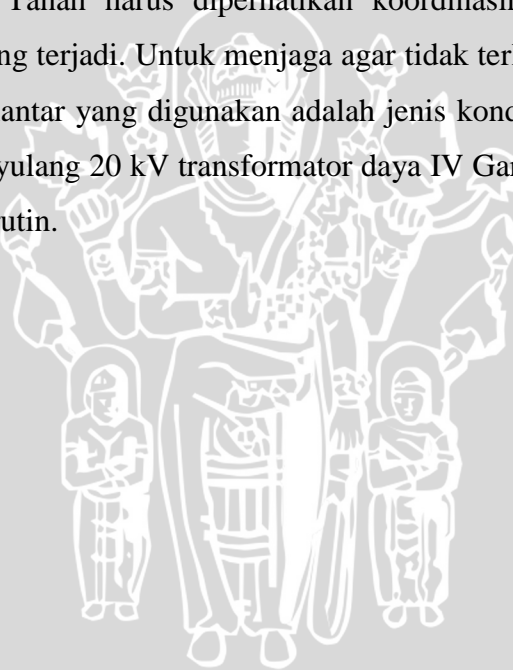
$$\text{TMS} = 0,2691$$

$$\text{TMS} = 0,1053$$

4. Waktu kerja rele di penyulang lebih cepat dibandingkan dengan waktu kerja di *incoming* dengan selisih waktu (*grading time*) adalah 0,4. Hal ini disebabkan karena jarak lokasi gangguan mempengaruhi besar kecilnya selisih waktu (*grading time*). Semakin jauh jarak lokasi gangguan maka semakin besar selisih waktu kerja rele di *incoming*.

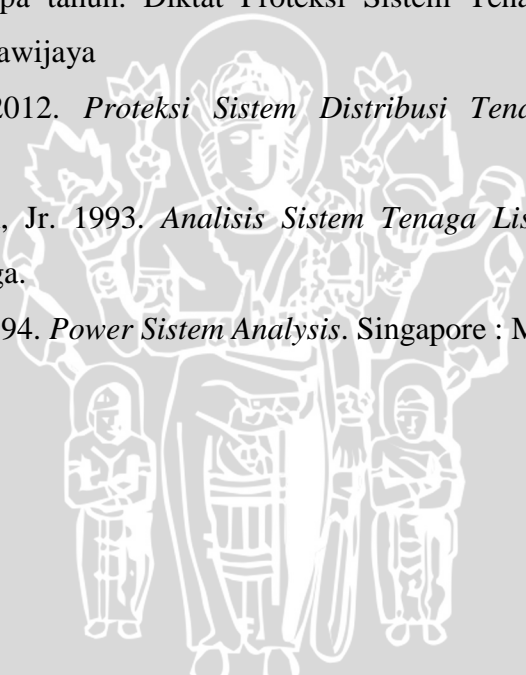
5.2 Saran

Sistem proteksi merupakan pengaman pada sistem tenaga listrik yang berperan penting dalam mengatasi gangguan yang terjadi, oleh karena itu pemeliharaan sistem proteksi harus dilakukan secara periodik. Rele Arus Lebih dan Rele Arus Gangguan Tanah harus diperhatikan koordinasinya untuk mengatasi gangguan-gangguan yang terjadi. Untuk menjaga agar tidak terlalu banyak gangguan diusahakan jenis penghantar yang digunakan adalah jenis konduktor yang berisolasi serta pemeliharaan penyulang 20 kV transformator daya IV Gardu Induk Waru harus tetap dilakukan secara rutin.



