

**ANALISIS KOORDINASI RELE ARUS LEBIH DAN RELE
GANGGUAN TANAH SEBELUM DAN SESUDAH PENAMBAHAN
UNIT PEMBANGKIT BARU PADA PLTGU GRATI**

SKRIPSI

KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Ditujukan Untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh:

NOVAN ARDITA PRATAMA
NIM. 115060300111046

UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2015

LEMBAR PERSETUJUAN

**ANALISIS KOORDINASI RELE ARUS LEBIH DAN RELE GANGGUAN
TANAH SEBELUM DAN SESUDAH PENAMBAHAN UNIT PEMBANGKIT
BARU PADA PLTGU GRATI**

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



NOVAN ARDITA PRATAMA
NIM. 115060300111046

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Ir. Soemarwanto, M.T.
NIP. 19500715 198003 1 002

Ir. Teguh Utomo, M.T.
NIP. 19650913 199103 1 003

LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISIS KOORDINASI RELE ARUS LEBIH DAN RELE GANGGUAN
TANAH SEBELUM DAN SESUDAH PENAMBAHAN UNIT PEMBANGKIT
BARU PADA PLTGU GRATI**

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

NOVAN ARDITA PRATAMA
NIM. 115060300111046

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus sidang skripsi
pada tanggal 29 Oktober 2015

Dosen Penguji I

Dosen Penguji II

Ir. Hery Purnomo, M.T.
NIP. 19550708 198212 1 001

Ir. Mahfudz Shidiq, M.T.
NIP. 19580609 198703 1 003

Dosen Penguji III

Ir. Soeprapto, M.T.
NIP. 19561020 198903 1 001

Mengetahui
Ketua Jurusan Teknik Elektro

M. Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19741203 200012 1 001

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT karena hanya dengan berkat rahmat, barokah dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan baik yang berjudul **“Analisis Koordinasi Rele Arus Lebih dan Rele Gangguan Tanah Sebelum dan Sesudah Penambahan Unit Pembangkit Baru Pada PLTGU Grati”**. Skripsi tersebut disusun dalam rangka untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik dari jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.

Penulisan skripsi ini tidak dapat terselesaikan dengan baik dan lancar tanpa dukungan dan bantuan dari berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung dari berbagai pihak. Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu dan mendukung dalam penyelesaian skripsi ini, berbagai pihak tersebut diantaranya yaitu :

1. Bapak M. Aziz Muslim, S.T., M.T, Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro.
2. Bapak Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro.
3. Bapak Ali Mustofa, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro.
4. Ibu Dr. Rini Nur Hasanah, ST., M.Sc selaku KKDK konsentrasi Teknik Energi Elektrik Teknik Elektro.
5. Bapak Ir. Soemarwanto, M.T. dan Bapak Ir. Teguh Utomo, M.T. selaku dosen pembimbing skripsi yang selalu membimbing dengan penuh kesabaran dan memberi pengarahan penulis dalam penelitian ini.
6. Bapak ibu dosen serta segenap staf dan karyawan Jurusan Teknik Elektro.
7. PT. Indonesia Power Unit Bisnis Pembangkitan (UBP) Perak-Grati yang menjadi lokasi penelitian, terutama Bapak wahyu yang telah banyak membantu dan memberi ijin dalam pengambilan data dan survei lapangan di lokasi pembangkit.
8. Kedua orang tua Bapak Harjito dan Ibu Erni Soro Prastuti yang selalu memberi motivasi, semangat serta panutan untuk menjadi lebih baik. Adek tercinta Devinta yang selalu menemani dan memberi motivasi.

9. Rekan-rekan mahasiswa Teknik Elektro angkatan 2011, khususnya rekan-rekan mahasiswa konsentrasi (A) Teknik Energi Elektrik yang setia menemani dari maba sampai sekarang ini.

10. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini belum sempurna, karena keterbatasan ilmu dan kendala-kendala lain yang terjadi selama pengerjaan penelitian ini. Oleh karena itu saran dan kritik mengenai penelitian ini diharapkan oleh penulis agar penelitian ini dapat menjadi karya tulis yang lebih baik dan berguna. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat dan dapat digunakan untuk pengembangan lebih lanjut.

Malang, 15 Oktober 2015

Penulis



DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR LAMPIRAN	xi
ABSTRAK	xii
ABSTRACT	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Tujuan	4
1.5. Manfaat	4
1.6. Sistematika Pembahasan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Sistem Proteksi Tenaga Listrik	5
2.1.1. Tujuan Sistem Proteksi	6
2.1.2. Pengertian Rele Secara Umum	6
2.1.3. Syarat Rele Pengaman	7
2.2. Rele Arus Lebih	7
2.2.1. Jenis Rele Arus Lebih Berdasarkan karakteristik Waktu	8
2.2.1.1. Rele Arus Lebih Waktu Seketika (instan)	8
2.2.1.2. Rele Arus Lebih Waktu Tertentu (<i>Definite</i>)	10
2.2.1.3. Rele Arus Lebih Waktu Terbalik (<i>Invers</i>)	12
2.3. Rele Gangguan Tanah	15
2.3.1. Prinsip Kerja Rele Gangguan Tanah	15
2.3.2. Setelan Rele Gangguan Tanah	15
2.3.2.1. Penyetelan Arus Rele Gangguan Tanah	15
2.3.2.2. Penyetelan Waktu Kerja Rele Gangguan Tanah	16
2.4. Koordinasi Pengaman	16
2.4.1. Koordinasi Rele Arus Lebih dan Rele Gangguan Tanah	17



2.4.1.1. Koordinasi Rele Untuk Gangguan Fasa-Fasa.....	18
2.4.1.2. Koordiansi Rele Untuk Gangguan Fasa-Tanah.....	19
2.5. Gangguan Hubung Singkat.....	20
2.6. Metode Komponen Simetris Untuk Gangguan Hubung Singkat.....	22
2.6.1. Komponen Urutan Positif (<i>Positive Sequence Components</i>).....	24
2.6.2. Komponen Urutan Negatif (<i>Negative Sequence Components</i>).....	25
2.6.3. Komponen Urutan Nol (<i>Zero Sequence Components</i>).....	25
2.7. Perhitungan Impedansi.....	25
2.7.1. Sistem Per Unit.....	26
2.7.2. Impedansi Urutan Sumber.....	26
2.7.3. Impedansi Urutan Transformator Utama.....	27
2.7.4. Impedansi Urutan Saluran.....	28
2.8. Perhitungan Arus gangguan.....	29
2.8.1. Gangguan Tiga fasa.....	29
2.8.2. Gangguan Antar Fasa.....	30
2.8.3. Gangguan Satu Fasa ke Tanah.....	30
2.8.4. Gangguan Dua Fasa ke Tanah.....	32
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	33
3.1. Survei dan Pengumpulan Data.....	33
3.2. Prosedur Perhitungan dan Analisis Koordinasi OCR dan GFR Sebelum dan 3.2. Setelah Penambahan Unit Pembangkit Baru.....	34
3.2.1. Data-data Spesifikasi Sistem Sebelum Penambahan Unit Pembangkit 3.2.1. Baru.....	36
3.2.2. Perhitungan Impedansi Urutan.....	36
3.2.3. Perhitungan Nilai Arus Gangguan Berdasarkan Jenis Gagguan.....	36
3.2.4. Perhitungan Setelan OCR dan GFR Sebelum Penambahan Unit Pembangkit Baru.....	37
3.2.5. Data-data Spesifikasi Sub-Sistem Baru.....	37
3.2.6. Perhitungan Impedansi Urutan Setelah Penambahan Unit Pembangkit Baru.....	37
3.2.7. Perhitungan Arus Gangguan Sesudah Penambahan Unit pembangkit Baru.....	37
3.2.8. Perhitungan Setelan OCR dan GFR Setelah Penambahan Unit Pembangkit Baru.....	38

3.3. Perbandingan Hasil Koordinasi OCR dan GFR Sebelum dan Setelah Penambahan Unit Pembangkit Baru	38
3.4. Kesimpulan dan Saran	38
BAB IV PERHITUNGAN DAN ANALISIS	39
4.1. Analisis Sistem Gardu Induk Grati Sebelum Penambahan Unit Pembangkit Baru.....	39
4.1.1. Unit Pembangkit	41
4.1.2. Trafo Utama.....	41
4.1.3. Saluran	42
4.1.4. Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat Sebelum Penambahan Unit Pembangkit Baru.....	43
4.1.4.1. Perhitungan Impedansi Ekuivalen Urutan Positif (Z_1)	45
4.1.4.2. Perhitungan Impedansi Ekuivalen Urutan Negatif (Z_2).....	49
4.1.4.3. Perhitungan Impedansi Ekuivalen Urutan Nol (Z_0)	52
4.2. Analisis Sistem Gardu Induk Grati Setelah Penambahan Unit Pembangkit Baru.....	57
4.2.1. Unit Pembangkit Baru	57
4.2.2. Trafo Utama Baru	58
4.2.3. Saluran Baru	58
4.2.4. Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat Setelah Penambahan Unit Pembangkit Baru.....	58
4.2.4.1. Perhitungan Impedansi Ekuivalen Urutan Positif (Z_1)	60
4.2.4.2. Perhitungan Impedansi Ekuivalen Urutan Negatif (Z_2).....	64
4.2.4.3. Perhitungan Impedansi Ekuivalen Urutan Nol (Z_0)	67
4.3. Setelan OCR dan GFR Sebelum dan Setelah Penambahan Unit Pembangkit Baru	72
4.3.1. Setelan OCR dan GFR Sebelum Penambahan Unit Pembangkit Baru	72
4.3.1.1. Setelan Rele Arus Lebih Sebelum Penambahan Unit Pembangkit Baru.....	73
4.3.1.2. Setelan Rele Gangguan Tanah Sebelum Penambahan Unit Pembangkit Baru.....	74
4.3.2. Setelan OCR dan GFR Setelah Penambahan Unit Pembangkit Baru.....	77
4.3.2.1. Setelan Rele Arus Lebih Setelah Penambahan Unit Pembangkit Baru.....	77



4.3.2.2. Setelan Rele Gangguan Tanah Setelah Penambahan Unit

Pembangkit Baru..... 79

4.3.3. Analisis Perbandingan Koordinasi OCR dan GFR Sebelum dan Setelah

Penambahan Unit Pembangkit Baru 81

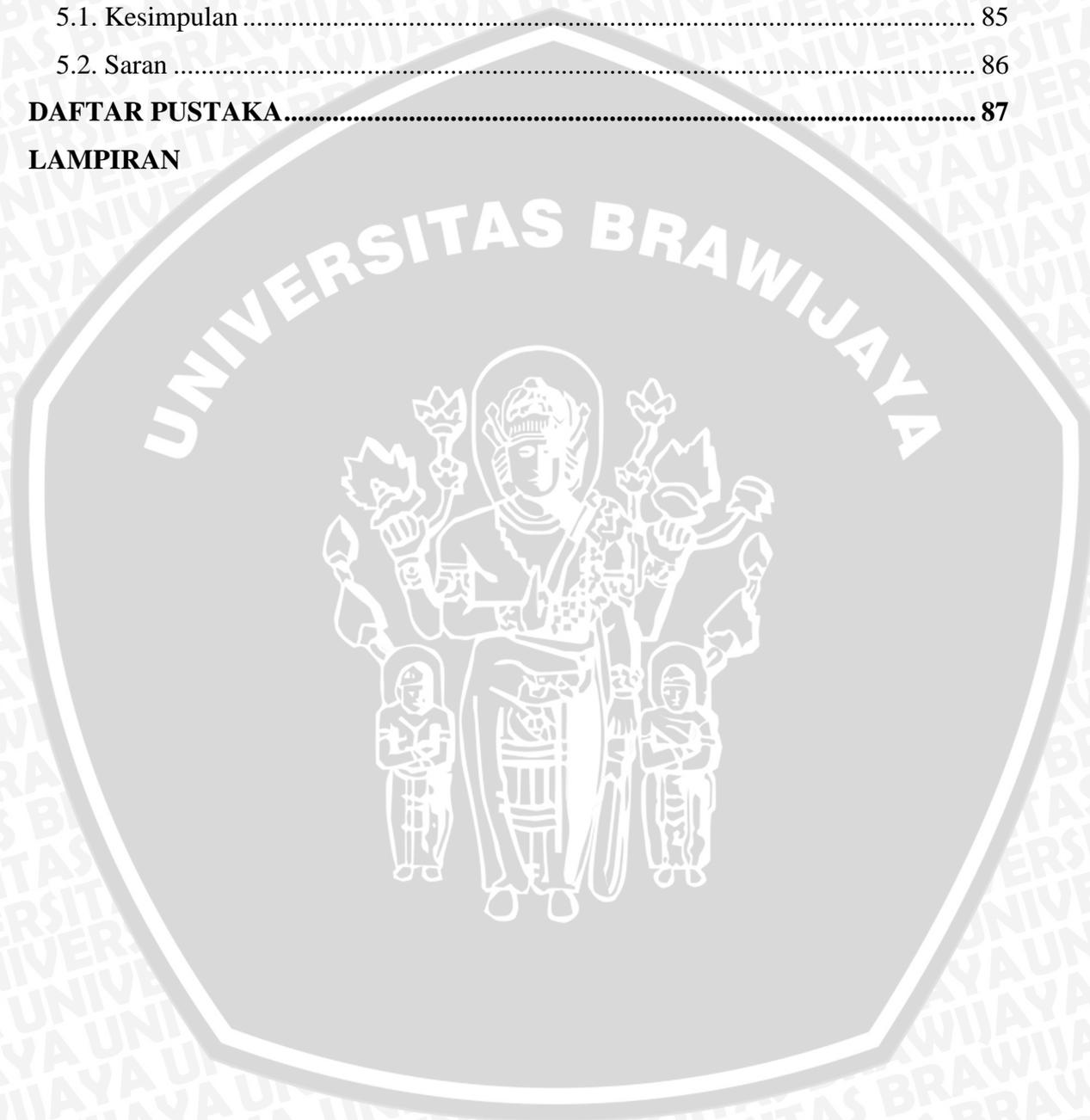
BAB V PENUTUP 85

5.1. Kesimpulan 85

5.2. Saran 86

DAFTAR PUSTAKA..... 87

LAMPIRAN



DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Koefisien <i>Time Dial</i>	15
Tabel 4.1	Spesifikasi Pembangkit PLTGU Grati.....	41
Tabel 4.2	Spesifikasi Trafo Utama PLTGU Grati	42
Tabel 4.3	Spesifikasi Saluran PLTGU Grati	42
Tabel 4.4	Impedansi Urutan Masing-masing Komponen PLTGU Grati Sebelum Penambahan Unit Pembangkit Baru	44
Tabel 4.5	Impedansi Urutan Ekuivalen Pada Masing-masing Titik Gangguan di PLTGU Grati Sebelum Penambahan Unit Pembangkit Baru.....	55
Tabel 4.6	Arus Gangguan Hubung Singkat Pada Masing-masing Titik Gangguan di PLTGU Grati Sebelum Penambahan Unit Pembangkit Baru.....	56
Tabel 4.7	Nilai Impedansi Urutan Komponen Sub-Sistem Baru.....	60
Tabel 4.8	Impedansi Urutan Ekuivalen Pada Masing-masing Titik Gangguan di PLTGU Grati Setelah Penambahan Unit Pembangkit Baru	70
Tabel 4.9	Arus Gangguan Hubung Singkat Pada Masing-masing Titik Gangguan di PLTGU Grati Setelah Penambahan Unit Pembangkit Baru.....	72
Tabel 4.10	Data OCR dan GFR Pada Keluaran Trafo Utama Gardu Induk Grati	72
Tabel 4.11	Setelan OCR dan GFR Pada Masing-masing Titik Gangguan Sebelum Penambahan Unit Pembangkit Baru	76
Tabel 4.12	Setelan OCR dan GFR Pada Masing-masing Titik Gangguan Setelah Penambahan Unit Pembangkit Baru.....	81
Tabel 4.13	Perbandingan Setelan OCR dan GFR Sebelum dan Setelah Penambahan Unit Pembangkit Baru Pada Sisi Keluaran Trafo Utama	83



DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Seketika.....	9
Gambar 2.2	Rangkaian Rele Arus Lebih waktu Seketika	9
Gambar 2.3	Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Tertentu	11
Gambar 2.4	Rangkaian Rele Arus Lebih Waktu Tertentu.....	11
Gambar 2.5.	Rangkaian Rele Arus Lebih Waktu Terbalik.....	12
Gambar 2.6.	Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Terbalik	13
Gambar 2.7	Rangkaian Hubungan Tiga OCR dengan Satu GFR.....	18
Gambar 2.8	Rangkaian Hubungan Dua OCR dengan Satu GFR	18
Gambar 2.9	Rangkaian Deteksi Gangguan Antar Fasa	19
Gambar 2.10	Rangkaian Deteksi Gangguan Satu Fasa ke Tanah.....	19
Gambar 2.11	Sistem Jaringan Listrik Sederhana.....	21
Gambar 2.12	Tiga Himpunan Fasor Seimbang yang Merupakan Komponen Simetris	
Gambar 2.23	dari Tiga Fasor Tidak Seimbang	23
Gambar 2.13	Penjumlahan Secara Grafis Komponen-komponen Untuk Mendapatkan	
Gambar 2.23	Fasor-fasor Tidak Seimbang	24
Gambar 2.14	Pembangkit dengan Z_n : (a) Simbol Diagram Garis	
Gambar 2.14	(b) Rangkaian Ekuivalen Impedansi Urutan Nol nya	27
Gambar 2.15	Trafo Daya Tiga Belitan : (a) Diagram Belitan	
Gambar 2.15	(b) Rangkaian Ekuivalen Impedansi Belitan	28
Gambar 2.16	(a) Hubungan Jaringan Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa	
Gambar 2.16	(b) Rangkaian Urutan Ekuivalen Gangguan Tiga Fasa	29
Gambar 2.17	(a) Hubungan Jaringan Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa	
Gambar 2.17	(b) Rangkaian Urutan Ekuivalen Gangguan Antar Fasa.....	30
Gambar 2.18	(a) Hubungan Jaringan Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah	
Gambar 2.18	(b) Rangkaian Urutan Ekuivalen Gangguan Satu Fasa ke Tanah.....	31
Gambar 2.19	(a) Hubungan Jaringan Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah	
Gambar 2.19	(b) Rangkaian Urutan Ekuivalen Gangguan Dua Fasa ke Tanah	32
Gambar 3.1	Diagram Alir Metodologi	33
Gambar 3.2	Diagram Alir Analisis Koordinasi OCR dan GFR Sebelum dan Sesudah	
Gambar 3.2	Penambahan Unit Pembangkit Baru Pada Sistem Gardu Induk Grati.....	35
Gambar 4.1	<i>Single Line Diagram</i> Sistem Pembangkit PLTGU Grati.....	40

Gambar 4.2	Rangkaian Impedansi Urutan Positif Pada Titik Gangguan 1	45
Gambar 4.3	(a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.2	
	(b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.3 (a)	46
Gambar 4.4	(a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.3 (b)	
	(b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.4 (a)	47
Gambar 4.5	(a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.4 (b)	
	(b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.5 (a)	48
Gambar 4.6	(a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.5 (b)	
	(b) Rangkaian Impedansi Ekvivalen Urutan Positif (Z_1) Pada Titik	
	Gangguan 1	48
Gambar 4.7	Rangkaian Impedansi Urutan Negatif Pada Titik Gangguan 1	49
Gambar 4.8	(a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.7	
	(b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.8 (a)	50
Gambar 4.9	(a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.8 (b)	
	(b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.9 (a)	50
Gambar 4.10	(a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.9 (b)	
	(b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.10 (a)	51
Gambar 4.11	(a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.10 (b)	
	(b) Rangkaian Impedansi Ekvivalen Urutan Negatif (Z_2) Pada Titik	
	Gangguan 1	51
Gambar 4.12	Rangkaian Impedansi Urutan Nol Pada Titik Gangguan 1	52
Gambar 4.13	(a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.12	
	(b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.13 (a)	53
Gambar 4.14	(a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.13 (b)	
	(b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.14 (a)	54
Gambar 4.15	(a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.14 (b)	
	(b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.15 (a)	
	(c) Rangkaian Impedansi Ekvivalen Urutan Nol (Z_0) Pada Titik	
	Gangguan 1	54
Gambar 4.16	<i>Single Line Diagram</i> 500 kV PLTGU Grati Setelah Penambahan Unit	
	Pembangkit Baru	57
Gambar 4.17	Rangkaian Impedansi Urutan Positif Pada Titik Gangguan 1 Setelah	
	Penambahan Unit Pembangkit Baru	60
Gambar 4.18	(a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.17	



Gambar 2.16 (b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.18 (a)	61
Gambar 4.19 (a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.18 (b)	
Gambar 2.16 (b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.19 (a)	62
Gambar 4.20 (a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.19 (b)	
Gambar 2.16 (b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.20 (a)	63
Gambar 4.21 (a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.20 (b)	
Gambar 2.16 (b) Rangkaian Impedansi Ekuivalen Urutan Positif (Z_1) Pada Titik	
Gambar 4.21 (b) Gangguan 1	63
Gambar 4.22 Rangkaian Impedansi Urutan Negatif Pada Titik Gangguan 1 Setelah	
Gambar 2.16 Penambahan Unit Pembangkit Baru	64
Gambar 4.23 (a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.22	
Gambar 2.16 (b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.23 (a)	65
Gambar 4.24 (a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.23 (b)	
Gambar 2.16 (b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.24 (a)	66
Gambar 4.25 (a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.24 (b)	
Gambar 2.16 (b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.25 (a)	66
Gambar 4.26 (a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.25 (b)	
Gambar 2.16 (b) Rangkaian Impedansi Ekuivalen Urutan Negatif (Z_2) Pada Titik	
Gambar 2.16 (b) Gangguan 1	67
Gambar 4.27 Rangkaian Impedansi Urutan Nol Pada Titik Gangguan 1 Setelah	
Gambar 2.16 Penambahan Unit Pembangkit Baru	67
Gambar 4.28 (a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.27 (b)	
Gambar 2.16 (b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.28 (a)	68
Gambar 4.29 (a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.28 (b)	
Gambar 2.16 (b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.29 (a)	69
Gambar 4.30 (a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.29 (b)	
Gambar 2.16 (b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.30 (a)	
Gambar 2.16 (c) Rangkaian Impedansi Ekuivalen Urutan Nol (Z_0) Pada Titik	
Gambar 2.16 (c) Gangguan 1	70
Gambar 4.31 Perbandingan Arus Gangguan Tertinggi (3Φ) Pada Masing-masing Titik	
Gambar 4.31 Gangguan Antara Sebelum dan Setelah Penambahan Unit Pembangkit	
Gambar 4.31 Baru	82

DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul	Halaman
Lampiran I	Perhitungan Impedansi Ekuivalen Urutan Positif, Negatif, dan Nol.....	89
Lampiran II	Generator <i>Technical Data</i>	98
Lampiran III	Data Desain Unit Pembangkit Baru PLTGU Grati	101
Lampiran IV	<i>Single Line Diagram</i> 150 kV dan 500 kV PLTGU Grati	104
Lampiran V	Lembar Persetujuan Pengambilan Data di PLTGU Grati	107



ABSTRAK

Novan Ardita Pratama, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Oktober 2015, *Analisis Koordinasi Rele Arus Lebih dan Rele Gangguan Tanah Sebelum dan Sesudah Penambahan Unit Pembangkit Baru Pada PLTGU Grati*, Dosen Pembimbing : Ir. Soemarwanto, M.T. dan Ir. Teguh Utomo, M.T.

Skripsi ini membahas tentang koordinasi rele arus lebih (*Over Current Relay* disingkat OCR) dan rele gangguan tanah (*Ground Fault Relay* disingkat GFR) pada PLTGU Grati. Penambahan unit pembangkit baru tentu diikuti dengan risiko gangguan kelistrikan yang lebih besar, khususnya gangguan hubung singkat. Dalam menjaga penyaluran energi listrik agar berlangsung dengan baik, maka diperlukan analisis terhadap koordinasi OCR dan GFR sisi keluaran trafo utama pada masing-masing pembangkit karena memiliki risiko arus gangguan hubung singkat terbesar. Permasalahan yang muncul inilah yang dianalisis, apakah arus gangguan hubung singkat setelah penambahan unit pembangkit baru justru semakin turun atau meningkat, dan dengan perubahan besar arus gangguan hubung singkat tersebut apakah perlu dilakukan perubahan terhadap setelan OCR dan GFR dalam menjaga peralatan instalasi kelistrikan dari gangguan hubung singkat. Analisis ini dilakukan dengan menghitung nilai arus gangguan tiga fasa, antar fasa, dua fasa ke tanah dan satu fasa ke tanah sebelum dan setelah penambahan unit pembangkit baru dengan metode perhitungan impedansi urutan ekuivalen sistem sesuai titik-titik gangguan yang dianalisis yaitu keluaran trafo utama masing-masing pembangkit. Setelah mendapatkan besar arus gangguan hubung singkat, langkah selanjutnya menentukan setelan OCR dan GFR untuk memproteksi dari arus gangguan hubung singkat tersebut. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa penambahan unit pembangkit baru membuat nilai arus gangguan hubung singkat meningkat, khususnya arus gangguan maksimum, yaitu dari 11772.74842 A menjadi 13100.17270 A. Namun naiknya arus gangguan hubung singkat setelah penambahan unit pembangkit baru, nilai arus gangguan hubung singkat masih dibawah nilai *breaking current* PMT yang digunakan, sehingga secara teknis PMT masih bekerja dengan baik meskipun ditambahkan unit pembangkit baru. Berdasar hasil perhitungan yang dipengaruhi naiknya arus gangguan hubung singkat setelah penambahan unit pembangkit baru pada PLTGU Grati, mengakibatkan adanya perubahan setelan OCR dan GFR pada sisi keluaran trafo utama masing-masing pembangkit, perubahan yang dimaksud adalah setelan arus dan TMS (*Time Multiple Setting*).

Kata kunci – Koordinasi OCR dan GFR, Arus Gangguan Hubung Singkat, PLTGU Grati.

ABSTRACT

Novan Ardita Pratama, Electrical Engineering Course, Technic Faculty Brawijaya University, October 2015, *Analysis Coordination Over Current Relay and Ground Fault Relay Before and After Adding New Generator Unit on PLTGU Grati*, Supervisor : Ir. Soemarwanto, M.T. and Ir. Teguh Utomo, M.T.

This essay is discussing about coordination over current relay (OCR) and ground fault relay (GFR) on PLTGU Grati. Adding a new generator unit of course being followed by risk of higher electrical disturbance especially short circuit fault. On maintaining electrical energy distribution occurring well, so analysis coordination OCR and GFR on outgoing main transformer side of each generator is needed because it is having the highest risk of short circuit current. This occurring problem is the one who being analyze, is short circuit current is increasing or decreasing after the addition of new generator unit, and with change value of that short circuit current is there needed some adjustment on the OCR and GFR on maintaining electrical equipment from short circuit disturbance. This analysis is done by counting current fault value three phase, phase to phase, two phase to ground, and one phase to ground before and after increasing of new generator unit with equivalent sequential impedance system calculating method according to fault points that being analyze that is each generators main transformer output. After getting value of short circuit current, next step is deciding setting on OCR and GFR for protecting from that short circuit current. The result of calculation indicates that short circuit current is increasing after addition of new generator unit, especially maximum fault current, that is from 11772.74842 A to 13100.17270 A. But the increasing of short circuit current after addition of new generator unit, is still below breaking current of circuit breaker that being used, so technically circuit breaker is still worked well even a new generator being added. Based on result impact of increasing of short circuit current after the addition of new generator unit on PLTGU Grati resulting of change of OCR and GFR setting on outgoing side on each generator main transformer, the current setting and TMS (Time Multiple Setting).

Keywords – Coordination OCR and GFR, Short Circuit Current Fault, PLTGU Grati.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada saat ini kebutuhan energi listrik meningkat dengan cepat. Hal ini dikarenakan semakin berkembangnya perekonomian Indonesia sehingga banyak pertumbuhan industri, infrastruktur dan perumahan yang membutuhkan pasokan energi listrik. Selain itu pesatnya perkembangan teknologi peralatan sehari-hari yang tidak bisa lepas dari energi listrik dalam penggunaannya juga berperan dalam meningkatkan kebutuhan atas permintaan energi listrik.

Kebutuhan energi listrik ini harus dapat dipenuhi oleh Perusahaan Listrik Negara (PT. PLN (Persero)) sebagai penyedia dan pemasok energi listrik kepada konsumen. Dalam perkembangannya kebutuhan energi listrik yang diminta oleh masyarakat semakin besar. Selain itu, permintaan atas kebutuhan energi listrik di daerah baru terus meningkat, maka diperlukan penambahan pembangkit, saluran transmisi dan saluran distribusi energi listrik baru.

Sejalan dengan perkembangan kawasan industri yang pesat, khususnya di Jawa Timur, maka permintaan energi listrik juga semakin besar, sehingga perlu diikuti penyediaan energi listrik baik dengan cara membangun pembangkit baru maupun dengan cara menambah unit pembangkit baru pada pusat pembangkit listrik yang sudah ada. Untuk memenuhi kebutuhan permintaan energi listrik tersebut, PT. Indonesia Power sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Gas-Uap disingkat PLTGU yang berada di Grati, Kabupaten Pasuruan menambah satu unit pembangkit baru.

Penambahan unit pembangkit baru pada suatu sistem tentu diikuti dengan risiko gangguan kelistrikan yang lebih besar, seperti yang terjadi di PLTGU Grati yang menambah satu unit pembangkit baru. Salah satu gangguan yang paling sering terjadi adalah gangguan hubung singkat. Gangguan hubung singkat adalah terjadinya hubungan antar penghantar yang bertegangan secara langsung atau melalui media seperti ranting pohon atau layang-layang sehingga menyebabkan aliran arus yang tidak normal (sangat besar) pada sistem jaringan listrik, baik hubung singkat antar kawat fasa maupun antara fasa dengan tanah (Sarimun, 2012 : 66). Besarnya arus gangguan hubung singkat yang mungkin terjadi dalam suatu sistem kelistrikan perlu diketahui sebelum gangguan sesungguhnya terjadi. Dalam analisis sistem tenaga listrik, besar arus

gangguan hubung singkat terbesar terdapat pada sistem pembangkit, terutama pada sisi keluaran trafo utama (Sarimun, 2012 : 67). Hal ini dikarenakan pada sistem tersebut memiliki nilai tegangan yang besar yang berbanding lurus terhadap nilai arus gangguan hubung singkat dan besar impedansi yang digunakan yaitu impedansi di sisi pembangkit bukan pada sisi beban. Gangguan hubung singkat yang terjadi pada sistem pembangkit tersebut dapat mengakibatkan arus gangguan yang terjadi mengalir pada saluran transmisi dan distribusi, sehingga apabila dibiarkan dapat menimbulkan gangguan yang cukup besar pada sistem jaringan.

Dalam menjaga kelangsungan penyaluran energi listrik agar dapat tersalur dengan baik ke konsumen, maka diperlukan sistem proteksi yang menjaga agar penyaluran energi listrik ke konsumen dapat terus berjalan tanpa mengalami gangguan. Pada umumnya sistem proteksi kelistrikan didominasi oleh peralatan rele. Rele merupakan peralatan utama dalam sistem proteksi karena merupakan peralatan pertama yang merasakan adanya gangguan, serta sebagai pemacu PMT bekerja agar gangguan tidak menjalar ke daerah lainnya (Pandjaitan, 2012 : 23). PLTGU Grati lokasinya sangat strategis karena memasok beberapa kawasan industri di Jawa Timur, sehingga diperlukan penyetelan rele yang baik agar dapat memproteksi peralatan instalasi kelistrikan dari arus gangguan hubung singkat pada khususnya. Oleh karena itu dalam perencanaan penambahan unit pembangkit baru, analisis terhadap setelan rele dan koordinasi antar rele perlu dilakukan untuk menjaga keandalan kerja sistem tenaga listrik dari gangguan arus lebih pada khususnya, terutama pada sisi keluaran trafo utama sistem pembangkit yang memiliki potensi memiliki arus gangguan hubung singkat terbesar dan sebagai penyuplai energi listrik ke sistem transmisi. Selain itu, penelitian ini merupakan pengembangan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh saudari Galuh Indra Permadi yang meneliti perbandingan besar arus gangguan ke tanah antara sebelum dan sesudah penambahan unit pembangkit baru pada PLTGU Grati.

Rele yang mengatasi gangguan hubung singkat dalam hal ini adalah rele arus lebih (*over current relay* disingkat OCR) dan rele gangguan tanah (*ground fault relay* disingkat GFR), dimana rele tersebut memproteksi gangguan hubung singkat fasa-fasa maupun fasa-tanah (PLN *Corporate University*, tanpa tahun : 4). Untuk keperluan penyetelan rele pengaman, besar arus gangguan hubung singkat perlu dihitung pada titik gangguan sesuai proteksi terhadap peralatan yang dilakukan, agar setelan rele untuk mengantisipasi terjadinya gangguan hubung singkat pada khususnya sesuai dengan nilai yang diharapkan, dalam hal ini yang dimaksud adalah rele arus lebih dan rele gangguan

tanah, sehingga rele dapat bekerja sesuai spesialisasi masing-masing. Oleh karena itu, dalam analisis penelitian ini akan diteliti perbandingan koordinasi rele arus lebih dan rele gangguan tanah sebelum dan sesudah penambahan pembangkit baru pada masing-masing keluaran trafo utama di PLTGU Grati.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana besar arus gangguan hubung singkat baik gangguan hubung singkat 3 fasa, antar fasa, 1 fasa ketanah dan 2 fasa ke tanah pada masing-masing titik gangguan (keluaran trafo utama pada masing-masing kelompok pembangkit bus 150 kV dan 500 kV) baik sebelum dan sesudah penambahan unit pembangkit baru di PLTGU Grati.
2. Bagaimana setelan rele arus lebih dan rele gangguan tanah untuk mengantisipasi terjadinya gangguan hubung singkat baik sebelum dan sesudah penambahan unit pembangkit baru pada masing-masing keluaran trafo utama sesuai kelompok pembangkit yang menyuplainya (kelompok pembangkit bus 150 kV dan 500 kV) di PLTGU Grati.

1.3 Batasan Masalah

Penelitian yang membahas perbandingan koordinasi rele arus lebih dan rele gangguan tanah sebelum dan sesudah penambahan unit pembangkit baru pada PLTGU Grati ini memiliki batasan masalah sebagai berikut :

1. Analisis terhadap besar arus gangguan hubung singkat dilakukan di titik-titik yang ditentukan (masing-masing keluaran trafo utama pada kelompok pembangkit bus 150 kV dan 500 kV) dari PLTGU Grati baik sebelum maupun sesudah penambahan unit pembangkit baru.
2. Analisis terhadap koordinasi rele gangguan hubung singkat dilakukan di keluaran trafo utama yang disuplai masing-masing pembangkit yang terhubung ke bus 150 kV dan 500 kV, baik sebelum penambahan pembangkit baru maupun sesudah penambahan unit pembangkit baru.
3. Perhitungan yang dilakukan diperoleh dari data komponen pembangkit dan Gardu Induk Grati yang sudah beroperasi serta berdasarkan data desain unit pembangkit baru yang diperoleh dari PLTGU Grati.

1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis koordinasi rele arus lebih dan rele gangguan tanah pada keluaran trafo utama yang disuplai oleh masing-masing pembangkit yang terhubung ke bus 150 kV dan 500 kV antara sebelum dan setelah penambahan unit pembangkit baru pada PLTGU Grati.

1.5 Manfaat

Terdapat beberapa manfaat dari hasil penelitian ini, yaitu bagi penulis dan bagi PLTGU Grati. Manfaat bagi penulis adalah memberikan pengetahuan tentang koordinasi rele arus lebih dan rele gangguan tanah serta menyelesaikan syarat kelulusan berupa skripsi. Manfaat bagi PLTGU Grati atau perusahaan lain yang menambah unit pembangkit baru lainnya adalah untuk memahami kondisi koordinasi rele arus lebih dan rele gangguan tanah pada keluaran trafo utama yang disuplai masing-masing unit pembangkit, baik sebelum maupun setelah penambahan unit pembangkit baru.

1.6 Sistematika Pembahasan

Sistematika pembahasan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- BAB I** : Memuat latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat, dan sistematika pembahasan.
- BAB II** : Membahas teori dasar mengenai rele, setelan dan koordinasi dari rele arus lebih dan rele gangguan tanah, perhitungan impedansi urutan jaringan, dan analisis arus gangguan hubung singkat.
- BAB III** : Menjelaskan tentang tahapan penyelesaian penelitian yang meliputi survei dan pengumpulan data, prosedur perhitungan dan analisis perbandingan koordinasi rele arus lebih dan rele gangguan tanah antara sebelum dan setelah penambahan unit pembangkit baru pada PLTGU Grati, serta kesimpulan dan saran.
- BAB IV** : Menjelaskan tentang langkah-langkah perhitungan, hasil perhitungan serta analisis terhadap perhitungan arus gangguan yang selanjutnya digunakan untuk perhitungan dan analisis koordinasi rele arus lebih dan rele gangguan tanah baik sebelum maupun setelah penambahan unit pembangkit baru.
- BAB V** : Memuat kesimpulan dan saran berdasarkan apa yang telah diperoleh dari hasil penelitian.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Proteksi Tenaga Listrik

Secara umum pengertian sistem proteksi tenaga listrik adalah suatu susunan perangkat proteksi secara lengkap yang terdiri dari perangkat utama dan perangkat-perangkat lain yang dibutuhkan untuk melakukan fungsi proteksi terhadap kondisi-kondisi abnormal (Pandjaitan, 2012 : 36). Kondisi abnormal dalam hal ini merupakan suatu bentuk gangguan yang disebabkan oleh suatu kegagalan alat yang tidak bekerja secara semestinya ataupun karena faktor alam yang dapat menyebabkan terganggunya kontinuitas pelayanan tenaga listrik kepada konsumen. Adapun berikut ini merupakan peralatan sistem Proteksi tenaga listrik, yaitu : (PLN Corporate University, Tanpa Tahun : 1)

1. Rele, sebagai alat perasa untuk mendeteksi adanya gangguan yang selanjutnya memberi perintah *trip* kepada pemutus tenaga (PMT).
2. Trafo arus dan trafo tegangan sebagai alat yang mentransfer besaran listrik primer dari sistem yang diamankan ke rele (besaran listrik sekunder).
3. Pemutus tenaga (PMT) untuk memisahkan bagian sistem yang terganggu.
4. Baterai beserta alat pengisi, sebagai sumber tenaga untuk bekerjanya rele (peralatan bantu *tripping*).
5. Pengawatan yang terdiri dari sirkuit sekunder (arus dan tegangan), sirkuit *tripping* dan sirkuit peralatan bantu.

Masing-masing komponen sistem proteksi tenaga listrik yang disebutkan di atas mempunyai fungsi sebagai berikut : (Pandjaitan, 2012 : 15)

1. Elemen pengindera, Elemen ini berfungsi untuk merasakan besaran-besaran listrik, seperti arus, tegangan, frekuensi, dan sebagainya tergantung rele yang dipergunakan. Pada bagian ini besaran yang masuk akan dirasakan keadaannya, apakah keadaan yang diproteksi itu mendapatkan gangguan atau dalam keadaan normal, untuk selanjutnya besaran tersebut dikirimkan ke elemen pembanding.
2. Elemen pembanding, Elemen ini berfungsi menerima besaran setelah terlebih dahulu besaran itu diterima oleh elemen oleh elemen pengindera untuk membandingkan besaran listrik pada saat keadaan normal dengan besaran kerja rele.

3. Elemen pengukuran, Elemen ini berfungsi untuk mengadakan perubahan secara cepat pada besaran ukurnya dan akan segera memberikan isyarat untuk membuka PMT atau memberikan sinyal.

2.1.1 Tujuan sistem proteksi

Gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik kebanyakan merupakan gangguan hubung singkat, yang akan menimbulkan arus gangguan yang besar pada sistem tenaga listrik tersebut (Pandjaitan, 2012 : 41). Arus gangguan yang cukup besar tersebut apabila tidak segera dihilangkan akan merusak peralatan yang dilalui oleh arus gangguan tersebut. Untuk melepaskan suatu daerah yang terganggu pada suatu sistem tenaga listrik agar tidak menular ke daerah lainnya 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. Berdasarkan uraian di atas dapat dijelaskan bahwa tujuan dari sistem proteksi adalah : (Hutauruk, 1991 : 48)

1. Meminimalisir kerusakan peralatan listrik.
2. Mempercepat melokalisir daerah yang terganggu, sehingga daerah yang terganggu menjadi sekecil mungkin.
3. Memberikan pelayanan listrik dengan keandalan yang tinggi.
4. Mengamankan manusia dari bahaya listrik.

2.1.2 Pengertian rele secara umum

Rele merupakan perangkat elektronik yang didesain untuk merespon sebuah masukan tertentu dengan kondisi tertentu, sehingga ketika kondisi telah penuh alat tersebut memberikan sinyal keluaran yang digunakan perangkat lain untuk melakukan operasi pada sistem (Samaulah, 2004 : 15). Rele beroperasi pada keadaan yang tidak bisa ditoleransi oleh sistem. Rele merupakan peralatan yang sangat penting dalam sistem proteksi dan dipasang di semua peralatan sistem daya elektrik, mulai dari sisi pembangkitan, transmisi, distribusi dan sisi beban. Input yang digunakan oleh rele merupakan besaran elektrik (arus, tegangan, dan daya), mekanis, *thermal*, atau kombinasi dari besaran-besaran di atas.

Fungsi utama dari rele pengaman pada sistem tenaga listrik adalah sebagai berikut : (Samaulah, 2004 : 16)

1. Merasakan, mengukur dan menentukan bagian sistem yang terganggu serta memisahkan secara tepat sehingga sistem lainnya yang tidak terganggu dapat beroperasi secara normal.
2. Mengurangi kerusakan yang lebih parah dari peralatan yang terganggu.
3. Mengurangi pengaruh gangguan terhadap bagian sistem yang lain yang tidak terganggu di dalam sistem tersebut.
4. Memperkecil bahaya bagi manusia.

2.1.3 Syarat rele pengaman

Dalam perencanaan sistem proteksi untuk mendapatkan suatu sistem proteksi yang baik, diperlukan persyaratan agar sebuah rele pengaman dapat bekerja sesuai semestinya untuk menjamin keandalan dari sistem tenaga listrik. Persyaratan rele pengaman tersebut antara lain sebagai berikut : (Sarimun, 2012 : 10)

1. Sensitif
2. Selektif
3. Cepat
4. Handal
5. Ekonomis
6. Sederhana

2.2 Rele Arus Lebih

Rele arus lebih atau yang lebih dikenal dengan OCR (*Over Current Relay*) merupakan peralatan yang mensinyalir adanya arus lebih, baik yang disebabkan oleh adanya gangguan hubung singkat atau beban lebih yang dapat merusak peralatan sistem tenaga listrik yang berada dalam wilayah proteksinya (Sunarto, 1993 : 138). Rele arus lebih dapat digunakan hampir pada seluruh pola pengaman sistem tenaga listrik, lebih lanjut rele ini dapat digunakan sebagai pengaman utama maupun sebagai pengaman cadangan.

Pada keluaran trafo utama, rele arus lebih hanya berfungsi sebagai pengaman cadangan (*back up protection*) untuk gangguan eksternal, selanjutnya rele arus lebih dapat mengaktifkan PMT pada sisi dimana rele terpasang. Rele akan bekerja apabila memenuhi keadaan sebagai berikut :

$I_f > I_p$	rele bekerja	(<i>trip</i>)
$I_f < I_p$	rele tidak bekerja	(<i>block</i>)

I_f merupakan besar arus saat gangguan terjadi yang diukur menurut belitan sekunder dari trafo arus (*current transformer* disingkat CT), sedangkan $I_{pick up}$ (I_p) merupakan arus kerja yang dinyatakan menurut belitan sekunder trafo arus. Pengaman menggunakan rele arus lebih memiliki beberapa keuntungan sebagai berikut : (Preve, 2006 : 67)

- Dapat mengamankan arus lebih, yang terjadi karena hubung singkat atau beban lebih.
- Dapat berfungsi sebagai pengaman utama atau sebagai pengaman cadangan.
- Penyetelan mudah dan harganya relatif murah.

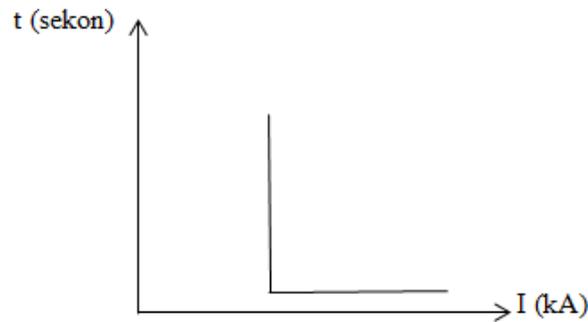
2.2.1 Jenis rele arus lebih berdasarkan karakteristik waktu

Secara umum jenis rele arus lebih dibedakan berdasarkan karakteristik waktu kerjanya. Berikut ini merupakan jenis-jenis rele arus lebih berdasarkan karakteristik waktu kerjanya.

2.2.1.1 Rele arus lebih waktu seketika (Instan)

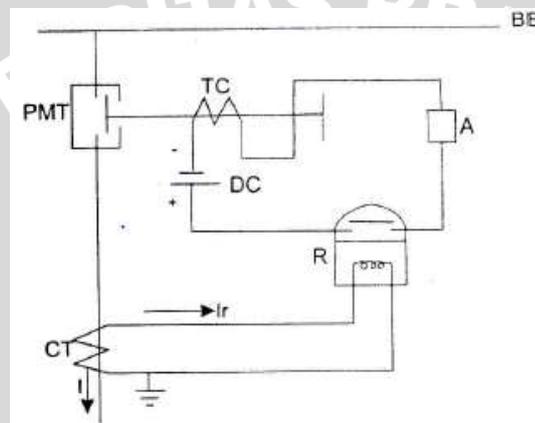
Rele arus lebih waktu seketika adalah rele arus lebih yang paling sederhana, dimana rele arus lebih jenis ini tidak mempunyai waktu tunda atau waktu kerja sesaat atau dengan kata lain jangka waktu kerja rele mulai mengalami *pick up* sampai selesainya kerja rele sangat singkat yakni sebesar 20-100 milidetik sehingga waktu yang singkat ini bisa diabaikan (PLN *Corporate University*, Tanpa Tahun : 1). Rele jenis ini memiliki waktu kerja yang sangat cepat dibandingkan jenis rele lainnya.

Rele arus lebih seketika bekerja pada gangguan yang paling dekat dengan lokasi dimana rele terpasang atau dibedakan berdasarkan level gangguan secara lokasi sistem. Karakteristik rele arus lebih seketika kerjanya berdasarkan pada besarnya arus gangguan hubung singkat yang dipilih, ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu seketika
 Sumber: Saksomo, Tanpa Tahun : 28

Rangkaian kerja rele arus lebih waktu seketika ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Rangkaian Rele Arus Lebih waktu Seketika
 Sumber: Saksomo, Tanpa Tahun : 27

keterangan :

- BB : Busbar.
- PMT : Pemutus (*circuit breaker*).
- DC : Sumber arus searah.
- TC : Kumpan pemutus (*tripping coil*).
- CT : trafo arus (*current transformator*).
- A : Alarm.
- R : Rele arus lebih waktu seketika (*instan*).
- T : Rele arus lebih waktu tertentu (*definite*).
- I : Arus beban.
- I_r : Arus yang melewati kumpan rele.

Berdasarkan Gambar 2.2 dapat dijelaskan bahwa saat arus beban naik melebihi harga yang ditentukan, maka harga I_r (arus yang melewati kumpan rele) juga akan

naik. Bila naiknya I_r ini melebihi harga operasi rele maka rele arus lebih akan beroperasi. Kerja rele akan ditandai dengan konduktor gerak rele yang menutup kontak sehingga rangkaian pemutus akan tertutup. Karena pada rangkaian ini terdapat sumber arus DC, maka pada kumparan pemutus akan dialiri arus DC yang selanjutnya akan mengerjakan kontak pemutus sehingga bagian sistem yang akan diamankan menjadi terbuka.

Pada praktiknya, penggunaan rele arus lebih waktu seketika tidak terlalu efektif dalam menyelesaikan gangguan, hal ini dikarenakan besar arus gangguan ditentukan oleh letak gangguan dari sumber tegangan, semakin dekat gangguan dengan sumber maka arus gangguannya akan semakin besar namun waktu pemutusan gangguan tersebut akan lebih lama begitu pula sebaliknya. Oleh karena itu dalam penyelesaiannya perlu ditambahkan rele arus lebih instan lagi agar memperbaiki catatan waktu dalam pemutusan gangguan tersebut dari sistem. Penyetelan rele arus lebih waktu seketika dihitung dengan persamaan berikut : (Pandjaitan, 2012 : 74)

$$I_{instan\ sekunder} = \frac{I_{instan}}{I_{set\ primer}} \quad (2-1)$$

dengan :

$I_{instan\ sekunder}$: Setelan arus instan bagian sekunder (A).

I_{instan} : Setelan arus Instan (A).

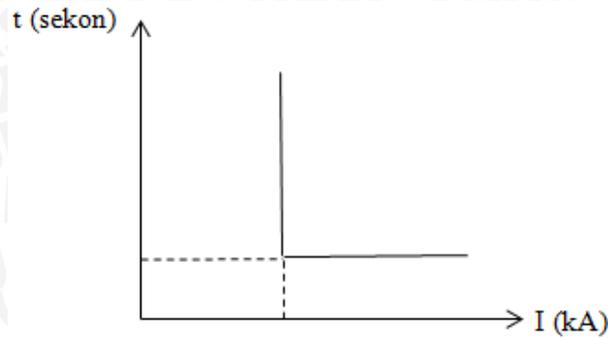
$I_{set\ primer}$: Setelan arus bagian primer (A).