DAFTAR PUSTAKA

- Arismunandar, A., Prof. Dr. 1983. *Teknik Tegangan Tinggi Suplemen*. Jakarta: Ghalia Indonesia.
- Arismunandar, A. 1984. *Teknik Tegangan Tinggi*. Jakarta : PT. Pradnya Paramita
- Hutaruk, Tumpak S. 1991. *Pentanahan Titik Netral Sistem Tenaga dan Pentanahan Peralatan*. Jakarta : Penerbit Erlangga.
- Pandjaitan, Bonar. 2012. *Proteksi Sistem Tenaga Listrik*. Yogyakarta. Andi Offset.
- PT PLN (PERSERO) P3B Region Jawa Timur dan Bali Unit Pelayanan Transmisi Surabaya, “*Petunjuk Pengoperasian Gardu Induk Waru*”
- Ravindranath, B. 1976. *Power System Protection and Switchgear*. Singapore: John Wiley & Son.
- Saksomo, Setiyo. Tanpa tahun. Diklat Proteksi Sistem Tenaga Listrik. Malang: Universitas Barawijaya
- Sarimun, Wahyudi. 2012. *Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik*. Depok. Garamond.
- William D. Stevenson, Jr. 1993. *Analisis Sistem Tenaga Listrik* edisi ke-empat. Jakarta. Erlangga.
- William, Stevenson. 1994. *Power System Analysis*. Singapore : McGraw-Hill.



LAMPIRAN



Lampiran 1: Data Sheet Kabel

Data Jenis Penghantar di Gardu Induk Waru

Kabel penghantar yang digunakan penyulang 20 kV transformator daya IV Gardu Induk Waru adalah tipe AAAC.

Jenis Penghantar Kawat/Kabel	Kawat AAAC
Ukuran (mm²)	240 mm ²
Panjang (km)	Penyulang pagesangan : 10,45 km Penyulang platinum : 4,17 km
Impedansi urutan positif (Z₁)	0,1344 + j 0,3158 Ω/km
Impedansi urutan nol (Z₀)	0,2824 + j 1,6033 Ω/km

Besar nilai impedansi penyulang sebagai berikut:

c. Panjang penyulang Pagesangan = 10,45 km

$$Z_1 = Z_2 = (0,1344 + j 0,3158) \Omega/\text{km} \times 10,45 \text{ km} = 1,4045 + j 3,3001 \Omega$$

$$Z_0 = (0,2824 + j 1,6033) \Omega/\text{km} \times 10,45 \text{ km} = 2,9511 + j 16,7545 \Omega$$

d. Panjang penyulang Platinum = 4,17 km

$$Z_1 = Z_2 = (0,1344 + j 0,3158) \Omega/\text{km} \times 4,17 \text{ km} = 0,5604 + j 1,3169 \Omega$$

$$Z_0 = (0,2824 + j 1,6033) \Omega/\text{km} \times 4,17 \text{ km} = 1,1776 + j 6,6858 \Omega$$

Lampiran 2: Rekap Gangguan Penyulang Gardu Induk Waru




Rekap Gangguan Penyulang Gardu Induk Waru bulan Januari-Maret 2014



PT. PLN
(PERSERO)
P3B JAWA
BALI
APP
SURABAYA

DATA GANGGUAN PENYULANG 20 KV APP SURABAYA JANUARI 2014

NO	Tanggal	Gardu Induk	Trafo	Penyulang	Indikasi Relai Penyulang (arus Gangguan)	Indikasi Relay Trafo (Arus Gangguan)	Penyebab	Keterangan
1	1 Januari 2014	Waru	Trafo 4	Kramayuda	GFR			Gangguan penyulang
2	2 Januari 2014	Waru	Trafo 6	Baja 1	GFR		Pohon tumbang	Gangguan penyulang
3	10 Januari 2014	Waru	Trafo 4	Platinum	OCR INSTANT		Pohon tumbang	Gangguan penyulang
4	12 Januari 2014	Waru	Trafo 6	Baja 2	EF		Saat memasukk an LBS	Gangguan penyulang
5	17 Januari 2014	Waru	Trafo 4	Platinum	OCR INSTANT			Gangguan penyulang
6	17 Januari 2014	Waru	Trafo 4	Pagesangan	GFR			Gangguan penyulang
7	28 Januari 2014	Waru	Trafo 4	Pagesangan	OCR INSTANT			Gangguan penyulang
8	29 Januari 2014	Waru	Trafo 4	Platinum	OCR INSTANT			Gangguan penyulang




Pemeriksa	Spv Gardu Induk	Pelaksana
 A. Thoillah	M. Nurdin	1. Rudi Wahono  2. Ferry Febrianto 