Sedangkan untuk setelan besarnya arus instan adalah : (Sarimun, 2012 : 143)

$$I_{instan} = 4 \times I_{set\ primer} \quad (2-2)$$

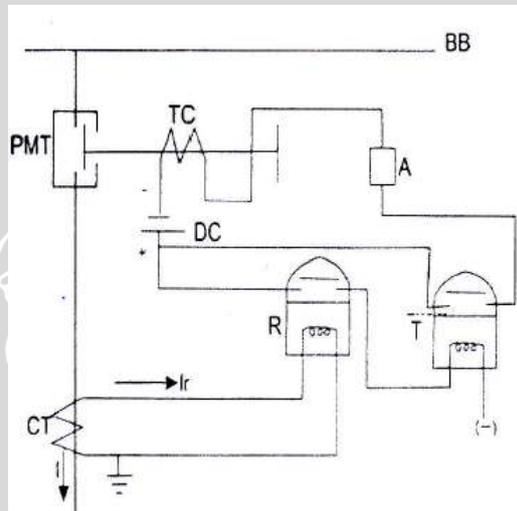
2.2.1.2 Rele arus lebih waktu tertentu (*Definte*)

Rele arus lebih waktu tertentu merupakan suatu rele dimana jangka waktu rele mulai *pick up* sampai dengan selesai memiliki jangka waktu yang tetap atau dalam waktu yang sudah ditentukan, selain itu jenis rele ini juga tidak tergantung pada besarnya arus gangguan (PLN *Corporate University*, Tanpa Tahun : 1). Jika arus gangguan telah melebihi setelan arus relenya, berapapun besarnya arus gangguan rele akan bekerja dengan waktu yang tetap. Karakteristik rele arus lebih waktu tertentu ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Tertentu
 Sumber: Saksomo, Tanpa Tahun : 29

Gambar 2.3 memperlihatkan dimana waktu kerjanya lebih lama dari waktu setelan rele waktu seketika. Sedangkan rangkaian rele arus lebih waktu tertentu ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Rangkaian Rele Arus Lebih Waktu Tertentu
 Sumber: Saksomo, Tanpa Tahun : 29

Berdasarkan Gambar 2.4 dapat dijelaskan bahwa dengan dipasangnya rele keterlambatan waktu (*time lag relay*) seperti pada Gambar 2.4, maka beroprasinya rele akan tergantung pada penyetelan waktu pada rele keterlambatan waktunya. Dengan pemasangan rele keterlambatan waktu, maka pengaman akan bekerja apabila memenuhi persamaan sebagai berikut : (Saksomo, Tanpa Tahun : 31)

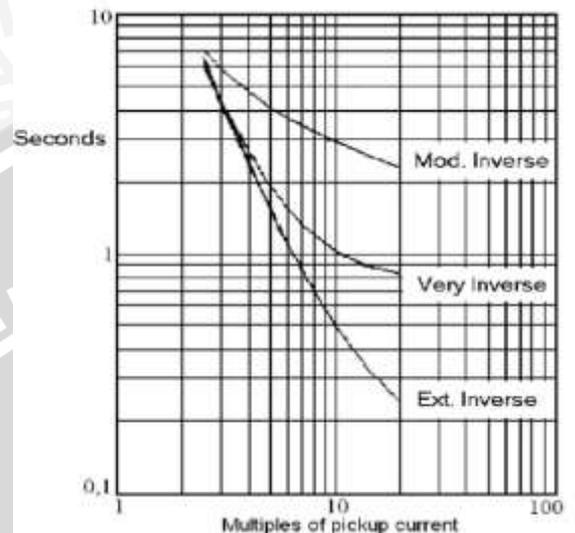
$$t_{tr} = t_{mg} + t_{pr} + t_{pp} \quad (2-3)$$

dengan :

t_{tr} : Waktu total rele mulai terjadinya gangguan sampai dengan pemutus bekerja (detik).

t_{mg} : Waktu mulai terjadinya gangguan sampai dengan rele pick up (detik).

semakin lama pula waktu operasi rele ini. Karakteristik invers ini banyak dikenal dengan sebutan *inverse definite minimum time* (IDMT). Karena seiring dengan arus yang bertambah besar, waktu operasi turun semakin cepat seolah mendekati waktu *definite* minimumnya (Sleva, 2009 : 58), Sehingga dapat disimpulkan bahwa arus gangguan berbanding terbalik dengan waktu kerja rele.



Gambar 2.6 Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Terbalik

Sumber: Anonymous, 2002 : 156

A. Penyetelan arus rele arus lebih waktu terbalik (Invers)

Penyetelan arus dari rele arus lebih waktu terbalik didasarkan kepada besar arus maksimum jika dipasang pada sisi keluaran trafo utama yang terhubung ke rel 150 kV dan 500 kV. Sesuai *british standart* untuk rele arus lebih jenis invers diatur sebagai berikut : (Ravindranath, 1976 : 176)

$$I_{set\ primer} = 1.1 \times I_{maksimum} \quad (2-4)$$

dengan :

$I_{set\ Primer}$: Setelan arus pada bagian primer (A).

$I_{maksimum}$: Arus maksimum pada sisi keluaran trafo utama (A).

$I_{maksimum}$ yang dimaksud dalam hal ini adalah besar arus nominal trafo utama pada sisi keluarannya, besar arus nominal trafo utama dapat dihitung dengan persamaan berikut :

(Sarimun, 2012 : 144)

$$I_n = \frac{kVA_{trafo}}{\sqrt{3} \cdot kV_{dasar}} \quad (2-5)$$

dengan :

I_n : Arus nominal transformator (A).

kVA_{trafo} : Daya transformator (kVA).

kV_{dasar} : Tegangan dasar transformator (kV).

Nilai dari setelan arus primer rele akan digunakan untuk menghitung waktu kerja rele arus lebih apabila terjadi gangguan yang akan mengaktifkan *circuit breaker* (CB). Sedangkan untuk mendapatkan nilai setelan arus sekunder didapat dari rasio trafo arus yang terpasang pada jaringan yang dianalisis. Arus setelan pada bagian sekunder didapat berdasarkan persamaan (2-6). (Ravindranath, 1976 : 177)

$$I_{set\ sekunder} = I_{set\ primer} \times \frac{1}{n_{CT}} \quad (2-6)$$

dengan :

$I_{set\ sekunder}$: Setelan arus pada bagian sekunder (A).

n_{CT} : Angka transformasi pada trafo arus.

B. Penyetelan waktu kerja rele arus lebih waktu terbalik (*Invers*)

Untuk menentukan setelan waktu untuk rele arus lebih waktu terbalik (*invers*) didapat menggunakan rumus pada kurva waktu terhadap arus pada Gambar 2.6, adapun persamaannya ditulis seperti berikut : (IEC 60255-3 dan BS 142, 1996)

$$t = \frac{\beta}{\left[\frac{I_f}{I_{set}}\right]^\alpha - 1} \times TMS \text{ (detik)} \quad (2-7)$$

Nilai TMS dari rele arus lebih jenis *invers* dapat dicari menggunakan persamaan (2-8), dan Koefisien *time dial* untuk masing-masing jenis rele *invers* ditunjukkan pada Tabel 2.1 : (IEC 60255-3 dan BS 142, 1996)

$$TMS = \frac{\left[\frac{I_f}{I_{set}}\right]^\alpha - 1}{\beta} \times t \quad (2-8)$$

dengan :

t : Waktu beroprasinya rele (detik).

TMS : *Time Multiple Setting*. Nilai ini yang diatur pada rele sebagai konstanta (tanpa satuan).

I_f : Arus gangguan hubung singkat (Ampere). Nilai ini diambil arus gangguan yang terbesar, biasanya gangguan tiga fasa.

I_{set} : Arus penyetelan yang dimasukkan ke rele (Ampere).

Tabel 2.1 Koefisien *Time Dial*

Jenis Kurva	β	α
<i>Standart Inverse</i>	0,14	0,02
<i>Very Inverse</i>	13,5	1
<i>Long Time Inverse</i>	120	1
<i>Extremley Inverse</i>	80	2
<i>Moderately Inverse</i>	0,103	0,02
<i>Definite time</i>	0	1

Sumber: IEC 60255-3

2.3 Rele Gangguan Tanah

Rele gangguan tanah atau yang lebih dikenal dengan GFR (*Ground Fault Relay*) pada dasarnya memiliki prinsip kerja yang sama dengan rele arus lebih, namun diantara keduanya memiliki perbedaan dalam kegunaannya. Apabila rele arus lebih memiliki fungsi untuk mendeteksi adanya gangguan hubung singkat fasa-fasa, maka rele gangguan tanah memiliki fungsi untuk mendeteksi gangguan yang ditimbulkan akibat hubung singkat fasa-tanah. (Sunarto, 1993 : 211).

2.3.1 Prinsip kerja rele gangguan tanah

Pada kondisi normal beban seimbang I_r , I_s dan I_t sama besar, sehingga pada kawat netral tidak dialiri arus sehingga rele hubung tanah tidak bekerja. Apabila terjadi ketidakseimbangan arus atau terjadi gangguan hubung singkat ke tanah, maka akan timbul arus urutan nol pada kawat netral, sehingga rele hubung tanah akan bekerja. (Sunarto, 1993 : 213).

2.3.2 Setelan rele gangguan tanah

2.3.2.1 Penyetelan arus rele gangguan tanah

Penyetelan arus untuk rele gangguan tanah harus dibuat lebih sensitif dibandingkan rele arus lebih, hal ini karena nilai arus gangguan hubung singkat fasa-tanah memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan gangguan fasa-fasa. Setelan arus rele gangguan tanah dihitung menggunakan persamaan berikut : (Pandjaitan, 2012 : 87)

$$I_{set primer} = 0,3 \times I_{maksimum} \quad (2-9)$$

Dimana $I_{maksimum}$ adalah arus nominal transformator utama (I_n).

Persamaan (2-9) merupakan setelan rele gangguan tanah pada sisi primer, untuk mendapatkan nilai setelan sekunder yang akan diterapkan pada rele gangguan tanah tersebut dihitung menggunakan rasio trafo arus (*current transformer* disingkat CT) yang terpasang pada sisi keluaran trafo utama, adapun persamaan untuk mencari setelan arus bagian sekunder dirumuskan sebagai berikut : (Pandjaitan, 2012 : 87)

$$I_{set\ sekunder} = I_{set\ primer} \times \frac{1}{Ratio\ CT} \quad (2-10)$$

2.3.2.2 Penyetelan waktu kerja rele gangguan tanah

Hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat fasa ke tanah selanjutnya digunakan untuk nilai setelan waktu kerja (TMS) dari rele gangguan tanah. Sama halnya dengan rele arus lebih, rele gangguan tanah menggunakan rumus pengaturan waktu yang sama dengan rele arus lebih, tetapi waktu kerja rele yang diinginkan berbeda. Pada dasarnya rele hubung tanah cenderung lebih sensitif dari pada rele arus lebih, hal ini dikarenakan pada kasus hubung singkat baik fasa-fasa maupun fasa-tanah besar arus gangguan yang diperhatikan pada rele gangguan tanah lebih kecil dibandingkan dengan arus gangguan fasa-fasa sehingga kesensitifitan rele hubung tanah lebih baik. Untuk mendapatkan waktu kerja rele gangguan tanah dapat dihitung dengan persamaan berikut : (IEC 60255-3 dan BS 142, 1996)

$$t = \frac{\beta}{\left[\frac{I_f}{I_{set}}\right]^\alpha - 1} \times TMS \text{ (detik)} \quad (2-11)$$

Untuk menentukan nilai TMS yang akan disetkan pada rele hubung tanah maka dapat dihitung dengan persamaan berikut : (IEC 60255-3 dan BS 142, 1996)

$$TMS = \frac{\left[\frac{I_f}{I_{set}}\right]^\alpha - 1}{\beta} \times t \quad (2-12)$$

2.4 Koordinasi Pengaman

Koordinasi pengaman merupakan suatu bentuk hubungan antara satu pengaman dengan pengaman lainnya baik pengaman gangguan sejenis, maupun gangguan yang berlainan (Sarimun, 2008: 46). Suatu sistem tenaga listrik harus dikoordinasikan untuk memastikan bahwa peralatan yang berada pada titik terdekat dari gangguan untuk beroperasi terlebih dahulu. Kegagalan proteksi utama harus dapat di atasi dengan proteksi cadangan (*back up protection*). Proteksi cadangan pada umumnya mempunyai keterlambatan waktu (*time delay*), hal ini untuk memberikan kesempatan kepada

proteksi utama untuk bekerja terlebih dahulu dan apabila proteksi utama gagal beroperasi baru proteksi cadangan yang akan beroperasi. Hal ini disebut koordinasi selektif, dimana merupakan kemampuan untuk menentukan pada titik mana terjadinya gangguan, sehingga dapat ditentukan pemutus daya mana yang harus dibuka untuk memisahkan bagian yang terganggu dari sistem.

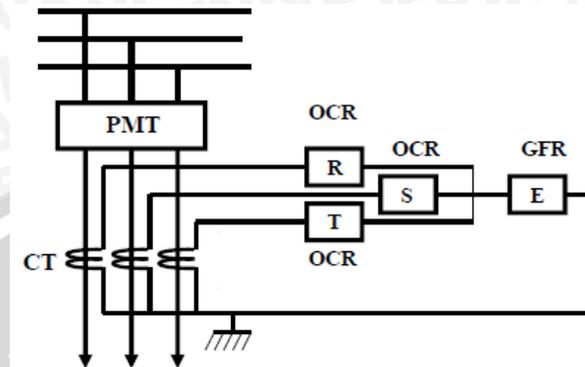
Dalam pengoperasiannya, rele proteksi harus menilai dan menentukan rele mana yang akan beroperasi dan waktu operasinya. Pada rele arus lebih dan rele gangguan tanah harus ditentukan nilai minimal arus lebihnya, nilai minimal waktu dan tetap pada kondisi selektif dari peralatan lain dalam suatu sistem sehingga setelan arus dan setelan waktu yang digunakan rele pengamanan sangat diperlukan untuk menentukan respon bekerja dengan cepat apabila terjadi gangguan tersebut tidak menyebar dan merusak peralatan yang lain dari sistem. Setelan rele memiliki peranan penting dalam koordinasi rele pengamanan. Setelan rele arus lebih dan rele gangguan tanah dapat dilakukan berdasarkan setelan waktu, setelan arus, maupun kombinasi keduanya (IEEE *Standart* 242-1986). Koordinasi antar rele berfungsi untuk menentukan *time delay* rele pengamanan utama dan rele pengamanan cadangan tidak boleh bekerja pada waktu yang sama, sehingga diperlukan *time delay* antara rele pengamanan utama dan rele pengamanan cadangan sebesar 0.4-0.5 detik.

2.4.1 Koordinasi rele arus lebih dan rele gangguan tanah

Dalam praktiknya, setelan proteksi rele arus lebih dan rele gangguan tanah diperlukan besaran arus gangguan yang akan dimasukkan kedalam setelan rele arus lebih dan rele gangguan tanah tersebut. Untuk keperluan ini diperlukan hitungan besarnya arus gangguan, besarnya beban puncak dan penyetelan rele dapat menggunakan karakteristik instan, *definite* dan *invers*.

Pada tahap berikutnya besar arus gangguan hubung singkat yang didapat digunakan untuk menentukan setelan rele arus lebih dan rele gangguan tanah terutama dalam menentukan setelan TMS (*Time Multiple Setting*). Selain itu nilai arus gangguan yang didapat juga digunakan untuk memeriksa rele arus lebih dan rele gangguan tanah tersebut, apakah masih bisa dinilai selektif atau harus dirubah ke nilai lain yang memberikan kerja rele lebih selektif lagi atau didapat kerja selektifitas yang optimum (rele tidak bekerja terlalu lama tetapi menghasilkan selektifitas yang baik). Rele arus lebih untuk pengamanan gangguan fasa-fasa yaitu gangguan tiga fasa atau antar fasa digunakan tiga buah rele arus lebih atau dapat juga menggunakan dua buah rele arus

lebih, sedangkan untuk mengamankan gangguan fasa-tanah digunakan rele gangguan tanah. Gambar 2.7 dan Gambar 2.8 menunjukkan rangkaian hubungan rele arus lebih dan rele gangguan tanah.



Gambar 2.7 Rangkaian Hubungan Tiga OCR dengan Satu GFR
Sumber: PLN Corporate University, Tanpa Tahun : 4

keterangan :

PMT : Pemutus.

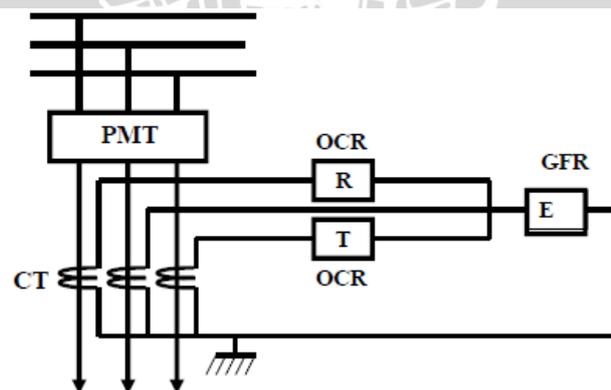
CT : Trafo arus (*current transformer*).

R, S, T : Urutan fasa.

E : Kawat netral.

OCR : Rele arus lebih (*over current relay*).

GFR : Rele gangguan tanah (*ground fault relay*).



Gambar 2.8 Rangkaian Hubungan Dua OCR dengan Satu GFR
Sumber: PLN Corporate University, Tanpa Tahun : 4

2.4.1.1 Koordinasi rele untuk gangguan fasa-fasa

Gambar 2.9 menunjukkan rangkaian untuk mendeteksi gangguan fasa-fasa, dalam hal ini diambil contoh gangguan antar fasa.

Sesuai gambar 2.10 dapat dijelaskan sebagai berikut :

- Arus gangguan tanah ($3I_0$) selalu masuk ke rele gangguan tanah, baik yang diperoleh dari resultan ketiga arus fasa maupun dari trafo arus netral.
- Besarnya nilai arus $3I_0$ tergantung pada tahanan pentanahan netral.
- Bila tahanan pentanahan mempunyai nilai yang besar, kurva arus pada karakteristik invers akan landai dan tidak memberikan waktu yang lebih cepat. Bila terdapat hal seperti ini setelah rele yang dipilih karakteristik invers yang sesuai dengan kurva arus tersebut (supaya lebih curam) untuk arus gangguan dari resultan ketiga arus fasa maupun dari trafo arus netral.
- Dengan pentanahan langsung, kurva arus gangguan menjadi curam, setelah rele dengan menggunakan karakteristik invers, dapat menekan komulasi waktu dan rele gangguan fasa dapat mengamankan untuk gangguan tanah.

2.5 Gangguan Hubung Singkat

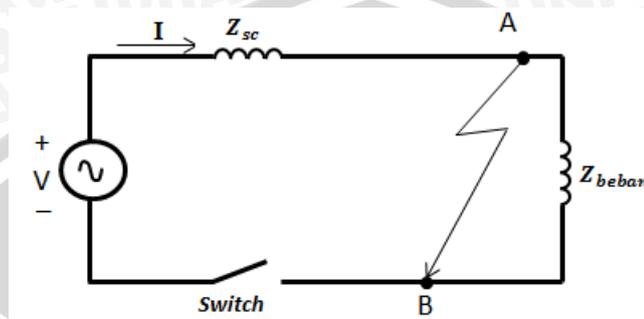
Gangguan hubung singkat adalah gangguan karena adanya hubungan secara langsung fasa-fasa (Fasa R-S, Fasa R-T, Fasa S-T atau Fasa R-S-T terhubung secara langsung) atau fasa-tanah. Gangguan hubung singkat dapat terjadi pada sistem tenaga listrik di jaringan, Gardu Induk atau di pusat pembangkit listrik, dimana besarnya arus hubung singkat ditentukan oleh besar kecilnya sumber listrik (generator atau trafo tenaga), impedansi dari sumber (generator), dan impedansi jaringan yang dilalui oleh arus gangguan hubung singkat tersebut.

Gangguan hubung singkat yang terjadi pada sistem tenaga listrik baik yang terjadi fasa-fasa maupun fasa-tanah sering lebih disebabkan karena faktor alam seperti tersambar petir, adanya pohon yang mengenai kawat fasa, tembusnya isolasi, atau karena faktor kesalahan manusia seperti adanya layangan yang menyangkut kawat fasa yang bisa membuat kawat fasa hubung singkat.

Berdasarkan kesimetrisannya gangguan hubung singkat (*short circuit*) dibedakan menjadi dua, yakni gangguan asimetris dan gangguan simetris (Sarimun, 2012 : 66). Gangguan asimetris adalah gangguan yang mengakibatkan tegangan dan arus mengalir pada setiap fasanya menjadi tidak seimbang. Yang termasuk kedalam gangguan asimetris yakni gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, gangguan hubung singkat antar fasa dan gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah. Sedangkan gangguan simetris adalah gangguan yang terjadi pada semua fasanya sehingga arus maupun

tegangan setiap fasanya seimbang setelah gangguan terjadi, adapun yang termasuk kedalam gangguan simetris yaitu gangguan hubung singkat tiga fasa.

Sistem jaringan tenaga listrik sederhana seperti terlihat pada Gambar 2.11 di bawah ini, dipasok dari arus bolak-balik. Impedansi hubung singkat (Z_{sc}) terdiri dari tahanan (R) dan reaktansi (X), yang diperoleh dari penjumlahan impedansi sumber listrik dan jaringan tenaga listrik.



Gambar 2.11 Sistem Jaringan Listrik Sederhana
Sumber: Sarimun, 2012 : 68

Saat saklar (*switch*) ditutup, maka akan mengalir arus (I) dari sumber yang besarnya tergantung pada kapasitas dari beban (VA , Watt). Saat jaringan beroperasi terjadi hubung singkat antara titik A dan B, maka timbul arus gangguan hubung singkat pada jaringan tersebut. Dalam hal ini kapasitas beban tidak berpengaruh pada arus gangguan, yang berpengaruh adalah kapasitas sumber, impedansi sumber dan impedansi jaringan tenaga listrik yang menjadi impedansi hubung singkat. Besarnya impedansi hubung singkat ditunjukkan seperti berikut : (Sarimun, 2012 : 68)

$$Z_{sc} = \sqrt{(R^2 + X^2)} \quad (2-13)$$

dengan :

Z_{sc} : Impedansi hubung singkat (Ω , $p.u.$).

R : Tahanan sistem (Ω , $p.u.$).

X : Reaktansi sistem (Ω , $p.u.$).

Dalam sistem tenaga listrik, reaktansi (X) nilainya jauh lebih besar dari tahanan (R). Perbandingan nilai R dan X hampir sama dengan nilai $\cos \Phi$, nilainya adalah :

$$\cos \Phi = \frac{R}{\sqrt{(R^2 + X^2)}} \quad (2-14)$$

Secara umum kondisi kenaikan atau *transient* arus hubung singkat berbeda, tergantung lokasi titik gangguan hubung singkat dan jarak generator dari titik gangguan. Jika gangguan dekat dengan generator maka yang dominan adalah impedansi

generator, namun apabila gangguan jauh dari generator maka yang dominan adalah impedansi sistem interkoneksi dan trafo yang memasok ke beban. Semua gangguan hubung singkat di atas, arus gangguannya dihitung dengan menggunakan rumus dasar yaitu : (PLN Corporate University, Tanpa Tahun : 2)

$$I = \frac{V}{Z} \quad (2-15)$$

dengan :

I : Arus yang mengalir pada impedansi (A).

V : Tegangan sumber (V).

Z : Impedansi jaringan, nilai ekivalen dari seluruh impedansi di dalam jaringan dari sumber tenaga sampai titik gangguan (Ω).

Gangguan hubung singkat dapat didefinisikan sebagai gangguan yang terjadi akibat adanya penurunan kekuatan dasar isolasi (*basic insulation strength*) antara sesama kawat fasa atau antara kawat fasa dengan tanah yang menyebabkan kenaikan arus secara berlebihan atau biasa juga disebut dengan gangguan arus lebih. Perhitungan arus gangguan hubung singkat sangat penting untuk mempelajari sistem tenaga listrik pada waktu perencanaan maupun setelah beroperasi nantinya. Perhitungan arus gangguan hubung singkat dibutuhkan untuk : (Pandjaitan, 2012 : 84)

- *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 diinginkan yang terjadi pada waktu sistem beroperasi.

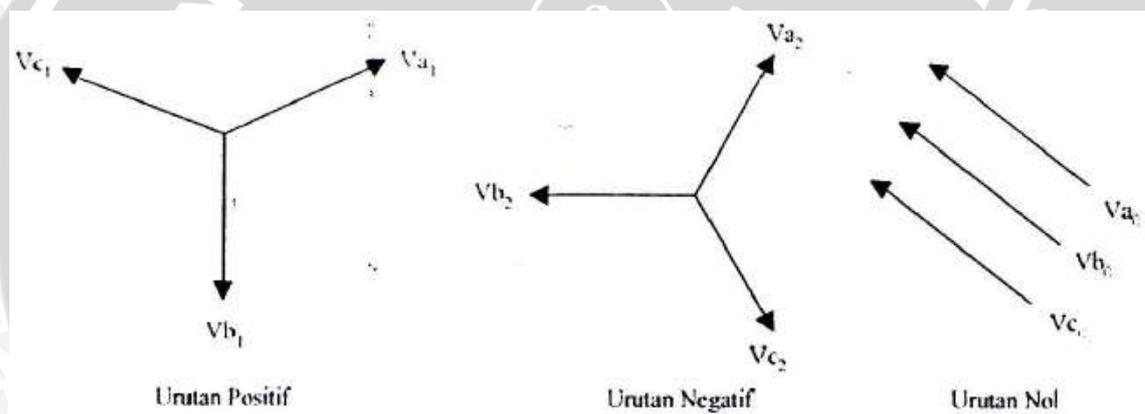
2.6 Metode Komponen Simetris Untuk Gangguan Hubung Singkat

Gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik umumnya merupakan gangguan asimetris, dimana gangguan tersebut mengakibatkan tegangan dan arus yang mengalir pada setiap fasanya menjadi tidak seimbang. Meskipun demikian gangguan simetris juga harus mendapatkan perhatian, karena apabila dibiarkan dapat menimbulkan masalah yang cukup fatal, meskipun gangguan yang terjadi tidak separah yang disebabkan oleh gangguan asimetris.

Pada tahun 1918, C.L Fortesque menemukan suatu metode yang dapat digunakan untuk menganalisa sistem tiga fasa yang tidak seimbang. Fortesque

membuktikan bahwa suatu sistem yang tidak seimbang yang terdiri dari tegangan atau arus yang tidak seimbang antar fasanya dapat dipecah menjadi tiga komponen simetris dari sistem tiga fasa yang seimbang. Tiga komponen simetris tersebut adalah komponen urutan positif (*positive sequence components*), komponen urutan negatif (*negative sequence components*) dan komponen urutan nol (*zero sequence components*).

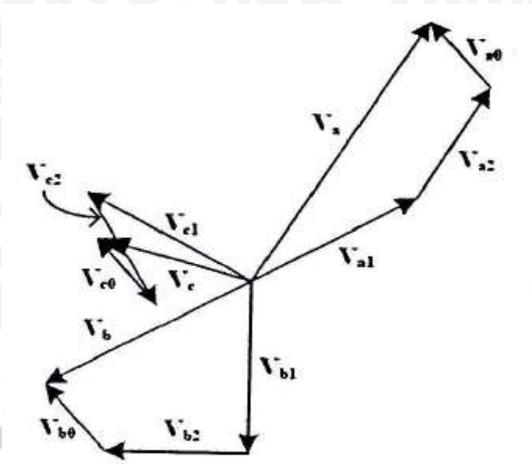
Urutan fasa komponen urutan positif dari fasor tidak seimbang adalah a,b,c sedangkan urutan negatifnya adalah a,c,b. Jika fasor aslinya tersebut adalah tegangan, maka dinyatakan dengan V_a , V_b , V_c . Ketiga komponen simetris dinyatakan dengan subskrip tambahan 1 untuk urutan positif, 2 untuk urutan negatif, dan 0 untuk urutan nol. Sehingga fasor tegangan komponen simetris secara berurutan dapat dinyatakan dengan V_{a1} , V_{b2} , V_{c1} , V_{a2} , V_{b2} , V_{c2} , V_{a0} , V_{b0} , V_{c0} . Fasor tegangan tiga fasa tidak seimbang dari komponen simetrisnya ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Tiga Himpunan Fasor Seimbang yang Merupakan Komponen Simetris dari Tiga Fasor Tidak Seimbang

Sumber: Stevenson, 1996 : 26

Suatu besaran tiga fasa yang tidak seimbang dinyatakan oleh jumlah tiga fasa komponen yang seimbang yang terdiri atas urutan positif, urutan negatif, dan urutan nol. Setiap fasor tidak seimbang merupakan jumlah dari komponen-komponen seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Penjumlahan Secara Grafis Komponen-komponen Untuk Mendapatkan Fasor-fasor Tidak Seimbang
Sumber: Stevenson, 1996 : 261

Dari Gambar 2.12 fasor asli dapat dinyatakan dalam suku komponennya atau persamaan sebagai berikut : (Stevenson, 1996 : 261)

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a3} \quad (2-16)$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b3} \quad (2-17)$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c3} \quad (2-18)$$

2.6.1 Komponen urutan positif (*positive sequence components*)

Komponen urutan positif adalah komponen yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lain dalam fasa sebesar 120° , dan mempunyai urutan fasa yang sama seperti fasor aslinya (ditandai dengan *subscript 1*). Saat sistem berada dalam kondisi normal, hanya terdapat arus dan tegangan urutan positif saja, sehingga impedansi sistem pada kondisi normal adalah impedansi urutan positif. Ketika terjadi gangguan, cabang yang terganggu pada sistem dapat digantikan dengan perubahan tegangan $\Delta V = V - V_1$ dan semua sumber tegangan yang ada pada sistem dihubungkan singkat, sehingga akan diperoleh arus gangguan ΔI yang mengalir ke dalam sistem, yaitu :

$$\Delta I = - \frac{(V - V_1)}{Z_1} \quad (2-19)$$

dan

$$\Delta I = I - I_1 \quad (2-20)$$

Dari persamaan (2-20) maka didapat :

$$V_1 = V - I_1 Z_1 \quad (2-21)$$

Persamaan di atas merupakan persamaan komponen urutan positif arus dan tegangan pada cabang yang mengalami gangguan.

2.6.2 Komponen urutan negatif (*negative sequence components*)

Komponen urutan negatif merupakan komponen yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lain dalam fasa sebesar 120° , dan mempunyai urutan fasa yang berlawanan dengan fasor aslinya (ditandai dengan subscript 2). Jika pada kondisi normal hanya terdapat komponen urutan positif, maka komponen urutan negatif yaitu komponen sebelum terjadinya gangguan, maka apabila terjadi gangguan akan timbul perubahan tegangan sebesar $-V_2$, dan arus I_2 yang mengalir dari sistem ke gangguan adalah :

$$I_2 = -\frac{V_2}{Z_2} \quad (2-22)$$

$$V_2 = -I_2 Z_2 \quad (2-23)$$

Z_2 merupakan impedansi urutan negatif dan pada umumnya sama dengan impedansi urutan positif.

2.6.3 Komponen urutan nol (*zero sequence components*)

Komponen urutan nol merupakan komponen yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan dengan pergeseran fasa nol antara fasor yang satu dengan yang lain (ditandai dengan *subscript 0*). Persamaan untuk komponen urutan nol saat terjadi gangguan yaitu :

$$I_0 = -\frac{V_0}{Z_0} \quad (2-24)$$

$$V_0 = -I_0 Z_0 \quad (2-25)$$

Arus dan tegangan pada komponen urutan nol adalah sefasa, oleh karena itu arus urutan nol untuk dapat mengalir di sistem memerlukan jalan balik (*return connection*) melalui pentanahan netral sistem. Impedansi urutan nol umumnya tidak sama dengan impedansi urutan positif dan beberapa faktor seperti jenis peralatan sistem, cara menghubungkan belitan (Δ atau Y), dengan cara pentanahan titik netral.

2.7 Perhitungan Impedansi

Sebelum melakukan perhitungan terhadap arus gangguan hubung singkat, maka diperlukan perhitungan terhadap impedansi dari setiap elemen rangkaian dan

mengubahnya dengan dasar yang sama. Ada dua macam cara untuk menentukan impedansi yaitu metode ohm dan metode per unit (p.u.).

2.7.1 Sistem per unit

Sistem per unit adalah perbandingan antara nilai besaran terhadap nilai dasarnya yang dinyatakan dalam desimal. Perhitungan (rasio) dalam persentase adalah 100 kali nilai dalam per unit. Metode per unit memiliki kelebihan dari metode persentase karena hasil kali dari dua besaran yang dinyatakan dalam per unit sudah bisa dinyatakan dalam per unit, sedangkan hasil perkalian dari dua nilai yang dinyatakan dalam persentase masih harus dibagi dengan 100 untuk mendapatkan hasil dalam persentase.

Biasanya daya dasar (MVA) dan tegangan dasar (kV) adalah nilai-nilai yang dipilih untuk menentukan dasar atau referensi. Jadi untuk sistem berfasa tunggal atau sistem tiga fasa dimana istilah arus berarti arus saluran, istilah tegangan berarti tegangan ke netral, dan istilah kilovoltampere berarti kilovoltampere per fasa, berlaku rumus-rumus berikut ini untuk hubungan bermacam-macam kuantitas : (Stevenson, 1996 : 232)

$$\text{Arus dasar} = \frac{kVA_{3\phi} \text{ dasar}}{\sqrt{3} \times \text{tegangan dasar, } kV_{L-L}} \quad (2-26)$$

$$\text{Impedansi dasar} = \frac{(\text{Tegangan dasar, } kV_{L-L})^2}{MVA_{3\phi} \text{ dasar}} \quad (2-27)$$

$$\text{Impedansi per unit} = \frac{\text{Impedansi sebenarnya, } \Omega}{\text{Impedansi dasar, } \Omega} \quad (2-28)$$

Untuk mengubah dari impedansi per unit (p.u.) menurut salah satu dasar yang lama menjadi impedansi per unit (pu) menurut dasar yang baru dipakai persamaan berikut : (Stevenson, 1996 : 235)

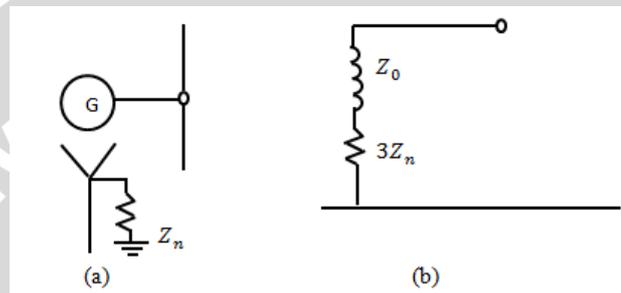
$$Z_{baru} (pu) = Z_{lama} (pu) \left(\frac{kV_{lama \text{ dasar}}}{kV_{baru \text{ dasar}}} \right)^2 \times \left(\frac{MVA_{baru \text{ dasar}}}{MVA_{lama \text{ dasar}}} \right) \quad (2-29)$$

2.7.2 Impedansi urutan sumber

Pada P.T. Indonesia Power Grati, sumber listrik berupa generator yang memasok energi listrik ke jaringan. Impedansi urutan untuk sumber dinyatakan dalam berikut :

- Z_{G1} (Impedansi generator urutan positif).
- Z_{G2} (Impedansi generator urutan negatif).
- Z_{G0} (Impedansi generator urutan nol).

Dalam analisisnya saat jaringan dibawa ke urutan positif, tegangan yang dihasilkan sumber yang berupa generator diperhitungkan, namun saat dibawa ke urutan negatif dan urutan nol besar tegangan tidak diperhitungkan. Setiap unit pembangkit pada PLTGU Grati memiliki impedansi pentanahan (Z_N) yang menghubungkan titik netral pembangkit ke tanah, yang mana besar impedansi pentanahan (Z_N) mempengaruhi rangkaian ekuivalen impedansi urutan nol (Z_0) pembangkit sehingga nilainya $Z_0 + 3 Z_N$, sehingga saat dibawa ke urutan nol impedansi pentanahan juga diperhitungkan. Gambar 2.14 menunjukkan rangkaian ekuivalen impedansi pembangkit dengan impedansi pentanahan (Z_N).



Gambar 2.14 Pembangkit dengan Z_n : (a) Simbol Diagram Garis
(b) Rangkaian Ekuivalen Impedansi Urutan Nol nya

Sumber: Stevenson, 1993 : 276

2.7.3 Impedansi urutan transformator utama

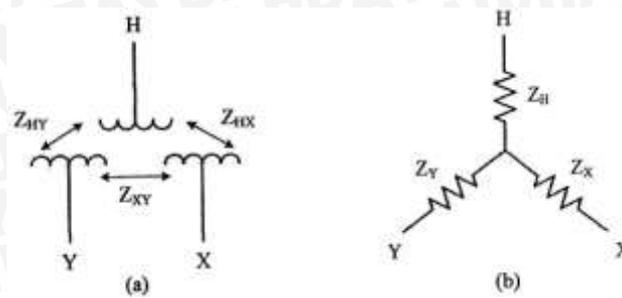
Impedansi urutan transformator utama dinyatakan sebagai berikut :

- Z_{T1} (Impedansi transformator utama urutan positif).
- Z_{T2} (Impedansi transformator utama urutan negatif).
- Z_{T0} (Impedansi transformator utama urutan nol).

Impedansi urutan positif transformator utama sama dengan urutan negatifnya sehingga dapat dinyatakan dalam satuan persen maupun dalam satuan per unit sebagai berikut :

$$Z_{T1} = Z_{T2} \quad (2-30)$$

Pada PLTGU Grati terdapat masing-masing dua unit pembangkit pada sub-sistem dihubungkan oleh trafo daya belitan sebelum terhubung ke jaringan 500 kV dan 150 kV. Adapun Gambar 2.15 menunjukkan trafo daya tiga belitan, diagram belitan dan rangkaian ekuivalen impedansi belitan.



Gambar 2.15 Trafo Daya Tiga Belitan : (a) Diagram Belitan
(b) Rangkaian Ekuivalen Impedansi Belitan

Sumber: Anderson, 1995 : 237

Berdasarkan Gambar 2.15, cara berbeda digunakan apabila kita ingin menentukan impedansi urutan pada trafo daya dua belitan dimana penentuan impedansi urutannya diambil dari reaktansi trafo itu sendiri. Impedansi urutan trafo daya tiga belitan ditentukan berdasarkan persamaan berikut : (Anderson, 1995 : 239)

$$Z_H = \frac{1}{2} (Z_{HX} + Z_{HY} - Z_{XY}) \quad (2-31)$$

$$Z_X = \frac{1}{2} (Z_{HX} + Z_{XY} - Z_{HY}) \quad (2-32)$$

$$Z_Y = \frac{1}{2} (Z_{HY} + Z_{XY} - Z_{HX}) \quad (2-33)$$

dengan :

Z_{XY} : Impedansi antar tegangan rendah.

Z_{HX}, Z_{HY} : Impedansi antara tegangan rendah dengan belitan tegangan tinggi.

Z_X : Impedansi pada belitan tegangan rendah (belitan X).

Z_Y : Impedansi pada belitan tegangan rendah (belitan Y).

Z_H : Impedansi pada belitan tegangan tinggi (belitan H).

Impedansi Z_H , Z_X , dan Z_Y berlaku untuk impedansi urutan positif, urutan negatif dan urutan nol nya.

2.7.4 Impedansi saluran

Saluran dalam hal ini merupakan kawat fasa yang menghubungkan komponen pembangkitan satu dengan yang lainnya. Impedansi urutan kawat fasa dinyatakan sebagai berikut :

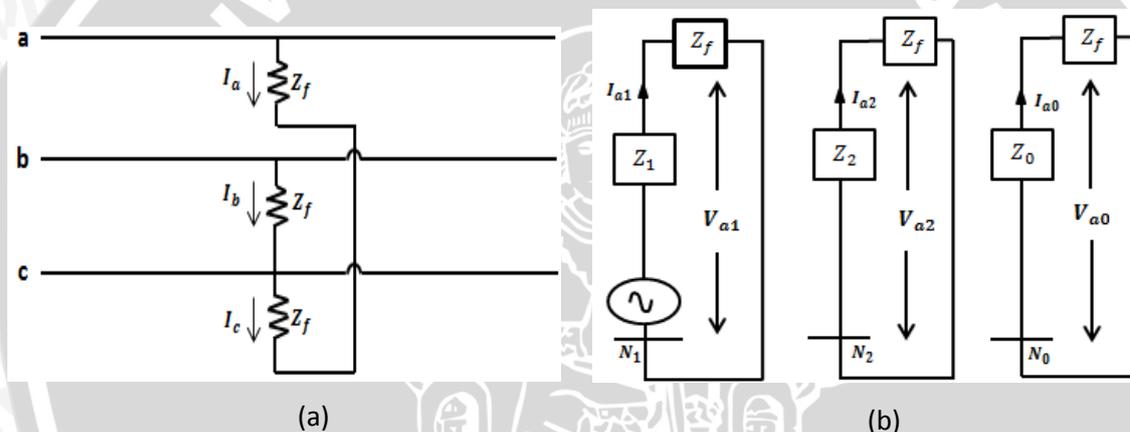
- Z_{L1} (Impedansi saluran urutan positif).
- Z_{L2} (Impedansi saluran urutan negatif).
- Z_{L0} (Impedansi saluran urutan nol).

2.8 Perhitungan Arus Gangguan

Perhitungan arus gangguan hubung singkat dapat dihitung dengan menggunakan rumus dasar, dimana impedansi ekuivalen yang dimasukkan ke dalam rumus dasar seperti pada sub bab sebelumnya harus sesuai dengan jenis gangguan yang dianalisis baik gangguan tiga fasa, gangguan antar fasa, gangguan satu fasa ke tanah maupun gangguan dua fasa ke tanah.

2.8.1 Gangguan tiga fasa

Gangguan tiga fasa merupakan merupakan terhubungnya fasa a, b, dan c secara langsung maupun melalui suatu nilai impedansi. Gambar 2.16 (a) menunjukkan hubungan jaringan terjadinya gangguan hubung singkat tiga fasa, sedangkan Gambar 2.16 (b) menunjukkan rangkaian urutan ekuivalen gangguan tiga fasa.



Gambar 2.16 (a) Hubungan Jaringan Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa
(b) Rangkaian Urutan Ekuivalen Gangguan Tiga Fasa

Sumber: Stevenson, 1994 : 275

Berdasarkan ilustrasi yang diperlihatkan gambar 2.16 di atas besar arus gangguan tiga fasa dapat dihitung dengan rumus : (Gonen, 1987 : 167)

$$I_f = \frac{E_{ph}}{Z_1 + Z_f} \quad (2-34)$$

dengan :

I_f : Arus hubung singkat (A).

E_{ph} : Tegangan fasa-netral (V).

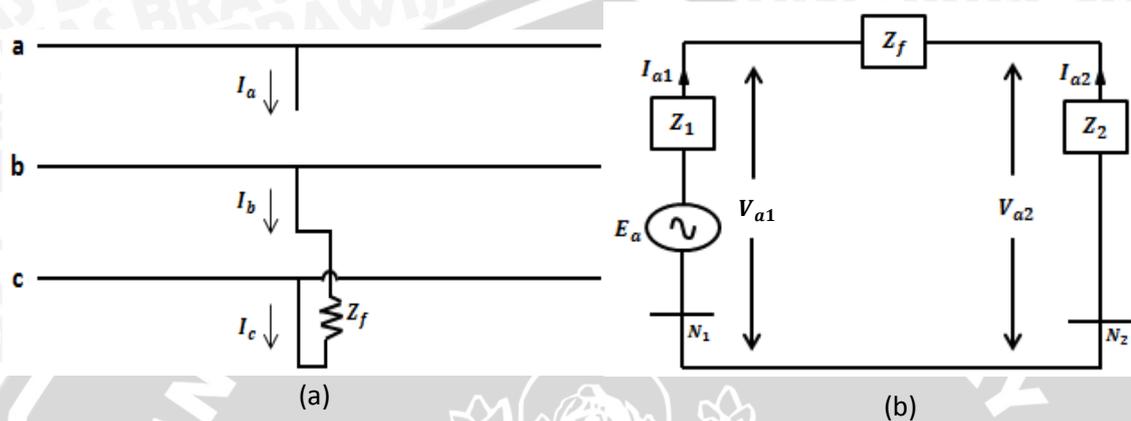
Z_1 : Impedansi urutan positif (Ω).

Z_f : Impedansi gangguan hubung singkat (Ω).

Dalam analisis perhitungan arus gangguan hubung singkat, impedansi gangguan hubung singkat (Z_f) dianggap bernilai nol.

2.8.2 Gangguan antar fasa

Gangguan hubung singkat antar fasa merupakan gangguan yang disebabkan akibat terhubungnya salah satu fasa dengan fasa lainnya secara langsung atau melalui suatu nilai resistansi. Gambar 2.17 (a) menunjukkan hubungan jaringan gangguan hubung singkat antar fasa sedangkan Gambar 2.17 (b) menunjukkan rangkaian urutan ekivalen gangguan antar fasa.



Gambar 2.17 (a) Hubungan Jaringan Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa
(b) Rangkaian Urutan Ekiwalen Gangguan Antar Fasa

Sumber: Stevenson, 1994 : 271

Berdasar Gambar 2.17 besar arus gangguan hubung singkat antar fasa dapat dihitung dengan rumus berikut : (Gonen, 1987 : 169)

$$I_{a1} = \frac{E_{ph}}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (2-35)$$

Karena gangguan menggunakan tegangan fasa-fasa maka perhitungan arus gangguan antar fasa dikali $\sqrt{3}$, sehingga dapat ditulis sebagai berikut :

$$I_f = \sqrt{3} \times I_{a1} \quad (2-36)$$

dengan :

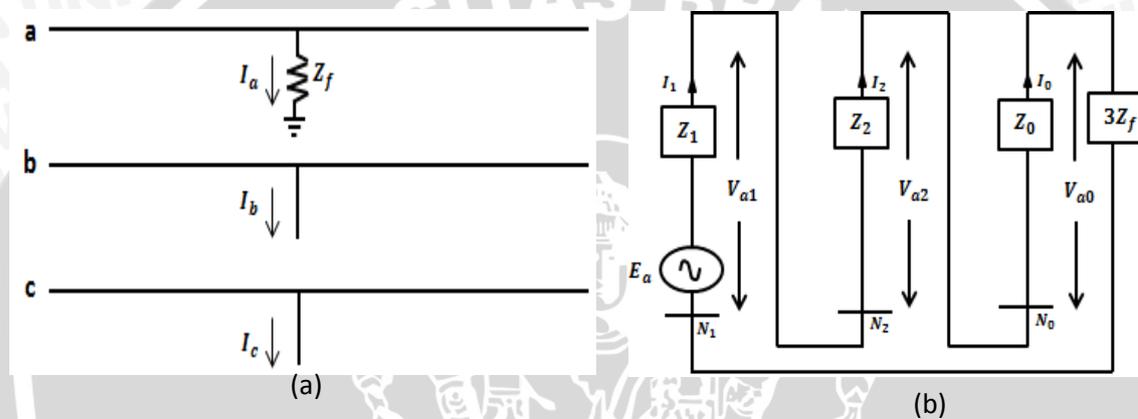
Z_2 : Impedansi urutan negatif (Ω).

2.8.3 Gangguan satu fasa ke tanah

Gangguan satu fasa ke tanah merupakan jenis gangguan yang paling sering terjadi pada sistem tenaga listrik. Gangguan satu fasa ke tanah terjadi akibat salah satu fasa a, b, dan c terhubung ke tanah baik secara langsung maupun melalui nilai resistansi yang membentuk *loop* tertutup sehingga dapat mengalirkan arus pada *loop* tersebut yang besarnya tergantung pada beda potensial yang terjadi, impedansi kawat fasa, serta

besar resistansi pentanahan apabila sistem tersebut ditanahkan menggunakan resistansi pentanahan.

Gangguan yang terjadi dapat dianalisa dengan menghubungkan-singkat semua sumber tegangan yang ada pada sistem dan mengganti titik (*node*) gangguan dengan sebuah sumber tegangan yang besarnya sama dengan tegangan sesaat sebelum terjadinya gangguan di titik gangguan tersebut. Dengan metode komponen simetris analisa dapat dilakukan dengan membedakan rangkaian menjadi rangkaian komponen urutan positif, negatif dan nol. Gambar 2.18 (a) menunjukkan gambaran saat gangguan satu fasa ke tanah, sedangkan Gambar 2.18 (b) menunjukkan rangkaian urutan ekivalen gangguan satu fasa ke tanah.



Gambar 2.18 (a) Hubungan Jaringan Gangguan Satu Fasa ke Tanah
(b) Rangkaian Urutan Ekivalen Gangguan Satu Fasa ke Tanah

Sumber: Sulasno, 1993 : 184

Dengan kondisi terminal sebagai berikut sebagai berikut:

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

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-37)$$

Berdasarkan persamaan (2-37) diperoleh :

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{1}{3} I_a \quad (2-38)$$

$$I_a = 3I_{a0} \quad (2-39)$$

Dengan berdasarkan Gambar 2.18 (b) dan persamaan (2-39) diperoleh persamaan arus gangguan hubung singkat satu fasa ke tanahnya adalah : (Gonen, 1987 : 177)

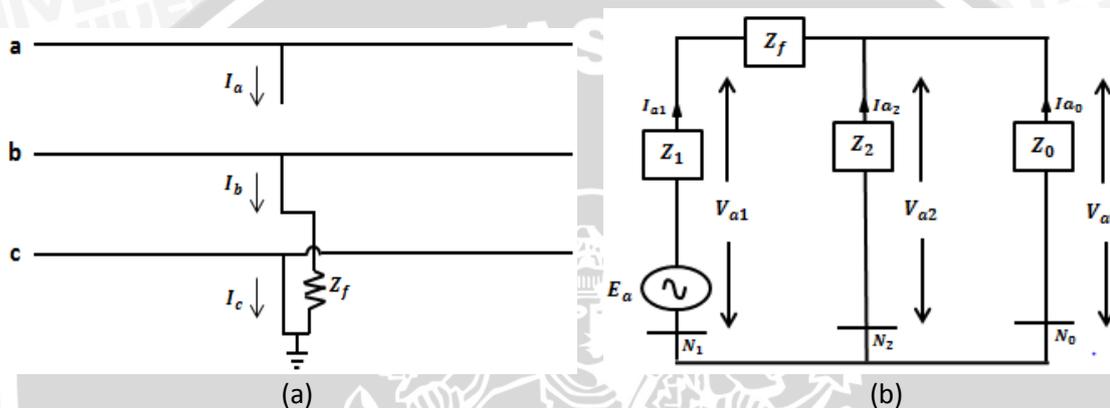
$$I_f = \frac{3(E_{ph})}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \quad (2-40)$$

dengan

Z_0 : Impedansi urutan nol (Ω).