PT. PLN
(PERSERO)
P3B JAWA
BALI
APP
SURABAYA

DATA GANGGUAN PENYULANG 20 KV APP SURABAYA FEBRUARI 2014

NO	Tanggal	Gardu Induk	Trafo	Penyulang	Indikasi Relai Penyulang (arus Gangguan)	Indikasi Relai Trafo (Arus Gangguan)	Penyebab	Keterangan
1	12 Februari 2014	Waru	Trafo 3	Bungurasih	GFR			Gangguan penyulang
2	15 Februari 2014	Waru	Trafo 4	Pagesangan	OCR			Gangguan penyulang
3	15 Februari 2014	Waru	Trafo 7	Trias 2	Tidak Muncul			Gangguan penyulang
4	15 Februari 2014	Waru	Trafo 4	Pagesangan	GFR KVO 7 KV			Gangguan penyulang
5	15 Februari 2014	Waru	Trafo 4	Pagesangan	OCR INSTANT		Pohon tumbang	Gangguan penyulang
6	15 Februari 2014	Waru	Trafo 4	Cito	OCR INSTANT			Gangguan penyulang
7	16 Februari 2014	Waru	Trafo 4	Cito	GFR KVO 3 KV			Gangguan penyulang
8	13 Februari 2014	Waru	Trafo 4	Trosobo	GFR KVO 1 KV			Gangguan penyulang
9	22 Februari 2014	Waru	Trafo 7	BLKI	GFR			Gangguan penyulang
10	25 Februari 2014	Waru	Trafo 4	Pagesangan	OCR INSTANT			Gangguan penyulang
11	27 Februari 2014	Waru	Trafo 5	Pabean 1	OCR INSTANT			Gangguan penyulang

Pemeriksa	Spv Gardu Induk	Pelaksana
 A. Thoillah	M. Nurdin	1. Rudi Wahono  2. Ferry Febrianto 








PT. PLN
(PERSERO)
P3B JAWA
BALI
APP
SURABAYA

DATA GANGGUAN PENYULANG 20 KV APP SURABAYA MARET 2014

NO	Tanggal	Gardu Induk	Trafo	Penyulang	Indikasi Relai Penyulang (arus Gangguan)	Indikasi Relai Trafo (Arus Gangguan)	Penyebab	Keterangan
1	5 Maret 2014	Waru	Trafo 5	Medaeng	OCR INSTANT			Gangguan penyulang
2	5 Maret 2014	Waru	Trafo 3	UBM	OCR INSTANT			Gangguan penyulang
3	9 Maret 2014	Waru	Trafo 7	Purnomo 1	OCR INSTANT			Gangguan penyulang
4	9 Maret 2014	Waru	Trafo 5	Suparma 1	OCR INSTANT			Gangguan penyulang
5	9 Maret 2014	Waru	Trafo 5	Sawotratap	GFR		Konduktor lepas	Gangguan penyulang
6	10 Maret 2014	Waru	Trafo 4	Platinum	OCR INSTANT			Gangguan penyulang
7	10 Maret 2014	Waru	Trafo 4	Pagesangan	DGR KVO 20 KV			Gangguan penyulang
8	12 Maret 2014	Waru	Trafo 5	A.Yani	OCR INSTANT		Pohon tumbang	Gangguan penyulang
9	13 Maret 2014	Waru	Trafo 4	Pagesangan	OCR INSTANT Phs R.S 5,98 KA			Gangguan penyulang
10	22 Maret 2014	Waru	Trafo 7	Trias 2	OCR INSTANT Phs S,T 19,16 KA			Gangguan penyulang
11	29 Maret 2014	Waru	Trafo 4	Platinum	OCR INSTANT Phs R.S 3,6 KA			Gangguan penyulang

Pemeriksa	Spv Gardu Induk	Pelaksana
 A. Thoillah	M. Nurdin	1. Rudi Wahono  2. Ferry Febrianto 