2.8.4 Gangguan dua fasa ke tanah

Hampir sama dengan gangguan satu fasa ke tanah, gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah terjadi apabila dua kawat fasa terhubung ke tanah sehingga membentuk loop tertutup yang mengalirkan arus gangguan pada *loop* tersebut yang besarnya tergantung pada beda potensial yang terjadi, impedansi kawat fasa, serta besar resistansi pentanahan apabila sistem tersebut ditanahkan menggunakan resistansi pentanahan. Gambar 2.19 (a) menunjukkan hubungan jaringan gangguan dua fasa ke tanah, sedangkan Gambar 2.19 (b) menunjukkan rangkaian urutan ekivalen gangguan dua fasa ke tanah.



Gambar 2.19 (a) Hubungan Jaringan Gangguan Dua Fasa ke Tanah
(b) Rangkaian Urutan Ekivalen Gangguan Dua Fasa ke Tanah

Sumber: Sulasno, 1993 : 195

Persamaan arus gangguan hubung singkat yang diperoleh saat terjadi gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah berdasarkan rangkaian urutan ekivalen yang ditunjukkan pada Gambar 2.19 (b) dirumuskan sebagai berikut : (Gonen, 1987 : 180)

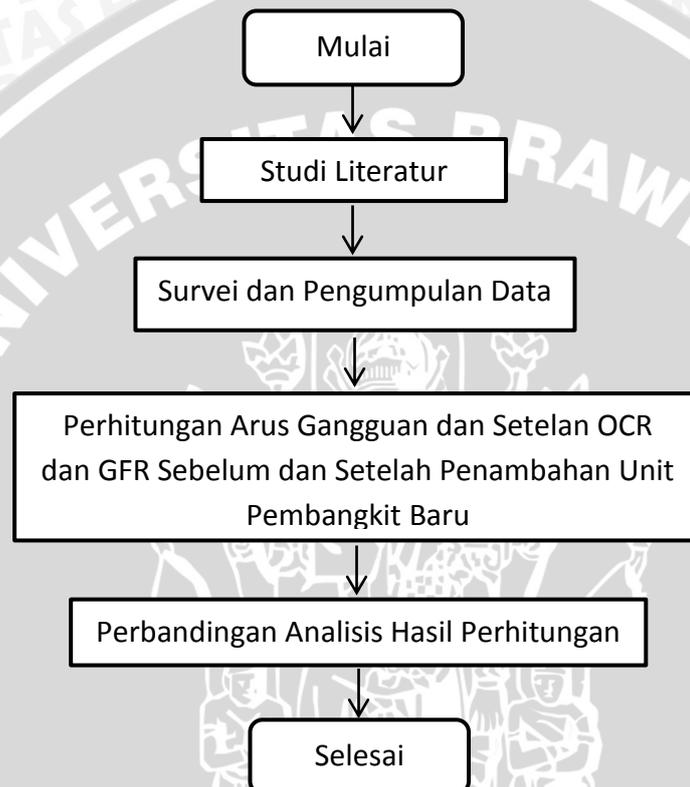
$$I_f = \frac{E_{ph}}{(Z_1 + (Z_2 // Z_0)) + Z_f} \quad (2-41)$$

Nilai arus gangguan ke tanah yang dianalisis adalah nilai maksimum karena nilai ini digunakan sebagai acuan dalam sistem pentanahan peralatan dan proteksinya pada sistem Gardu Induk, selain itu dapat juga digunakan sebagai acuan rating kerja pemutus atau rele gangguan tanah yang berdasarkan Standart Perusahaan Listrik Negara (SPLN). Besar arus gangguan yang diijinkan pada suatu sistem Gardu Induk maupun sistem Pembangkit adalah 40 kA (PLN Pusat Pelayanan Enjiniring : Bab 6.13, Hal 14)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Kajian yang dilakukan dalam penelitian ini adalah perbandingan koordinasi OCR dan GFR sebelum dan setelah penambahan unit pembangkit baru di PLTGU Grati. Adapun metodologi yang digunakan dalam penyelesaian skripsi ini ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi
Sumber: Penulis, 2015

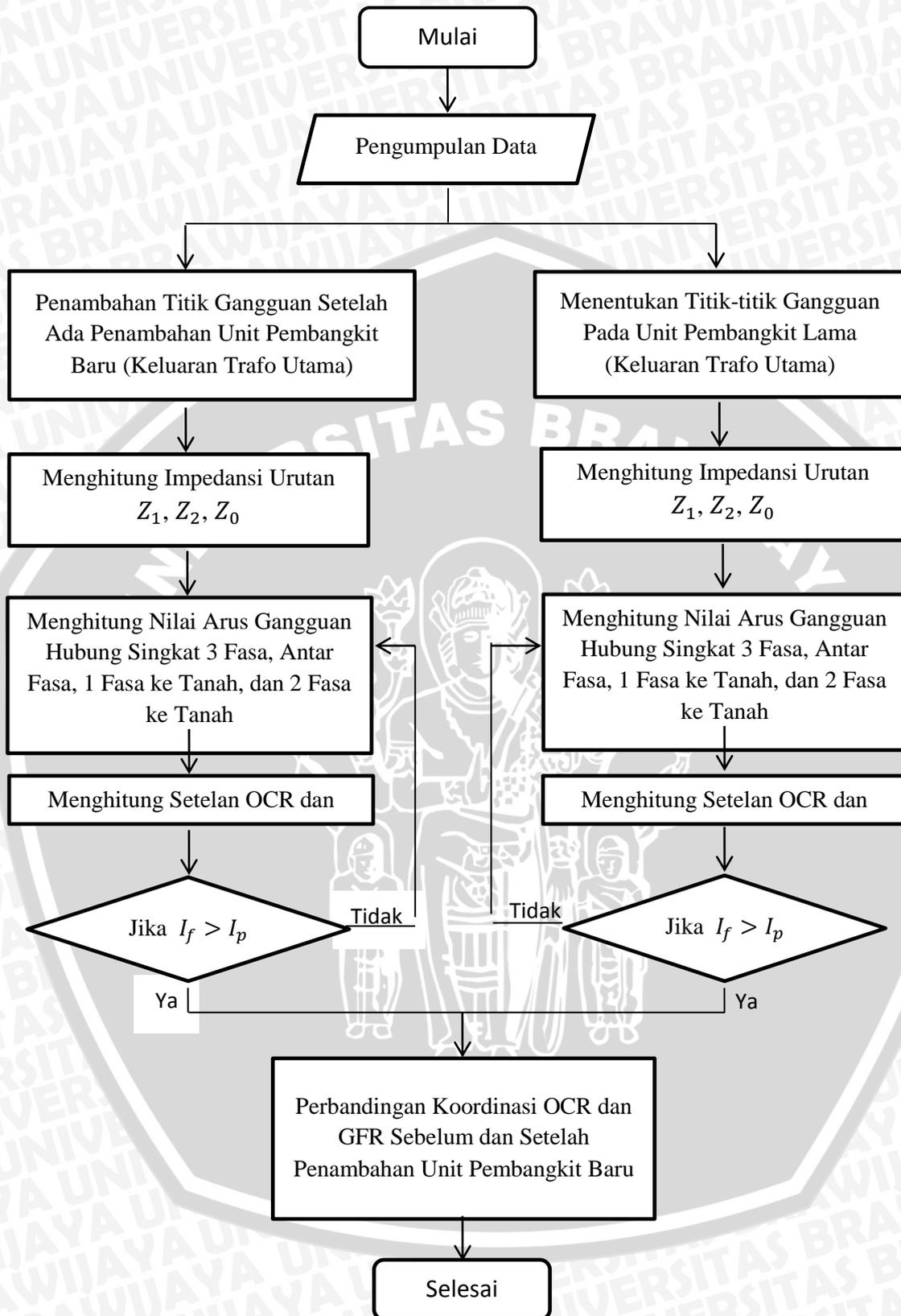
3.1 Survei dan Pengumpulan Data

Kegiatan survei lapangan dilakukan untuk mengetahui kondisi riil dari obyek yang dibahas, data-data yang diperlukan, serta informasi penting yang terkait dengan permasalahan yang dibahas. Pada skripsi ini survei dan pengambilan data dilakukan di PLTGU Grati. Data-data yang digunakan dalam penelitian ini adalah berupa data sekunder, data sekunder adalah data yang diperoleh dari studi literatur (buku, jurnal-jurnal, dan internet). Data sekunder lain yang diperlukan dalam kajian ini adalah :

1. Spesifikasi unit pembangkit pada sistem Gardu Induk Grati sebelum penambahan unit pembangkit baru, yang meliputi :
 - a. Rating daya dan tegangan.
 - b. Impedansi urutan positif, negatif, dan nol (Z_1, Z_2, Z_0).
 - c. Hubungan terminal keluaran dan tahanan pentanahan (Z_N).
2. Spesifikasi trafo utama dan saluran, yang meliputi :
 - a. Rating daya dan tegangan.
 - b. Impedansi urutan positif, negatif, dan nol (Z_1, Z_2, Z_0).
 - c. Hubungan trafo.
3. Spesifikasi unit pembangkit baru, yang meliputi :
 - a. Rating daya dan tegangan.
 - b. Impedansi urutan positif, negatif, dan nol (Z_1, Z_2, Z_0).
 - c. Hubungan terminal keluaran dan tahanan pentanahan (Z_N).
4. Spesifikasi trafo utama dan saluran baru, yang meliputi :
 - a. Rating daya dan tegangan.
 - b. Impedansi urutan positif, negatif, dan nol (Z_1, Z_2, Z_0).
 - c. Hubungan trafo.
5. *Single line diagram* Sistem 150 kV dan 500 kV PLTGU Grati, yang meliputi :
 - a. Impedansi sistem pembangkit sampai bus 150 kV dan bus 500 kV.
 - b. Impedansi urutan positif, negatif, dan nol (Z_1, Z_2, Z_0).
6. Spesifikasi OCR dan GFR pada masing-masing keluaran trafo utama, yang meliputi :
 - a. Jenis rele yang digunakan.
 - b. Setelan arus rele yang digunakan.
 - c. Waktu kerja rele yang digunakan.

3.2 Prosedur Perhitungan dan Analisis Koordinasi OCR dan GFR Sebelum dan Setelah Penambahan Unit Pembangkit Baru

Gambar 3.2 menunjukkan langkah-langkah analisis koordinasi OCR dan GFR sebelum dan setelah penambahan unit pembangkit baru pada sistem Gardu Induk Grati. Kedua hasil Perhitungan tersebut selanjutnya akan dibandingkan dan dianalisis.



Gambar 3.2 Diagram Alir Analisis Koordinasi OCR dan GFR Sebelum dan Sesudah Penambahan Unit Pembangkit Baru Pada Sistem Gardu Induk Grati

Sumber: Penulis, 2015



3.2.1 Data-data spesifikasi sistem sebelum penmbahan unit pembangkit baru

Data-data spesifikasi sistem Gardu Induk Grati sebelum adanya penambahan unit pembangkit baru antara lain :

1. Rating pembangkit, trafo dan saluran.
2. Komponen impedansi pembangkit :
 - a. Impedansi urutan (Z_1, Z_2, Z_0).
 - b. Impedansi pentanahan.
3. Komponen impedansi trafo (Z_1, Z_2, Z_0).
4. Komponen impedansi saluran (Z_1, Z_2, Z_0).
5. Hubungan trafo.
6. Hubungan terminal keluaran pembangkit.
7. Spesifikasi rele arus lebih dan rele gangguan tanah yang digunakan.

3.2.2 Perhitungan impedansi urutan

Setelah menentukan letak titik gangguan (keluaran trafo utama) pada rangkian, maka langkah selanjutnya adalah menghitung besarnya impedansi urutan (Z_1, Z_2, Z_0) masing-masing komponen sistem Gardu Induk Grati. Perhitungan diperoleh dengan menyusun rangkaian impedansi urutan (Z_1, Z_2, Z_0) masing-masing komponen dan menyederhanakan rangkaian impedansi urutan tersebut sampai mendapatkan nilai penggantinya. Besarnya impedansi urutan tiap titik berbeda-beda sesuai dengan titik dimana gangguan terjadi.

3.2.3 Perhitungan nilai arus gangguan berdasarkan jenis gangguan

Setelah Impedansi ekivalen urutan (Z_1, Z_2, Z_0) pada setiap titik gangguan diperoleh, maka dapat dicari nilai arus gangguan berdasarkan jenis gangguan yang terjadi, antara lain :

1. Gangguan tiga fasa.
2. Gangguan antar fasa.
3. Gangguan satu fasa ke tanah.
4. Gangguan dua fasa ke tanah.

Perhitungan tiap jenis gangguan berbeda-beda sesuai dengan persamaan arus gangguan yang ada pada BAB II. Dengan demikian tiap titik gangguan terdapat empat jenis gangguan yang harus dicari nilai arus gangguannya.

3.2.4 Perhitungan setelan OCR dan GFR sebelum penambahan unit pembangkit baru

Setelah mendapatkan besar arus gangguan yang diinginkan di titik gangguan yang ditentukan, maka dapat dicari nilai setelan arus dan setelan waktu kerja rele arus lebih dan rele gangguan tanah sesuai dengan rumus yang ada pada BAB II. Setelah mendapatkan nilai setelan rele yang diinginkan, langkah selanjutnya adalah menentukan sistem kerja koordinasi antara kedua rele tersebut.

3.2.5 Data-data spesifikasi sub-sistem baru

Data-data spesifikasi sub-sistem baru antara lain :

1. Rating unit pembangkit baru dan trafo utama baru (tegangan dan daya).
2. Komponen impedansi pembangkit, trafo daya, dan saluran baru.
3. Hubungan terminal pembangkit baru dan trafo utama baru.
4. Spesifikasi rele arus lebih dan rele gangguan tanah pada pembangkit baru.

3.2.6 Perhitungan impedansi urutan setelah penambahan unit pembangkit baru

Setelah ada penambahan satu unit pembangkit baru maka letak titik gangguan bertambah satu, yaitu di keluaran trafo utama pembangkit baru. Titik-titik gangguan tersebut dicari rangkaian impedansi urutannya. Tentunya tiap titik gangguan untuk kondisi setelah penambahan unit pembangkit baru tersebut memiliki impedansi urutan (Z_1, Z_2, Z_0) yang berbeda-beda.

3.2.7 Perhitungan arus gangguan sesudah penambahan unit pembangkit baru

Setelah nilai impedansi urutan (Z_1, Z_2, Z_0) setelah adanya penambahan unit pembangkit baru diperoleh, maka nilai arus gangguan dicari berdasarkan jenis gangguan yang terjadi, antara lain :

1. Gangguan tiga fasa.
2. Gangguan antar fasa.
3. Gangguan satu fasa ke tanah.
4. Gangguan dua fasa ke tanah.

Perhitungan tiap jenis gangguan berbeda-beda sesuai dengan persamaan arus gangguan yang ada pada BAB II. Dengan demikian tiap titik gangguan terdapat empat jenis gangguan yang harus dicari nilai arus gangguannya.

3.2.8 Perhitungan setelan OCR dan GFR setelah penambahan unit pembangkit baru

Setelah mendapatkan besar arus gangguan di titik gangguan yang ditentukan, maka dapat dicari nilai setelan arus dan setelan *time dial* dari OCR dan GFR pada masing-masing keluaran trafo utama lama dan baru setelah adanya penambahan unit pembangkit baru sesuai dengan rumus pada BAB II. Setelah mendapatkan nilai setelan rele yang diinginkan, langkah selanjutnya adalah menentukan sistem kerja koordinasi antara kedua rele tersebut pada keluaran trafo utama masing-masing pembangkit lama dan pembangkit baru di PLTGU Grati tersebut.

3.3 Perbandingan Hasil Koordinasi OCR dan GFR Sebelum dan Setelah Penambahan Unit Pembangkit Baru

Berdasarkan hasil perhitungan yang didapatkan, maka dapat dilakukan analisis dengan membandingkan nilai arus gangguan maksimum baik pada gangguan hubung singkat tiga fasa, dua fasa, satu fasa ke tanah, dan dua fasa ke tanah baik sebelum maupun setelah penambahan unit pembangkit baru. Setelah mengetahui perbandingan nilai arus gangguan masing-masing gangguan, selanjutnya membandingkan setelan OCR dan GFR pada masing-masing keluaran trafo utama antara sebelum dan sesudah penambahan unit pembangkit baru pada PLTGU Grati, apakah setelan OCR, GFR dan PMT lama dapat dipakai untuk kondisi setelah penambahan unit pembangkit baru berdasarkan nilai arus gangguan setelah penambahan unit pembangkit baru.

3.4 Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan dan saran diperoleh berdasarkan analisis dan hasil perhitungan perbandingan koordinasi rele arus lebih dengan rele gangguan tanah pada keluaran trafo utama masing-masing pembangkit, sebelum dan setelah ditambahkannya unit pembangkit baru pada PLTGU Grati. Pada bagian ini dijelaskan secara singkat tentang hasil analisis yang diperoleh beserta saran untuk pengembangan penelitian yang berhubungan selanjutnya.

BAB IV

PERHITUNGAN DAN ANALISIS

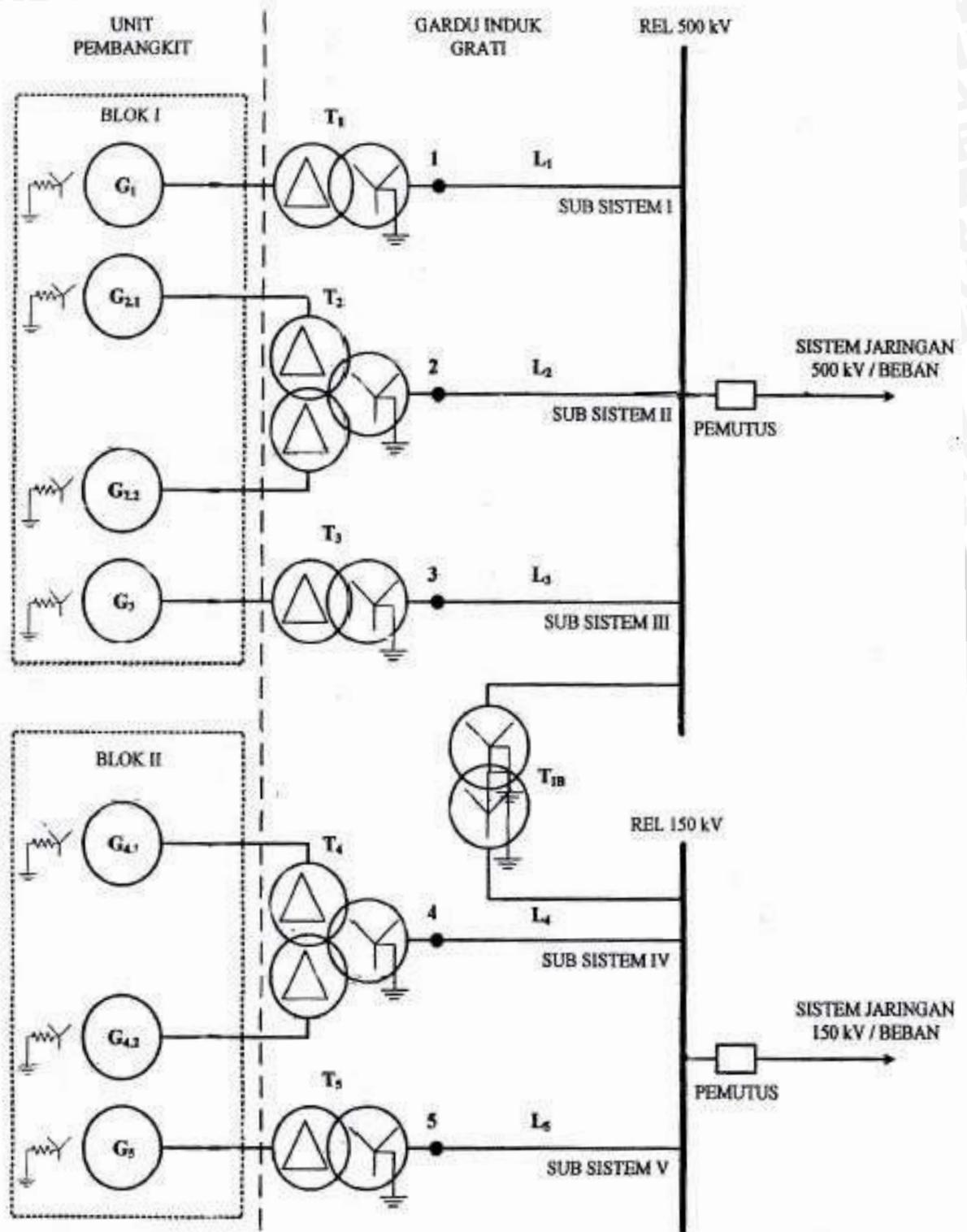
4.1 Analisis Sistem Gardu Induk Grati Sebelum Penambahan Unit Pembangkit Baru

Pembangkit Listrik Tenaga Gas-Uap (PLTGU) Grati memiliki dua kelompok pembangkit yang masing-masing terhubung ke Gardu Induk yang berbeda. Kelompok Pembangkit I merupakan kelompok pembangkit yang terhubung ke GITET 500 kV, sedangkan kelompok Pembangkit II terhubung ke GITET 150 kV. Masing-masing GITET ini dihubungkan melalui suatu trafo penghubung antar bus atau *Inter Bus Power Transformator* sehingga membentuk suatu sistem yang terdiri dari unit pembangkit, trafo utama, dan saluran.

Gangguan hubung singkat yang dapat terjadi dalam sistem tenaga listrik ada 4, yaitu :

- Gangguan hubung singkat tiga fasa.
- Gangguan hubung singkat antar fasa.
- Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah.
- Gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah.

Perhitungan arus gangguan hubung singkat dalam penelitian ini dilakukan di keluaran trafo utama yang disuplai oleh masing-masing pembangkit, baik sebelum dan setelah penambahan pembangkit baru pada PLTGU Grati. Gambar 4.1 memperlihatkan *single line diagram* sistem pembangkit PLTGU Grati sebelum penambahan unit pembangkit baru.



Gambar 4.1 *Single Line Diagram* Sistem Pembangkit PLTGU Grati
 Sumber: PLN Pusat Pelayanan Enjiniring, Co. Ltd, 2004 : 1

4.1.1 Unit pembangkit

Berdasarkan Gambar 4.1 PLTGU Grati memiliki dua kelompok pembangkit pada Sistem Gardu Induk Grati. Kelompok I terdiri dari Pembangkit I yang merupakan Pembangkit Tenaga Uap (*Steam Turbin Generator* disingkat STG), Pembangkit II dan Pembangkit III merupakan Pembangkit Tenaga Gas (*Gas Turbin Generator* disingkat GTG). Kelompok II terdiri dari Pembangkit IV dan Pembangkit V merupakan Pembangkit Tenaga Gas. Tabel 4.1 menunjukkan spesifikasi pembangkit pada PLTGU Grati.

Tabel 4.1 Spesifikasi Pembangkit PLTGU Grati

No	Jenis	Rating Daya (MVA)	Rating Tegangan (kV)	Impedansi Pentanahan / Z_N (Ω)	Reaktansi Urutan (p.u.)		
					X_1	X_2	X_0
1	STG	251.75	15.75	500	0.221	0.221	0.111
2	GTG	153.75	10.5	500	0.214	0.214	0.1107

Sumber: PLN Pusat Pelayanan Enjiniring, 1994 : 2

Dari Tabel 4.1 menunjukkan bahwa reaktansi urutan positif (X_1) dan reaktansi urutan negatif (X_2) pada masing-masing jenis pembangkit di PLTGU Grati nilainya sama.

4.1.2 Trafo utama

Trafo utama yang digunakan pada PLTGU Grati memiliki 2 jenis, yaitu trafo utama dua belitan dan trafo utama tiga belitan sesuai yang ditunjukkan pada Gambar 4.1. Tabel 4.2 menunjukkan spesifikasi dari trafo utama yang digunakan pada masing-masing pembangkit di PLTGU Grati.

Tabel 4.2 Spesifikasi Trafo Utama PLTGU Grati

No	Trafo utama	Rating Daya (MVA)	Rasio Tegangan (kV)	Hubungan	Reaktansi Trafo (%)
1	T_1	250	15.75/500	Δ/Y -to-ground	13.5
2	T_2 T_4	307.5	10.5/500 10.5/150	Δ/Y -to-ground	(H-X) 12
					(H-Y) 12
					(X-Y) 28
3	T_3 T_5	153.75	10.5/500	Δ/Y -to-ground	11.8
			10.5/150		
4	T_{IB}	500	500/150	Y-to-ground / Y-to-ground	13.5

Sumber: PLN Pusat Pelayanan Enjiniring, 1994 : 12

Dari Tabel 4.2 didapat Trafo II dan Trafo IV memiliki reaktansi antar belitan rendah (belitan X – belitan Y) dan reaktansi antar belitan tegangan rendah (belitan X atau belitan Y) dengan belitan tegangan tinggi (belitan H).

4.1.3 Saluran

Tabel 4.3 menunjukkan spesifikasi saluran yang digunakan pada PLTGU Grati sesuai yang ditunjukkan pada Gambar 4.1.

Tabel 4.3 Spesifikasi Saluran PLTGU Grati

NO	Sub-Sistem	Rating Tegangan (kV)	Panjang Saluran (m)	Impedansi/Km (Ω /Km)	Impedansi Urutan (Ω)
1	I	500	783	$0.057 + j0.128$	$0.0446 + j0.1002$
2	II	500	170	$0.014 + j0.31$	$0.00238 + j0.0527$
3	III	500	175	$0.014 + j0.31$	$0.00245 + j0.0543$
4	IV	150	309	$0.028 + j0.127$	$0.00865 + j0.0392$
5	V	150	269	$0.07 + j0.155$	$0.0188 + j0.0417$

Sumber: PLN Pusat Pelayanan Enjiniring, 1994 : 31

4.1.4 Perhitungan arus gangguan hubung singkat sebelum penambahan unit pembangkit baru

Untuk mempermudah perhitungan arus gangguan hubung singkat dilakukan dengan menggunakan sistem per unit (p.u.). Perhitungan menggunakan sistem per unit ini memerlukan besaran dasar, yaitu tegangan dasar dan daya dasar. Tegangan dasar yang digunakan disesuaikan dengan letak gangguan hubung singkat terjadi, jika gangguan terjadi pada sistem rel 500 kV maka V_{dasar} adalah 500 kV, apabila gangguan terjadi pada sistem rel 150 kV maka V_{dasar} yang digunakan adalah 150 kV. Untuk daya dasar yang digunakan yaitu 100 MVA. Hal pertama yang dilakukan dalam menghitung arus gangguan yaitu menghitung impedansi urutan masing-masing komponen. Sebagai contoh perhitungan impedansi Pembangkit I, dengan menggunakan persamaan (2-27) diperoleh impedansi dasar sebagai berikut :

dengan $V_{dasar} = 500$ kV

$S_{dasar} = 100$ MVA, maka :

$$Z_{dasar}(\Omega) = \frac{(V_{dasar}(\text{kV}))^2}{S_{dasar}(\text{MVA})}$$

$$Z_{dasar}(\Omega) = \frac{(500)^2}{100} = \frac{250000}{100} = 2500 \Omega$$

Untuk impedansi pentanahan pembangkit dalam bentuk per unit dapat dihitung menggunakan persamaan (2-28) sebagai berikut :

dengan $Z_{sebenarnya} = 500 \Omega$

$Z_{dasar} = 2500 \Omega$, maka :

$$Z(p.u.) = \frac{Z_{sebenarnya}(\Omega)}{Z_{dasar}(\Omega)}$$

$$Z_N = \frac{Z_N(\Omega)}{Z_{dasar}(\Omega)} = \frac{500}{2500} = 0.2 p.u.$$

Untuk menentukan nilai impedansi dalam bentuk per unit baru dari besaran per unit lama dapat dihitung menggunakan persamaan (2-29) sebagai berikut :

dengan $Z_{lama} (p.u.) = 0.0221 p.u.$

$kV_{lama} \text{ dasar} = 500$ kV

$kV_{baru} \text{ dasar} = 500$ kV

$kVA_{baru} \text{ dasar} = 100$ kVA

$kVA_{lama} \text{ dasar} = 251.75$ kVA, maka :

$$Z_{baru} (p. u.) = Z_{lama} (p. u.) \left(\frac{kV_{lama} \text{ dasar}}{kV_{baru} \text{ dasar}} \right)^2 \times \left(\frac{MVA_{baru} \text{ dasar}}{MVA_{lama} \text{ dasar}} \right)$$

$$\begin{aligned} Z_{1 \text{ baru}} &= 0.221 \times \left(\frac{500}{500} \right)^2 \times \left(\frac{100}{251.75} \right) = (0.221 \times 0.3972) p. u. \\ &= 0.0878 p. u. \end{aligned}$$

Dalam analisisnya, nilai $Z_1 = Z_2$, maka besar impedansi urutan negatif sama dengan nilai impedansi urutan positifnya. Sama dengan perhitungan $Z_{1 \text{ baru}}, Z_{0 \text{ baru}}$ dapat dihitung dengan persamaan (2-29) dengan mengganti $Z_{lama} (p. u.)$ dengan nilai 0.111 p.u. maka :

$$\begin{aligned} X_{0 \text{ baru}} &= 0.111 \times \left(\frac{500}{500} \right)^2 \times \left(\frac{100}{251.75} \right) = (0.111 \times 0.3972) p. u. \\ &= 0.044 p. u. \end{aligned}$$

Pembangkit I memiliki impedansi pentanahan, berdasarkan rumus $Z_0 = 3Z_N + jX_0$, maka impedansi urutan nolnya adalah :

$$\begin{aligned} Z_0 &= 3Z_N + jX_0 \\ Z_0 &= 3(0.2) + j0.044 = (0.6 + j0.044) p. u. \end{aligned}$$

Dengan cara yang sama, hasil perhitungan impedansi urutan masing-masing komponen PLTGU Grati sebelum penambahan unit pembangkit baru yang lain ditunjukkan pada Tabel 4.4 sebagai berikut.

Tabel 4.4 Impedansi Urutan Masing-masing Komponen PLTGU Grati Sebelum Penambahan Unit Pembangkit Baru

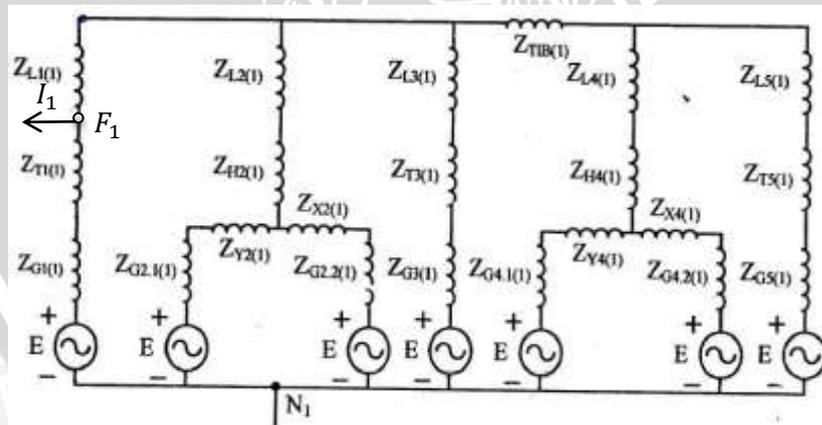
No	Komponen sistem	Impedansi urutan Komponen (p.u.)		
		Z_1	Z_2	Z_0
1	Pembangkit I	j0.0878	j0.0878	0.6 + j0.044
2	Pembangkit II, III, IV, V	j0.1392	j0.1392	0.6 + j0.072
3	Trafo I	j0.054	j0.054	j0.054
4	Trafo II, IV :			
	Sisi Tegangan Rendah (Z_X)	j0.0455	j0.0455	j0.0455
	Sisi Tegangan Rendah (Z_Y)	j0.0455	j0.0455	j0.0455
	Sisi Tegangan Tinggi (Z_H)	-j0.0065	-j0.0065	-j0.0065
5	Trafo III, V	j0.0767	j0.0767	j0.0767
6	Trafo Penghubung Rel (T_{IB})	J0.027	J0.027	J0.027

No	Komponen sistem	Impedansi Urutan Komponen (p.u.)		
		Z_1	Z_2	Z_0
7	Saluran I	$0.0000178 + j0.00004$	$0.0000178 + j0.00004$	$0.0000178 + j0.00004$
8	Saluran II	$0.00000095 + j0.000021$	$0.00000095 + j0.000021$	$0.00000095 + j0.000021$
9	Saluran III	$0.00000098 + j0.000021$	$0.00000098 + j0.000021$	$0.00000098 + j0.000021$
10	Saluran IV	$0.00000346 + j0.0000157$	$0.00000346 + j0.0000157$	$0.00000346 + j0.0000157$
11	Saluran V	$0.00000752 + j0.0000167$	$0.00000752 + j0.0000167$	$0.00000752 + j0.0000167$

Sumber: Penulis, 2015

4.1.4.1 Perhitungan impedansi ekuivalen urutan positif (Z_1)

Setelah mendapatkan impedansi masing-masing komponen, langkah selanjutnya adalah mencari impedansi urutan ekuivalen sesuai dengan titik gangguan yang terjadi. Sebagai contoh kasus, ketika gangguan (F) terjadi pada titik gangguan 1. Gambar 4.2 menunjukkan impedansi urutan positif pada titik gangguan 1.



Gambar 4.2 Rangkaian Impedansi Urutan Positif Pada Titik Gangguan 1

Sumber: PLN Pusat Pelayanan Enjiniring, Co. Ltd, 2004 : 5

Berdasarkan Gambar 4.2 yang menunjukkan rangkaian impedansi urutan positif ketika gangguan terjadi pada titik gangguan 1, impedansi-impedansi urutan positif pada Gambar 4.2 disederhanakan menjadi rangkaian pengganti atau ekuivalen untuk mendapatkan nilai impedansi urutan positif (Z_1). Langkah awal penyederhanaan

rangkaian dimulai dengan menjumlahkan nilai impedansi urutan positif yang terhubung seri (Z_S) dari Gambar 4.2 sebagai berikut dan rangkaian penyederhanaannya ditunjukkan pada Gambar 4.3 (a).

$$Z_{S1} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)} = j0.1847 \text{ p.u.}$$

$$Z_{S2} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)} = j0.1847 \text{ p.u.}$$

$$Z_{S3} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)} = (0.00000095 + j0.215921) \text{ p.u.}$$

$$Z_{S4} = Z_{G4(1)} + Z_{Y4(1)} = j0.1847 \text{ p.u.}$$

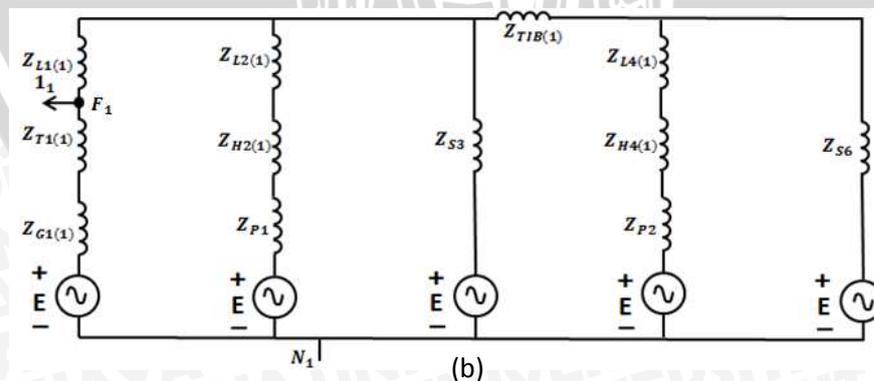
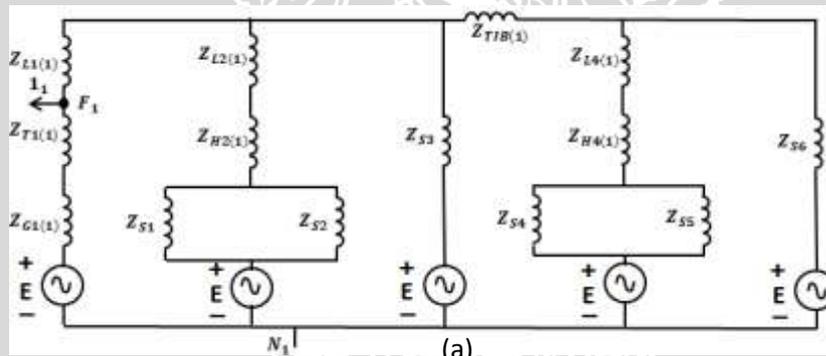
$$Z_{S5} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)} = j0.1847 \text{ p.u.}$$

$$Z_{S6} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)} = (0.00000752 + j0.2159167) \text{ p.u.}$$

Setelah menyederhanakan impedansi yang terhubung seri, langkah selanjutnya adalah menyederhanakan impedansi urutan positif pada Gambar 4.3 (a) yang terhubung paralel (Z_P) dan rangkaian penyederhanaannya ditunjukkan pada Gambar 4.3 (b).

$$Z_{P1} = Z_{S1} // Z_{S2} = j0.09235 \text{ p.u.}$$

$$Z_{P2} = Z_{S4} // Z_{S5} = j0.09235 \text{ p.u.}$$



Gambar 4.3 (a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.2

(b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.3 (a)

Sumber: Penulis, 2015

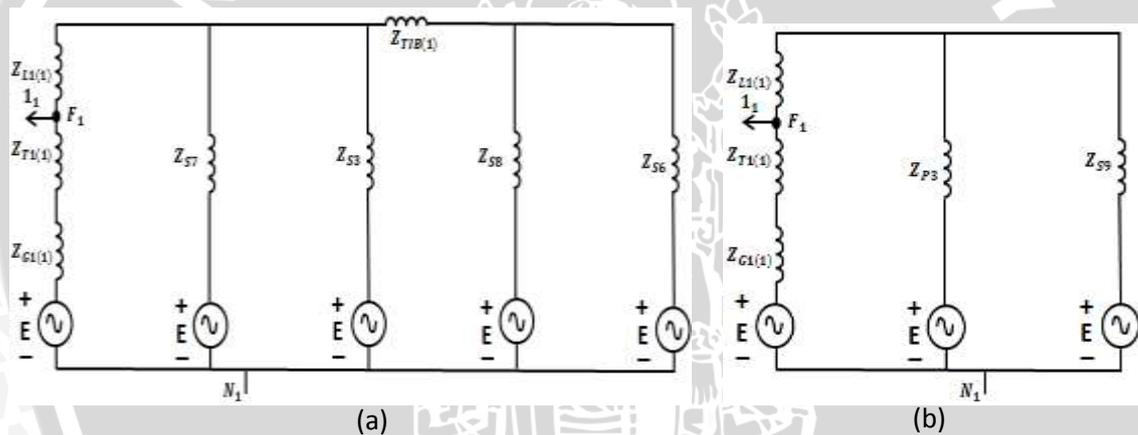
Langkah selanjutnya, impedansi urutan positif penyederhanaan paralel (Z_P) yang telah diketahui dapat dijumlah dengan impedansi urutan positif lain yang terhubung dengannya dan hasil penjumlahannya disederhanakan lagi dengan impedansi lainnya yang terhubung paralel. Gambar 4.4 (a) menunjukkan penyederhanaan Z_P yang telah diketahui sebelumnya dengan impedansi urutan positif lainnya yang terhubung seri lainnya dari Gambar 4.3 (b), sedangkan Gambar 4.4 (b) menunjukkan rangkaian penyederhanaan Z_{S7} dengan Z_{S3} , dan Z_{S8} dengan Z_{S6} yang terhubung paralel dari Gambar 4.4 (a).

$$Z_{S7} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)} = (0.00000095 + j0.085871) \text{ p.u.}$$

$$Z_{S8} = Z_{P2} + Z_{H4(1)} + Z_{L4(1)} = (0.00000346 + j0.0858657) \text{ p.u.}$$

$$Z_{P3} = Z_{S7} // Z_{S3} = (0.0000005632 + j0.0614375205) \text{ p.u.}$$

$$Z_{P4} = Z_{S8} // Z_{S6} = (0.00000237993 + j0.06142349273) \text{ p.u.}$$



Gambar 4.4 (a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.3 (b)
(b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.4 (a)

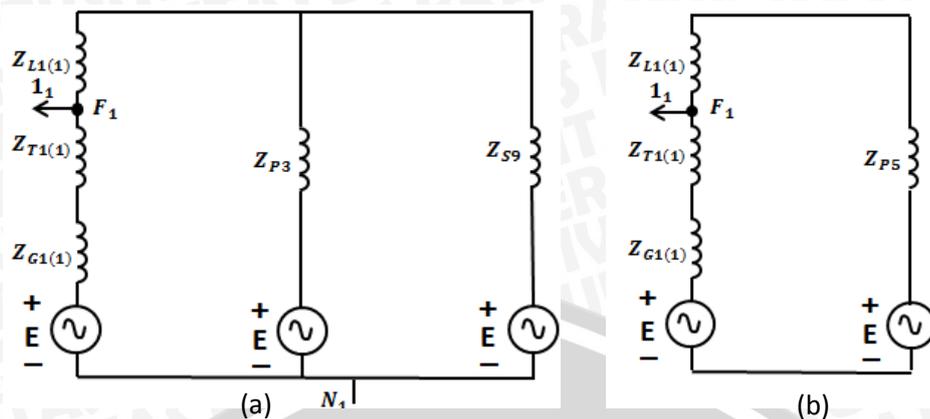
Sumber: Penulis, 2015

Z_{P4} dengan impedansi urutan positif trafo inter bus ($Z_{TIB(1)}$) yang terhubung seri disederhanakan dengan cara di bawah ini, dan Gambar 4.5 (a) menunjukkan rangkaian penyederhanaan Z_{P4} dan $Z_{TIB(1)}$ dari Gambar 4.4 (b).

$$Z_{S9} = Z_{TIB(1)} + Z_{P4} = (0.00000237993 + j0.08842349213) \text{ p.u.}$$

Z_{S9} dan Z_{P3} yang terhubung paralel disederhanakan dengan cara di bawah ini, dan Gambar 4.5 (b) menunjukkan rangkaian penyederhanaan Z_{S9} dan Z_{P3} dari Gambar 4.5 (a) tersebut.

$$Z_{P5} = Z_{P3} // Z_{S9} = (0.00000059607 + j0.03625038981) \text{ p.u.}$$



Gambar 4.5 (a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.4 (b)
 (b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.5 (a)

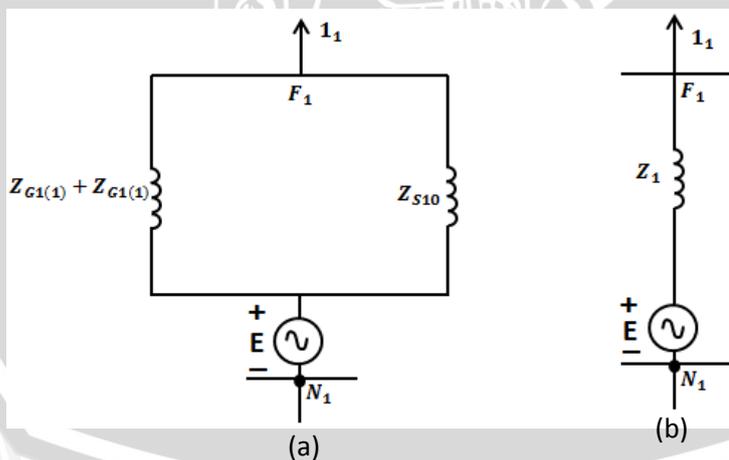
Sumber: Penulis, 2015

Z_{P5} dan impedansi urutan positif saluran sub-pembangkit 1 ($Z_{L1(1)}$) dari Gambar 4.5 (b) disederhanakan lagi dengan cara di bawah ini, dan rangkaian penyederhanaannya ditunjukkan pada Gambar 4.6 (a).

$$Z_{S10} = Z_{P5} + Z_{L1(1)} = (0.00001839607 + j0.03629038981) p.u.$$

Setelah Z_{S10} diketahui, impedansi pengganti urutan positif pada titik gangguan 1 dapat dihitung dengan cara di bawah ini, dan rangkaian impeansi ekivalen urutan positif pada titik gangguan 1 ditunjukkan pada Gambar 4.6 (b).

$$Z_1 = (Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)}) // Z_{S10} = (0.00001166263 + j0.02889531262) p.u.$$



Gambar 4.6 (a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.5 (b)
 (b) Rangkaian Impedansi Ekivalen Urutan Positif (Z_1) Pada Titik Gangguan 1

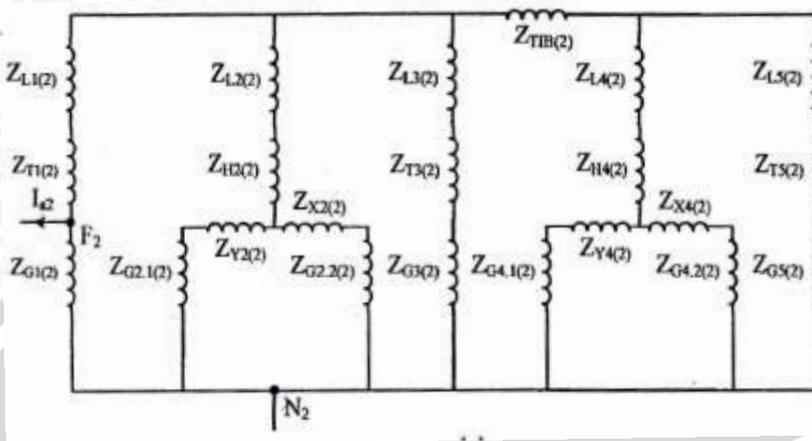
Sumber: Penulis, 2015

Untuk titik gangguan lainnya, nilai impedansi ekivalen urutan positif dapat dicari dengan cara yang sama berdasarkan Lampiran I.



4.1.4.2 Perhitungan impedansi ekivalen urutan negatif (Z_2)

Sama halnya dengan rangkaian impedansi urutan positif, dengan mengambil contoh kasus pada titik gangguan 1, diperoleh rangkaian impedansi urutan negatif yang ditunjukkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Rangkaian Impedansi Urutan Negatif Pada Titik Gangguan 1
Sumber: PLN Pusat Pelayanan Enjiniring, Co. Ltd, 2004 : 5

Sama dengan rangkaian impedansi urutan positif, Gambar 4.7 yang menunjukkan rangkaian impedansi urutan negatif ketika gangguan terjadi pada titik gangguan 1, impedansi-impedansi urutan negatif pada Gambar 4.7 disederhanakan menjadi rangkaian pengganti atau ekivalen untuk mendapatkan nilai impedansi urutan negatif (Z_2). Langkah awal penyederhanaan rangkaian dimulai dengan menjumlahkan nilai impedansi urutan negatif yang terhubung seri (Z_S) dari Gambar 4.7 dan rangkaian penyederhanaannya ditunjukkan pada Gambar 4.8 (a).

$$Z_{S1} = Z_{G2.1(2)} + Z_{Y2(2)} = j0.1847 \text{ p.u.}$$

$$Z_{S2} = Z_{G2.2(2)} + Z_{X2(2)} = j0.1847 \text{ p.u.}$$

$$Z_{S3} = Z_{G3(2)} + Z_{T3(2)} + Z_{L3(2)} = (0.00000095 + j0.215921) \text{ p.u.}$$

$$Z_{S4} = Z_{G4(2)} + Z_{Y4(2)} = j0.1847 \text{ p.u.}$$

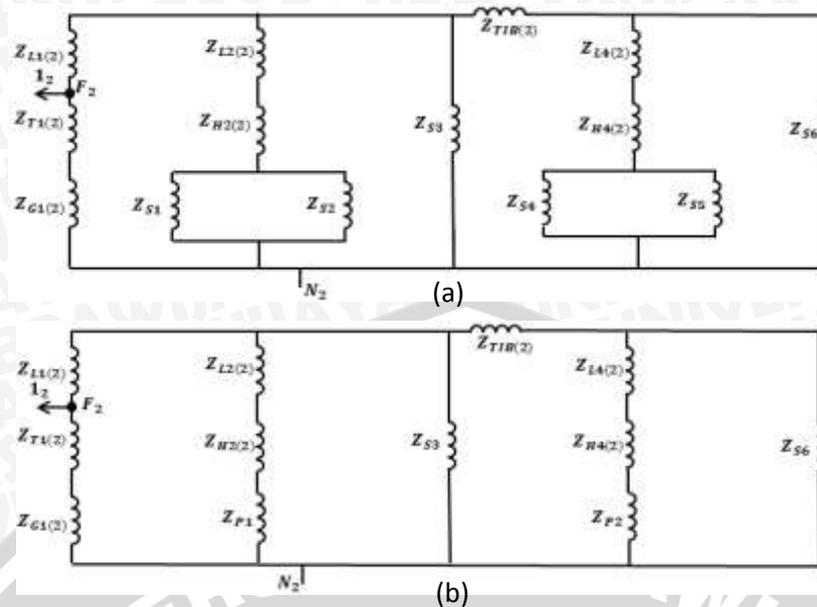
$$Z_{S5} = Z_{G4.2(2)} + Z_{X4(2)} = j0.1847 \text{ p.u.}$$

$$Z_{S6} = Z_{G5(2)} + Z_{T5(2)} + Z_{L5(2)} = (0.00000752 + j0.2159167) \text{ p.u.}$$

Setelah menyederhanakan impedansi yang terhubung seri, langkah selanjutnya menyederhanakan impedansi urutan negatif yang terhubung paralel (Z_P) dari Gambar 4.8 (a) dan rangkaian penyederhanaannya ditunjukkan pada Gambar 4.8 (b).

$$Z_{P1} = Z_{S1} // Z_{S2} = j0.09235 \text{ p.u.}$$

$$Z_{P2} = Z_{S4} // Z_{S5} = j0.09235 \text{ p.u.}$$



Gambar 4.8 (a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.7

(b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.8 (a)