Lampiran 3: Data Rele Proteksi Gardu Induk Waru

Data Rele Proteksi Penyulang Transformator IV Gardu Induk Waru



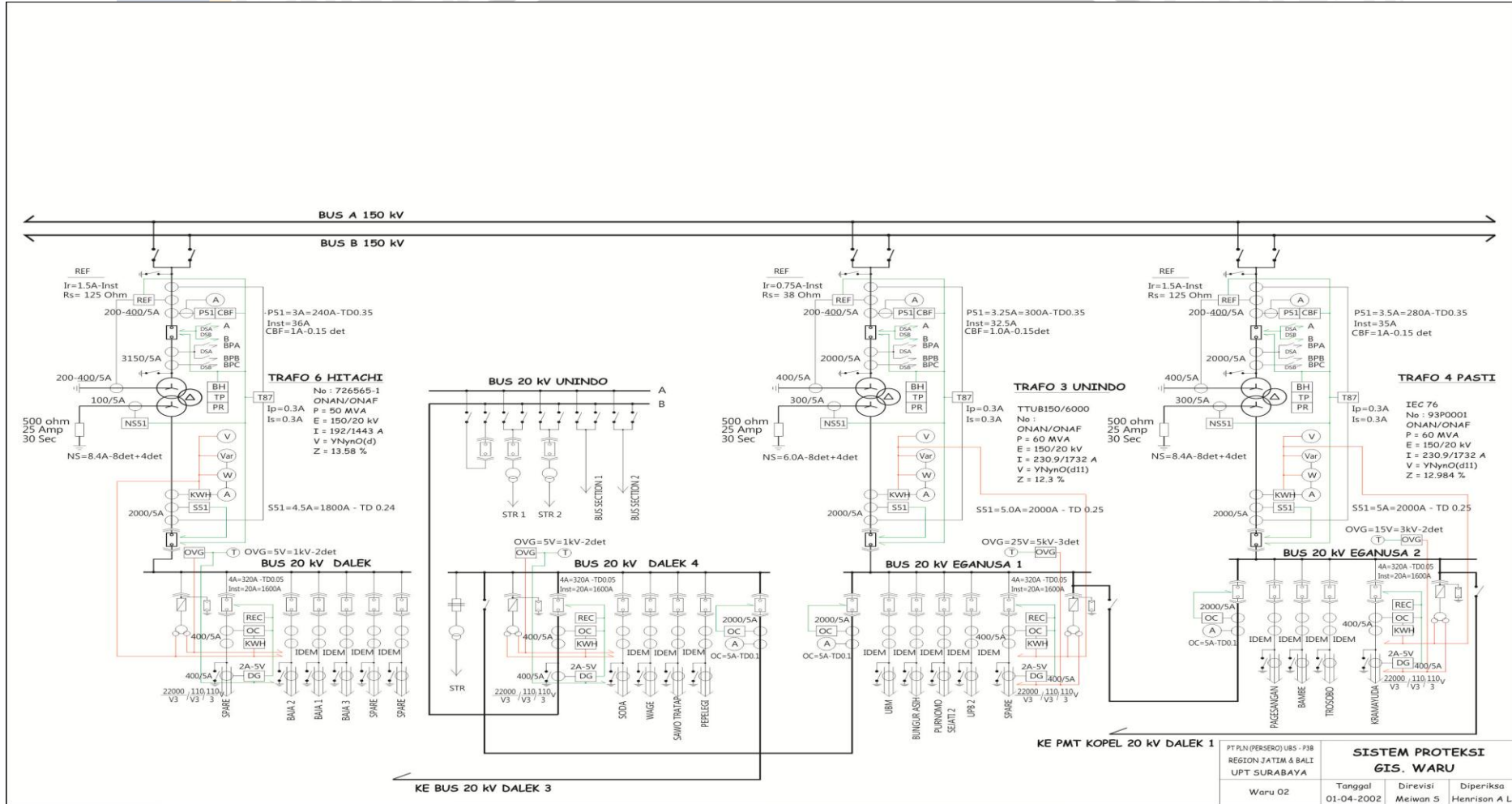
Lampiran 4: *Single Line Diagram Gardu Induk Waru*

Single Line Diagram Gardu Induk Waru





Single Line Diagram Gardu Induk Waru 150/20 kV





Lampiran 5: Foto Gardu Induk Waru