Sumber: Penulis, 2015

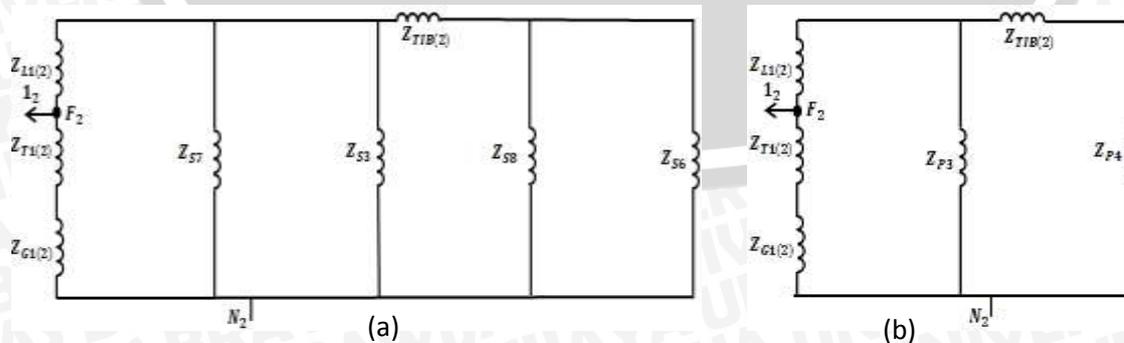
Langkah selanjutnya, impedansi urutan negatif penyederhanaan paralel (Z_P) yang diketahui dijumlah dengan impedansi urutan negatif lain yang terhubung seri dan hasil penjumlahannya disederhanakan lagi dengan impedansi lainnya yang terhubung paralel. Gambar 4.9 (a) menunjukkan rangkaian penyederhanaan Z_P yang telah diketahui sebelumnya dengan impedansi urutan negatif lain yang terhubung seri dari Gambar 4.8 (b), sedangkan Gambar 4.9 (b) menunjukkan rangkaian penyederhanaan Z_{S7} dengan Z_{S3} , dan Z_{S8} dengan Z_{S6} yang terhubung paralel dari Gambar 4.9 (a).

$$Z_{S7} = Z_{P1} + Z_{H2(2)} + Z_{L2(2)} = (0.00000095 + j0.085871) p.u.$$

$$Z_{S8} = Z_{P2} + Z_{H4(2)} + Z_{L4(2)} = (0.00000346 + j0.0858657) p.u.$$

$$Z_{P3} = Z_{S7} // Z_{S3} = (0.0000005632 + j0.0614375205) p.u.$$

$$Z_{P4} = Z_{S8} // Z_{S6} = (0.00000237993 + j0.06142349273) p.u.$$



Gambar 4.9 (a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.8 (b)

(b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.9 (a)

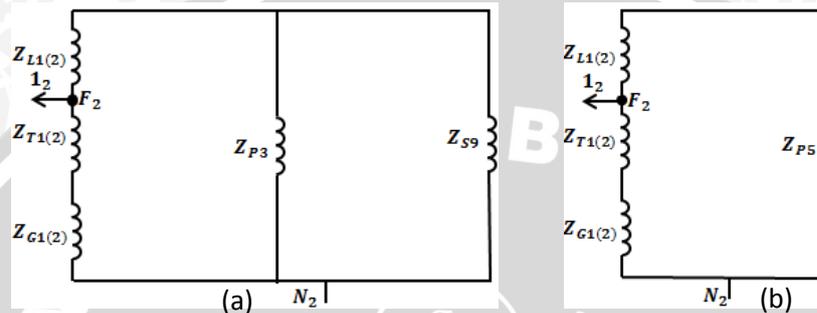
Sumber: Penulis, 2015

Z_{P4} dengan impedansi urutan negatif trafo inter bus ($Z_{TIB(2)}$) yang terhubung seri disederhanakan dengan cara di bawah ini, dan Gambar 4.10 (a) menunjukkan rangkaian penyederhanan Z_{P4} dan $Z_{TIB(2)}$ dari Gambar 4.9 (b).

$$Z_{S9} = Z_{TIB(2)} + Z_{P4} = (0.00000237993 + j0.08842349213) \text{ p.u.}$$

Z_{S9} dan Z_{P3} yang terhubung paralel disederhanakan dengan cara di bawah ini, Gambar 4.10 (b) menunjukkan rangkaian penyederhanan Z_{S9} dan Z_{P3} dari Gambar 4.10 (a).

$$Z_{P5} = Z_{P3} // Z_{S9} = (0.00000059607 + j0.03625038981) \text{ p.u.}$$



Gambar 4.10 (a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.9 (b)
(b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.10 (a)

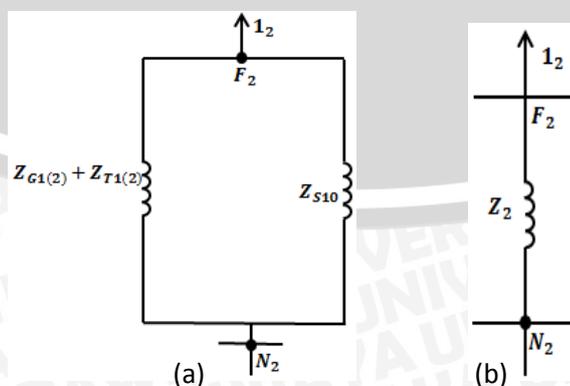
Sumber: Penulis, 2015

Z_{P5} dan impedansi urutan negatif saluran sub-pembangkit 1 ($Z_{L1(2)}$) dari Gambar 4.10 (b) disederhanakan lagi dengan cara di bawah ini, dan rangkaian penyederhanaannya ditunjukkan pada Gambar 4.11 (a).

$$Z_{S10} = Z_{P5} + Z_{L1(2)} = (0.00001839607 + j0.03629038981) \text{ p.u.}$$

Setelah Z_{S10} diketahui, impedansi pengganti urutan negatif pada titik gangguan 1 dapat dihitung dengan cara di bawah ini, dan rangkaian impedansi ekivalen urutan negatif pada titik gangguan 1 ditunjukkan pada Gambar 4.11 (b).

$$Z_2 = (Z_{G1(2)} + Z_{T1(2)}) // Z_{S10} = (0.00001166263 + j0.02889531262) \text{ p.u.}$$



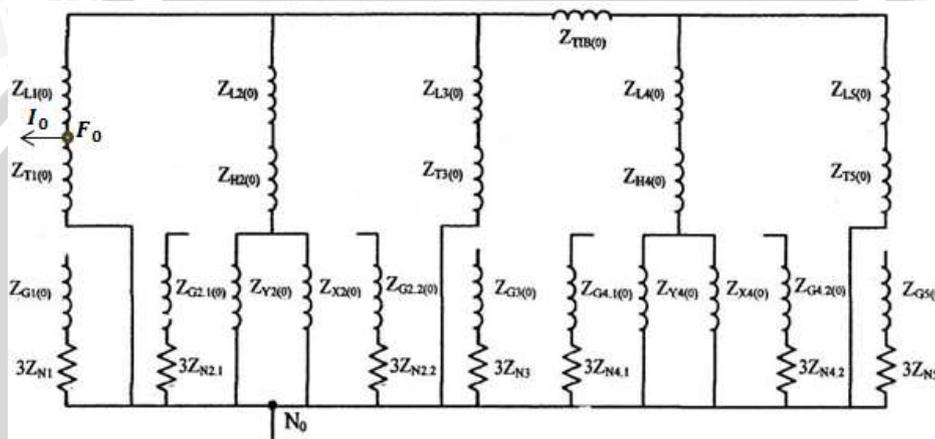
Gambar 4.11 (a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.10 (b)
(b) Rangkaian Impedansi Ekivalen Urutan Negatif (Z_2) Pada Titik Gangguan 1

Sumber: Penulis, 2015

Dalam penyederhanaannya, membuktikan bahwa besar nilai impedansi ekivalen urutan negatif (Z_2) sama dengan impedansi ekivalen urutan positifnya (Z_1). Untuk titik gangguan lainnya, nilai impedansi ekivalen urutan negatif dapat dicari dengan cara yang sama berdasarkan Lampiran I.

4.1.4.3 Perhitungan impedansi ekivalen urutan nol (Z_0)

Sama halnya dengan rangkaian impedansi urutan positif dan negatif, dengan mengambil contoh kasus pada titik gangguan 1, diperoleh rangkaian impedansi urutan nol yang ditunjukkan pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Rangkaian Impedansi Urutan Nol Pada Titik Gangguan 1
Sumber: PLN Pusat Pelayanan Enjiniring, Co. Ltd, 2004 : 5

Sama dengan rangkaian impedansi urutan positif dan negatif, Gambar 4.12 yang menunjukkan rangkaian impedansi urutan nol ketika gangguan terjadi pada titik gangguan 1, impedansi-impedansi urutan nol pada Gambar 4.12 disederhanakan menjadi rangkaian pengganti atau ekivalen untuk mendapatkan nilai impedansi urutan nol (Z_0). Dari Gambar 4.12 diketahui bahwa impedansi generator urutan nol ($Z_{G(0)}$) dan impedansi pentanahannya ($3Z_N$) merupakan rangkaian hubung buka, sehingga apabila analisis dilakukan pada keluaran trafo utama maka impedansi urutan nol generator ($Z_{G(0)}$) dan impedansi pentanahannya ($3Z_N$) dapat diabaikan. Langkah awal penyederhanaan rangkaian dimulai dengan menyederhanakan nilai impedansi urutan nol yang terhubung paralel (Z_p) dari Gambar 4.12 dan rangkaian penyederhanaannya ditunjukkan pada Gambar 4.13 (a).

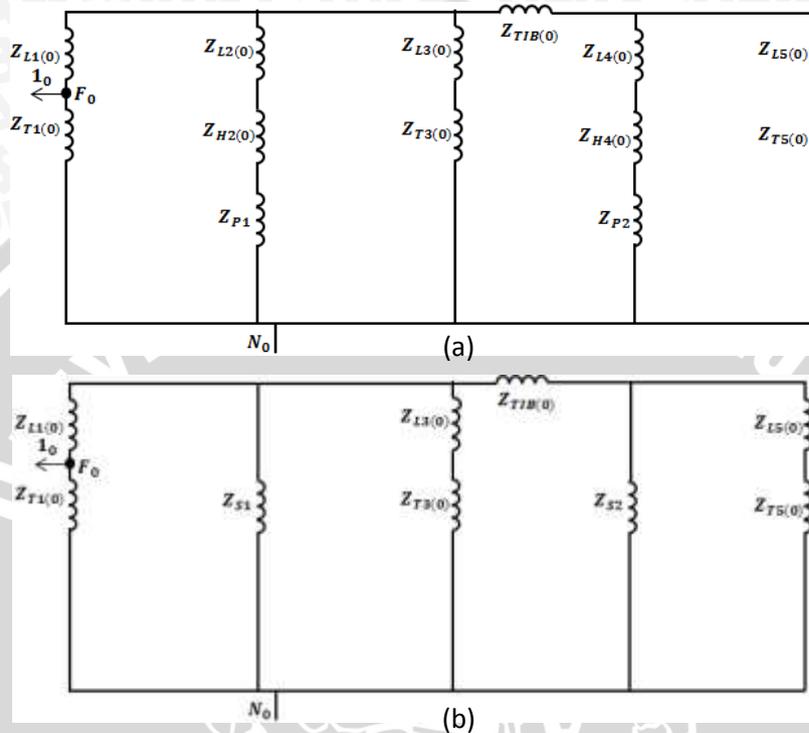
$$Z_{P1} = Z_{Y2(0)} // Z_{X2(0)} = j0.02275 \text{ p.u.}$$

$$Z_{P2} = Z_{Y4(0)} // Z_{X4(0)} = j0.02275 \text{ p.u.}$$

Langkah selanjutnya impedansi paralel (Z_P) dari Gambar 4.13 (a) yang sudah dihitung kemudian dijumlah dengan nilai impedansi yang terhubung seri dengannya dan rangkaian penyederhanaannya ditunjukkan pada Gambar 4.13 (b).

$$Z_{S1} = Z_{H2(0)} + Z_{P1} + Z_{L2(0)} = (0.00000095 + j0.016271) p.u.$$

$$Z_{S2} = Z_{H4(0)} + Z_{P2} + Z_{L4(0)} = (0.00000346 + j0.0162657) p.u.$$



Gambar 4.13 (a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.12
(b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.13 (a)

Sumber: Penulis, 2015

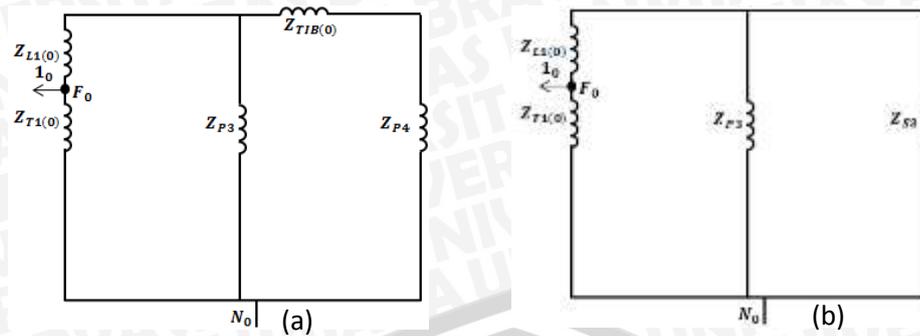
Nilai Z_{S1} yang terhubung paralel dengan hasil penjumlahan $Z_{T3(0)}$ dan $Z_{L3(0)}$, serta Z_{S2} yang juga terhubung paralel dengan hasil penjumlahan $Z_{T5(0)}$ dan $Z_{L5(0)}$ dari Gambar 4.13 (b) disederhanakan dengan cara di bawah ini dan rangkaian penyederhanaannya ditunjukkan pada Gambar 4.14 (a).

$$Z_{P3} = Z_{S1} // (Z_{T3(0)} + Z_{L3(0)}) = (0.00000067572 + j0.01342402993) p.u.$$

$$Z_{P4} = Z_{S2} // (Z_{T5(0)} + Z_{L5(0)}) = (0.00000258546 + j0.01342029061) p.u.$$

Karena Z_{P4} terhubung seri dengan impedansi urutan nol trafo inter bus $Z_{TIB(0)}$ penyederhanaannya dapat langsung dijumlahkan. Gambar 4.14 (b) menunjukkan rangkaian penyederhanaan Z_{P4} dengan $Z_{TIB(0)}$ dari Gambar 4.14 (a).

$$Z_{S3} = Z_{TIB(0)} + Z_{P4} = (0.00000258546 + j0.04042029061) p.u.$$



Gambar 4.14 (a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.13 (b)
(b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.14 (a)

Sumber: Penulis, 2015

Z_{S3} yang terhubung paralel dengan Z_{P3} pada Gambar 4.14 (b) disederhanakan dengan cara di bawah ini dan rangkaian penyederhanaannya ditunjukkan pada Gambar 4.15 (a).

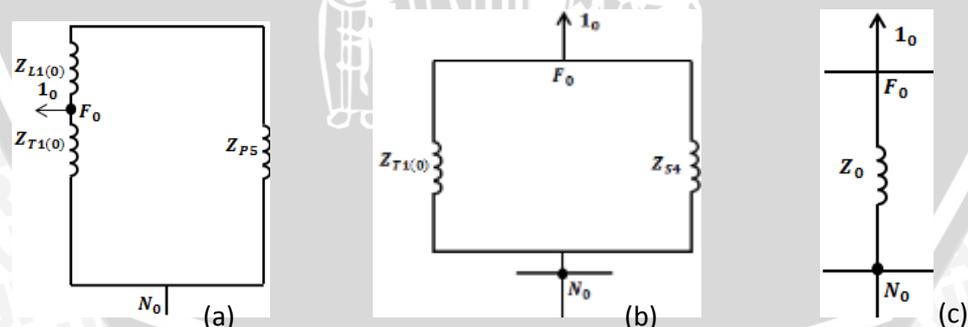
$$Z_{P5} = Z_{S3} // Z_{P3} = (0.00000034149 + j0.01007725951) \text{ p.u.}$$

Z_{P5} yang terhubung seri dengan impedansi saluran satu urutan nol ($Z_{L1(0)}$) pada Gambar 4.15 (a) disederhanakan dengan cara menjumlahkannya langsung dan rangkaian penyederhanaannya ditunjukkan pada Gambar 4.15 (b).

$$Z_{S4} = Z_{L1(0)} + Z_{P5} = (0.00001814149 + j0.010117259) \text{ p.u.}$$

Setelah nilai Z_{S4} diketahui maka impedansi ekivalen urutan nol pada titik gangguan 1 dapat diketahui dengan memparalelkan Z_{S4} dengan impedansi urutan nol trafo utama sub pembangkit 1 yang ditunjukkan Gambar 4.15 (b), Gambar 4.15 (c) menunjukkan rangkaian impedansi ekivalen urutan nol pada titik gangguan 1.

$$Z_0 = Z_{S4} // Z_{T1(0)} = (0.00001300985 + j0.00852082974) \text{ p.u.}$$



Gambar 4.15 (a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.14 (b)
(b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.14 (a)
(c) Rangkaian Impedansi Ekivalen Urutan Nol (Z_0) Pada Titik Gangguan 1

Sumber: Penulis, 2015

Dengan menggunakan cara yang sama dengan penyederhanaan impedansi urutan positif, negatif, dan nol pada titik gangguan 1 berdasarkan Lampiran I, besar impedansi ekivalen urutan positif, negatif, dan nol sebelum penambahan pembangkit

baru di PLTGU Grati pada masing-masing titik gangguan dapat diketahui. Hasil perhitungan impedansi urutan ekivalen pada masing-masing titik gangguan sebelum penambahan unit pembangkit baru di PLTGU Grati ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Impedansi Urutan Ekivalen Pada Masing-masing Titik Gangguan di PLTGU Grati Sebelum Penambahan Unit Pembangkit Baru

Titik Gangguan	Impedansi Urutan Z_1 , Z_2 , dan Z_0 (p.u.)
1	$Z_1 = 0.00001166263 + j0.02889531262$ $Z_2 = Z_1$ $Z_0 = 0.00001300985 + j0.00852082974$
2	$Z_1 = 0.0000014260938 + j0.028878479$ $Z_2 = Z_1$ $Z_0 = 0.00000076176 + j0.00878937152$
3	$Z_1 = 0.00000181121 + j0.02888815617$ $Z_2 = Z_1$ $Z_0 = 0.00000156315 + j0.00850976989$
4	$Z_1 = 0.0000019146 + j0.0326941497$ $Z_2 = Z_1$ $Z_0 = 0.00000073206 + j0.00989586826$
5	$Z_1 = 0.00000633177838 + j0.032702049$ $Z_2 = Z_1$ $Z_0 = 0.00000546713 + j0.0119905369$

Sumber: Hasil Perhitungan, 2015

Sebagai contoh perhitungan, dengan mengambil kasus pada perhitungan gangguan tiga fasa pada keluaran trafo utama 1, impedansi urutan pada Tabel 4.5 dimasukkan ke dalam persamaan (2-34).

dengan $E_a = 1 \angle 0^\circ$ p.u.

$$Z_1 = (0.00001166263 + j0.02889531262) \text{ p.u.}$$

$$Z_2 = Z_1$$

$$Z_0 = (0.00001300985 + j0.00852082974) \text{ p.u.}, \text{ maka :}$$

$$\begin{aligned}
 I_f &= \frac{E_a}{Z_1} \\
 &= \frac{(1L0^\circ)}{(0.00001166263 + j0.02889531262)} \\
 &= (0.013968238 - j34.60768361) \text{ p.u.}
 \end{aligned}$$

Arus dasar diperoleh dengan menggunakan persamaan (2-26).

dengan $S_{dasar} = 100000 \text{ kVA}$

$V_{dasar} = 500 \text{ kV}$, maka :

$$\begin{aligned}
 I_{dasar} \text{ (A)} &= \frac{S_{dasar} \text{ (kVA)}}{\sqrt{3} \cdot V_{dasar} \text{ (kV)}} \\
 I_{dasar} &= \frac{100000}{\sqrt{3}(500)} \\
 &= 115.47 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Sehingga arus gangguan tiga fasa saat gangguan terjadi pada titik 1 adalah :

$$\begin{aligned}
 I_f \text{ (A)} &= I_f \text{ (p.u.)} \times I_{dasar} \text{ (A)} \\
 I_f \text{ (A)} &= (0.013968238 - j34.60768361) \times 115.47 \\
 &= 1.612912463 - 3996.149227 \\
 &= 3996.149552 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Dengan demikian nilai arus gangguan hubung singkat, baik gangguan satu fasa ke tanah, gangguan dua fasa ke tanah, gangguan antar fasa, maupun gangguan tiga fasa lainnya berdasarkan persamaan pada BAB II di setiap titik gangguan pada sistem Gardu Induk Grati sebelum penambahan pembangkit dapat diketahui. Besar arus gangguan hubung singkat pada masing-masing titik gangguan lainnya ditunjukkan pada Tabel 4.6.

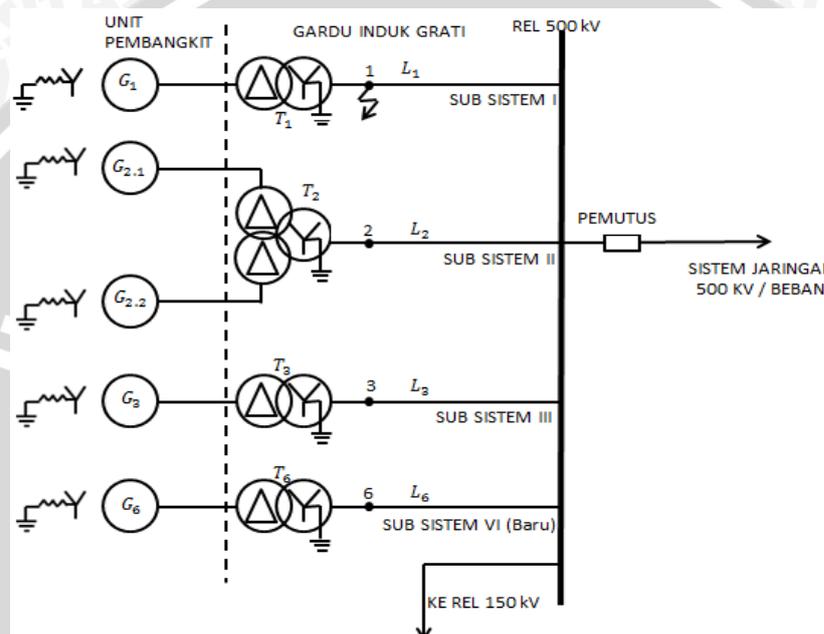
Tabel 4.6 Arus Gangguan Hubung Singkat Pada Masing-masing Titik Gangguan di PLTGU Grati Sebelum Penambahan Unit Pembangkit Baru

Titik Gangguan	Arus Gangguan (A)			
	3Φ	2Φ	2Φ-G	1Φ-G
1	3996.14955	3460.76703	3254.90505	1741.32784
2	3998.47927	3462.78463	3241.99582	1735.18205
3	3997.13983	3461.62464	3256.20218	1741.99463
4	11772.74842	10195.49921	9553.07422	5112.62874
5	11769.90448	10193.03627	9280.14256	4973.21280

Sumber: Hasil Perhitungan, 2015

4.2 Analisis Sistem Gardu Induk Grati Setelah Penambahan Unit Pembangkit Baru

Pembangkit baru yang ditambahkan pada sistem Gardu Induk Grati berjumlah satu unit dan terhubung ke GITET 500 kV membentuk sub-sistem baru. Sub-sistem ini terdiri dari satu unit pembangkit baru, satu trafo utama baru dan saluran baru yang terhubung ke rel 500 kV. Data desain pembangkit baru diberikan pada Lampiran III. Gambar 4.16 menunjukkan *single line diagram* 500 kV PLTGU Grati setelah penambahan unit pembangkit baru.



Gambar 4.16 *Single Line Diagram* 500 kV PLTGU Grati Setelah Penambahan Unit Pembangkit Baru

Sumber: PLN Pusat Pelayanan Enjiniring, Co. Ltd, 2004 : 2

4.2.1 Unit pembangkit baru

Pembangkit baru yang ditambahkan pada sistem Gardu Induk Grati merupakan jenis pembangkit tenaga gas (GTG). Data unit pembangkit baru yang diketahui adalah rating daya dan tegangan, reaktansi urutan, dan impedansi pentanahan. Data pembangkit baru diperoleh sebagai berikut :

Rating Daya	: 350 MVA
Rating Tegangan	: 21 kV
Reaktansi Urutan Positif (X_1)	: 0.214 p.u.
Reaktansi Urutan Negatif (X_2)	: 0.214 p.u.
Reaktansi Urutan Nol (X_0)	: 0.1107 p.u.
Impedansi Pentanahan (Z_N)	: 500 Ω

4.2.2 Trafo utama baru

Data spesifikasi Trafo utama baru yang diketahui berupa rating daya, rasio tegangan, hubungan trafo dan reaktansi trafo. Data-data tersebut antara lain :

Rating Daya	: 350 MVA
Rasio Tegangan	: 21/500 kV
Hubungan	: Δ/Y -to-ground
Reaktansi Trafo	: 11 %

4.2.3 Saluran baru

Data spesifikasi saluran baru yang diketahui berupa panjang saluran, rating tegangan, impedansi urutan per kilometer, dan impedansi urutan. Data-data tersebut antara lain :

Panjang Saluran	: 170 m
Rating Tegangan	: 500 kV
Impedansi Urutan/km	: $(0.014 + j0.31) \Omega/\text{km}$
Impedansi Urutan	: $(0.00238 + j0.0527) \Omega$

4.2.4 Perhitungan arus gangguan hubung singkat setelah penambahan unit pembangkit baru

Perhitungan arus gangguan hubung singkat setelah penambahan unit pembangkit baru pada prinsipnya sama dengan perhitungan arus gangguan hubung singkat sebelum penambahan unit pembangkit baru, namun setelah penambahan pembangkit baru titik gangguan bertambah satu (keluaran trafo utama baru) dan nilai impedansi urutan ekuivalen sistem berubah setelah penambahan unit pembangkit baru. Sama dengan perhitungan impedansi urutan komponen sistem PLTGU Grati sebelum penambahan pembangkit baru, langkah pertama yang dilakukan adalah menghitung impedansi dasar. Berdasarkan Gambar 4.15 diketahui bahwa pembangkit baru terhubung ke rel 500 kV maka V_{dasar} yang digunakan adalah 500 kV, dan S_{dasar} yang digunakan adalah 100 MVA. Sebagai contoh kasus yaitu perhitungan impedansi urutan pada pembangkit baru (Z_{G6}), dengan menggunakan persamaan (2-27) maka impedansi dasar dapat dihitung.

$$Z_{dasar}(\Omega) = \frac{(V_{dasar}(\text{kV}))^2}{S_{dasar}(\text{MVA})}$$

$$Z_{dasar}(\Omega) = \frac{(500)^2}{100} = \frac{250000}{100} = 2500 \Omega$$

Untuk impedansi pentanahan pembangkit baru dalam bentuk p.u. dapat dihitung menggunakan persamaan (2-28) sebagai berikut :

dengan $Z_{sebenarnya} = 500 \Omega$

$Z_{dasar} = 2500 \Omega$, maka :

$$Z(p.u.) = \frac{Z_{sebenarnya} (\Omega)}{Z_{dasar} (\Omega)}$$

$$Z_N = \frac{Z_N (\Omega)}{Z_{dasar} (\Omega)} = \frac{500}{2500} = 0.2 p.u.$$

Untuk menentukan nilai impedansi dalam bentuk per unit baru dari besaran per unit lama dapat dihitung menggunakan persamaan (2-29) sebagai berikut :

dengan $Z_{lama} (p.u.) = 0.214 p.u.$

$kV_{lama} \text{ dasar} = 500 \text{ kV}$

$kV_{baru} \text{ dasar} = 500 \text{ kV}$

$kVA_{baru} \text{ dasar} = 100 \text{ kVA}$

$kVA_{lama} \text{ dasar} = 350 \text{ kVA}$, maka :

$$Z_{baru} (p.u.) = Z_{lama} (p.u.) \left(\frac{kV_{lama} \text{ dasar}}{kV_{baru} \text{ dasar}} \right)^2 \times \left(\frac{MVA_{baru} \text{ dasar}}{MVA_{lama} \text{ dasar}} \right)$$

$$\begin{aligned} Z_{1 \text{ baru}} (p.u.) &= 0.214 \times \left(\frac{500}{500} \right)^2 \times \left(\frac{100}{350} \right) \\ &= 0.0611 p.u. \end{aligned}$$

Dalam analisisnya, nilai impedansi urutan negatif sama dengan nilai impedansi urutan positifnya. Sama dengan perhitungan $Z_{1 \text{ baru}}$, $Z_{0 \text{ baru}}$ dapat dihitung dengan persamaan (2-29) dengan mengganti $Z_{lama} (p.u.)$ dengan nilai 0.1107 p.u. maka :

$$\begin{aligned} X_{0 \text{ baru}} &= 0.1107 \times \left(\frac{500}{500} \right)^2 \times \left(\frac{100}{350} \right) \\ &= 0.0316 p.u. \end{aligned}$$

Pembangkit I memiliki impedansi pentanahan, berdasarkan rumus $Z_0 = 3Z_N + jX_0$, maka impedansi urutan nolnya adalah :

$$Z_0 = 3Z_N + jX_0$$

$$Z_0 = 3(0.2) + j0.0316 = (0.6 + j0.0316) p.u.$$

Dengan cara yang sama, hasil perhitungan impedansi urutan masing-masing komponen PLTGU Grati setelah penambahan pembangkit baru yang lain ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Nilai Impedansi Urutan Komponen Sub-Sistem Baru

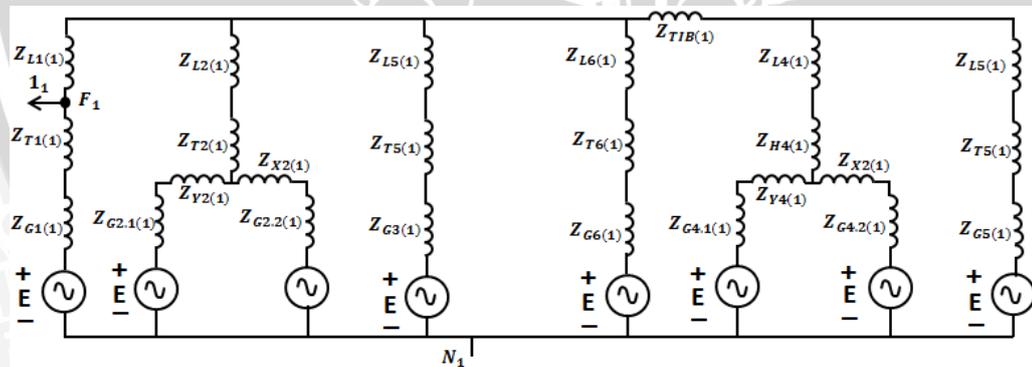
No	Komponen Baru	Impedansi Urutan Komponen (p.u.)		
		Z_1	Z_2	Z_0
1	Pembangkit VI (G_6)	J0.0611	J0.0611	0.6 + J0.0316
2	Trafo VI (T_6)	J0.0314	J0.0314	J0.0314
3	Saluran VI (L_6)	0.00000095 + j0.000021	0.00000095 + j0.000021	0.00000095 + j0.000021

Sumber: Penulis, 2015

Setelah mendapatkan impedansi masing-masing komponen, langkah selanjutnya adalah mencari impedansi urutan ekivalen sesuai dengan titik gangguan yang terjadi.

4.2.4.1 Perhitungan impedansi ekivalen urutan positif (Z_1)

Sama dengan langkah pengerjaan sebelum penambahan pembangkit baru, setelah mendapatkan impedansi masing-masing komponen, langkah selanjutnya adalah mencari impedansi urutan ekivalen sesuai dengan titik gangguan yang terjadi. Sebagai contoh kasus, ketika gangguan (F) terjadi pada titik gangguan 1. Gambar 4.17 menunjukkan rangkaian impedansi urutan positif pada titik gangguan 1 setelah penambahan unit pembangkit baru.



Gambar 4.17 Rangkaian Impedansi Urutan Positif Pada Titik Gangguan 1 Setelah Penambahan Unit Pembangkit Baru

Sumber: Penulis, 2015

Berdasarkan Gambar 4.17 yang menunjukkan rangkaian impedansi urutan positif ketika gangguan terjadi pada titik gangguan 1 setelah penambahan unit pembangkit baru, impedansi-impedansi urutan positif pada Gambar 4.17 disederhanakan menjadi rangkaian pengganti atau ekivalen untuk mendapatkan nilai impedansi urutan positif (Z_1). Langkah awal penyederhanaan rangkaian dimulai dengan menjumlahkan nilai

impedansi urutan positif yang terhubung seri (Z_S) dari Gambar 4.17 dan rangkaian penyederhanaannya ditunjukkan pada Gambar 4.18 (a).

$$Z_{S1} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)} = j0.1847 \text{ p.u.}$$

$$Z_{S2} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)} = j0.1847 \text{ p.u.}$$

$$Z_{S3} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)} = (0.00000095 + j0.215921) \text{ p.u.}$$

$$Z_{S4} = Z_{G4(1)} + Z_{Y4(1)} = j0.1847 \text{ p.u.}$$

$$Z_{S5} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)} = j0.1847 \text{ p.u.}$$

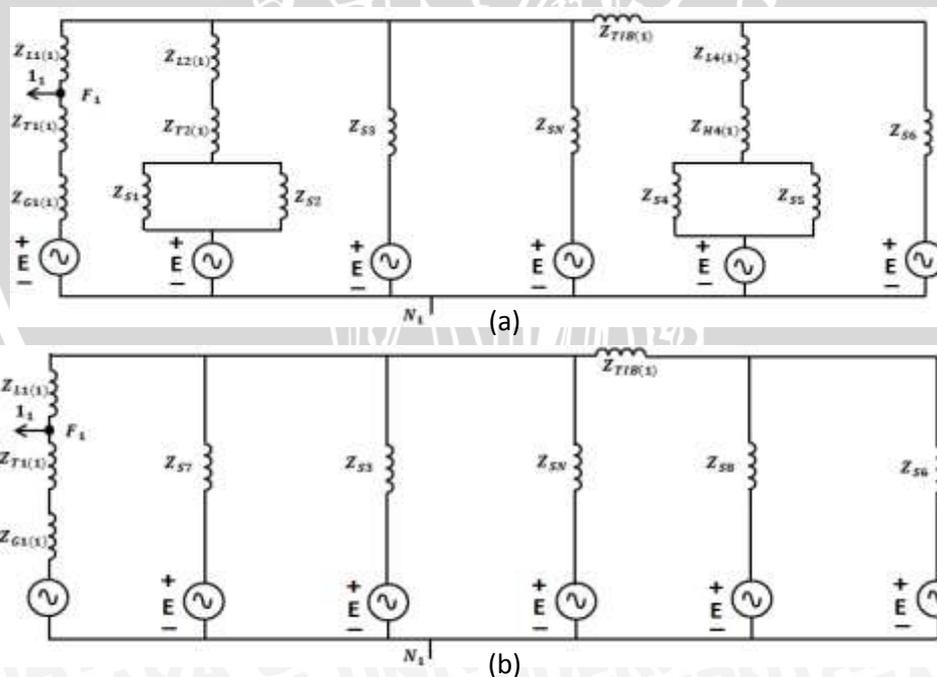
$$Z_{S6} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)} = (0.00000752 + j0.2159167) \text{ p.u.}$$

$$Z_{SN} = Z_{G6(1)} + Z_{T6(1)} + Z_{L6(1)} = (0.00000095 + j0.092521) \text{ p.u.}$$

Dimana Z_{SN} merupakan penyederhanaan impedansi sistem pembangkit baru urutan positif yang terhubung seri. Setelah menyederhanakan impedansi yang terhubung seri, langkah selanjutnya menyederhanakan impedansi urutan positif dari Gambar 4.18 (a) yang terhubung paralel (Z_P) dan rangkaian penyederhanaannya ditunjukkan pada Gambar 4.18 (b).

$$Z_{P1} = Z_{S1} // Z_{S2} = j0.09235 \text{ p.u.}$$

$$Z_{P2} = Z_{S4} // Z_{S5} = j0.09235 \text{ p.u.}$$



Gambar 4.18 (a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.17

(b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.18 (a)

Sumber: Penulis, 2015

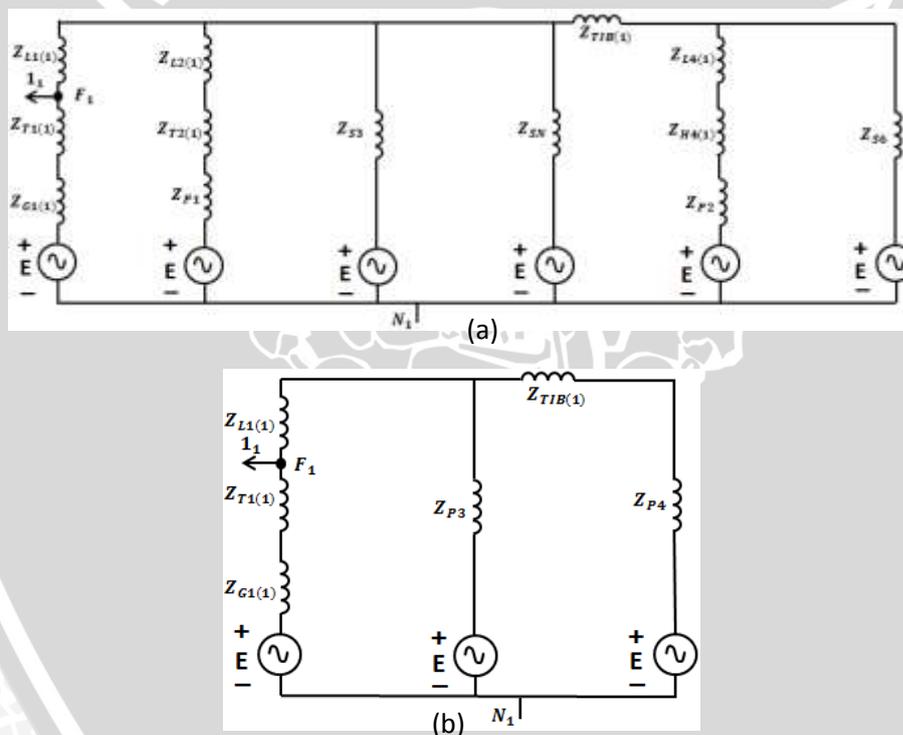
Langkah selanjutnya, impedansi urutan positif penyederhanaan paralel (Z_P) yang telah diketahui dapat dijumlah dengan impedansi urutan positif lain yang terhubung seri dengannya dan hasil penjumlahannya disederhanakan lagi dengan impedansi lainnya yang terhubung paralel. Gambar 4.19 (a) menunjukkan rangkaian penyederhanaan Z_P yang telah diketahui dengan impedansi urutan positif lain yang terhubung seri dengannya dari Gambar 4.18 (b), sedangkan Gambar 4.19 (b) menunjukkan rangkaian penyederhanaan Z_{S7} , Z_{S3} , dan Z_{SN} yang terhubung paralel serta Z_{S8} dengan Z_{S6} yang terhubung paralel juga dari Gambar 4.19 (a).

$$Z_{S7} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)} = (0.00000095 + j0.085871) \text{ p.u.}$$

$$Z_{S8} = Z_{P2} + Z_{H4(1)} + Z_{L4(1)} = (0.00000346 + j0.0858657) \text{ p.u.}$$

$$Z_{P3} = Z_{S7} // Z_{S3} // Z_{SN} = (0.00000129188 + j0.03389379044) \text{ p.u.}$$

$$Z_{P4} = Z_{S8} // Z_{S6} = (0.00000237993 + j0.06142349273) \text{ p.u.}$$



Gambar 4.19 (a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.18 (b)

(b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.19 (a)

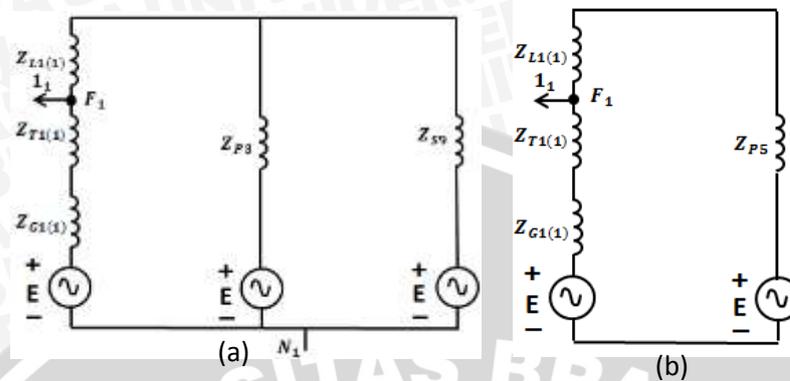
Sumber: Penulis, 2015

Z_{P4} dengan impedansi urutan positif trafo inter bus ($Z_{TIB(1)}$) yang terhubung seri disederhanakan dengan cara di bawah ini, dan Gambar 4.20 (a) menunjukkan rangkaian penyederhanaan Z_{P4} dan $Z_{TIB(1)}$ dari Gambar 4.19 (b).

$$Z_{S9} = Z_{TIB(1)} + Z_{P4} = (0.00000237993 + j0.08842349213) \text{ p.u.}$$

Z_{S9} dan Z_{P3} yang terhubung paralel disederhanakan dengan cara di bawah ini, Gambar 4.20 (b) menunjukkan rangkaian penyederhanaan Z_{S9} dan Z_{P3} dari Gambar 4.20 (a).

$$Z_{P5} = Z_{P3} // Z_{S9} = (0.0000008587 + j0.02450275456) p.u.$$



Gambar 4.20 (a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.19 (b)

(b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.20 (a)

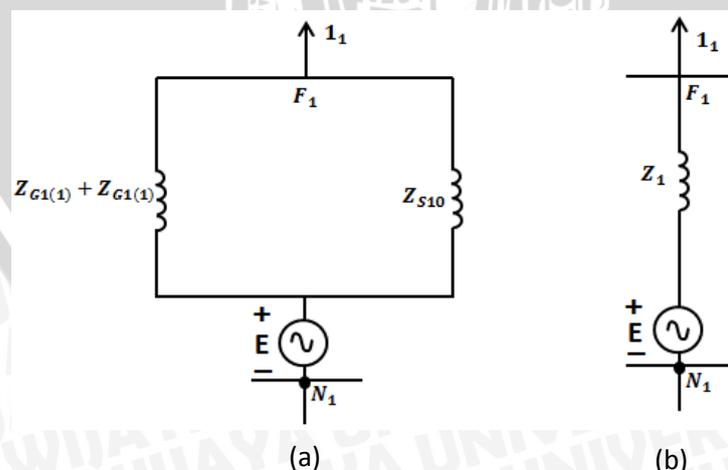
Sumber: Penulis, 2015

Z_{P5} dan impedansi urutan positif saluran sub-pembangkit satu ($Z_{L1(1)}$) dari Gambar 4.20 (b) disederhanakan lagi dengan cara di bawah ini, dan rangkaian penyederhanaannya ditunjukkan pada Gambar 4.21 (a).

$$Z_{S10} = Z_{P5} + Z_{L1(1)} = (0.00000180787 + j0.02452375456) p.u.$$

Setelah Z_{S10} pada Gambar 4.21 (a) diketahui, impedansi pengganti urutan positif pada titik gangguan 1 dapat dihitung dengan cara di bawah ini, dan rangkaian impedansi ekuivalen urutan positif pada titik gangguan 1 ditunjukkan pada Gambar 4.21 (b).

$$Z_1 = (Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)}) // Z_{S10} = (0.00000145787 + j0.02202227739) p.u.$$



Gambar 4.21 (a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.20 (b)

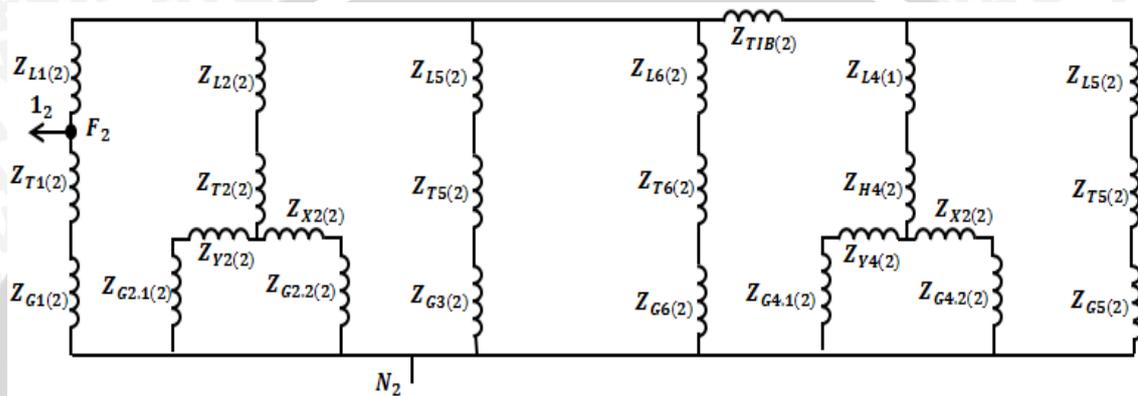
(b) Rangkaian Impedansi Ekuivalen Urutan Positif (Z_1) Pada Titik Gangguan 1

Sumber: Penulis, 2015

Untuk titik gangguan lainnya, nilai impedansi ekivalen urutan positif dapat dicari dengan cara yang sama berdasarkan Lampiran I.

4.2.4.2 Perhitungan impedansi ekivalen urutan negatif (Z_2)

Sama halnya dengan rangkaian impedansi urutan positif, dengan mengambil contoh kasus pada titik gangguan satu, diperoleh rangkaian impedansi urutan negatif setelah penambahan unit pembangkit baru yang ditunjukkan pada Gambar 4.22.



Gambar 4.22 Rangkaian Impedansi Urutan Negatif Pada Titik Gangguan 1 Setelah Penambahan Unit Pembangkit Baru
Sumber: Penulis, 2015

Gambar 4.22 yang menunjukkan rangkaian impedansi urutan negatif ketika gangguan terjadi pada titik gangguan satu, impedansi-impedansi urutan negatif pada Gambar 4.22 disederhanakan menjadi rangkaian pengganti atau ekivalen untuk mendapatkan nilai impedansi urutan negatif (Z_2). Langkah awal penyederhanaan rangkaian dimulai dengan menjumlahkan nilai impedansi urutan negatif yang terhubung seri (Z_S) dari Gambar 4.22 dan rangkaian penyederhanaannya ditunjukkan pada Gambar 4.23 (a).

$$Z_{S1} = Z_{G2.1(2)} + Z_{Y2(2)} = j0.1847 \text{ p.u.}$$

$$Z_{S2} = Z_{G2.2(2)} + Z_{X2(2)} = j0.1847 \text{ p.u.}$$

$$Z_{S3} = Z_{G3(2)} + Z_{T3(2)} + Z_{L3(2)} = (0.00000095 + j0.215921) \text{ p.u.}$$

$$Z_{S4} = Z_{G4(2)} + Z_{Y4(2)} = j0.1847 \text{ p.u.}$$

$$Z_{S5} = Z_{G4.2(2)} + Z_{X4(2)} = j0.1847 \text{ p.u.}$$

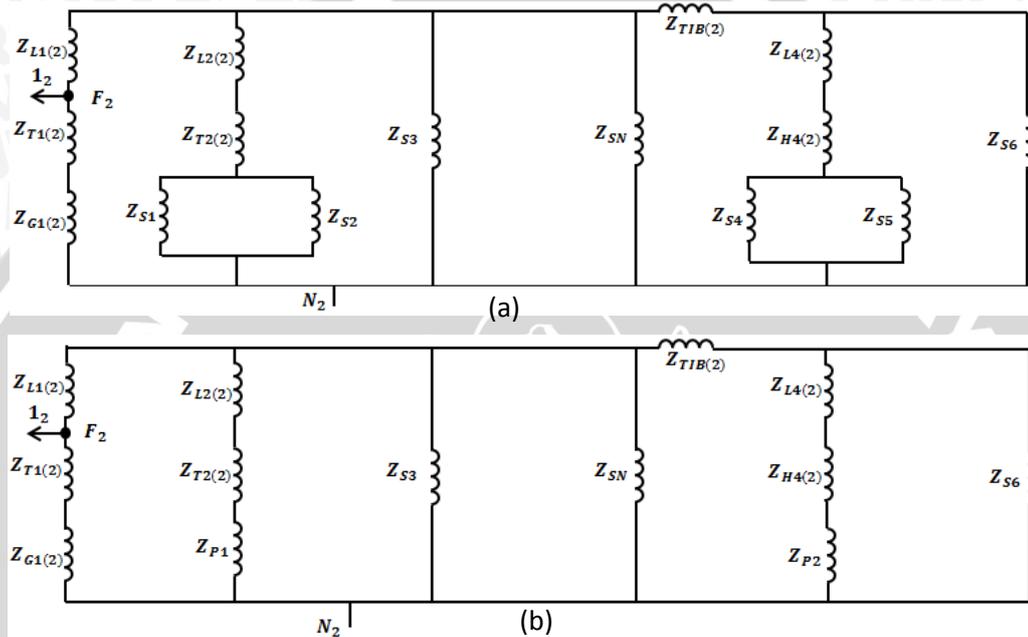
$$Z_{S6} = Z_{G5(2)} + Z_{T5(2)} + Z_{L5(2)} = (0.00000752 + j0.2159167) \text{ p.u.}$$

$$Z_{SN} = Z_{G6(2)} + Z_{T6(2)} + Z_{L6(2)} = (0.00000095 + j0.092521) \text{ p.u.}$$

Dimana Z_{SN} merupakan penyederhanaan impedansi sistem pembangkit baru urutan negatif yang terhubung seri. Setelah menyederhanakan impedansi yang terhubung seri, langkah selanjutnya menyederhanakan impedansi urutan negatif yang terhubung paralel (Z_P) dari Gambar 4.23 (a) dan rangkaian penyederhanaannya ditunjukkan pada Gambar 4.23 (b).

$$Z_{P1} = Z_{S1} // Z_{S2} = j0.09235 \text{ p.u.}$$

$$Z_{P2} = Z_{S4} // Z_{S5} = j0.09235 \text{ p.u.}$$



Gambar 4.23 (a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.22
(b) Rangkaian Penyederhanaan Impedansi yang Terhubung Paralel dari Gambar 4.23 (a)
Sumber: Penulis, 2015

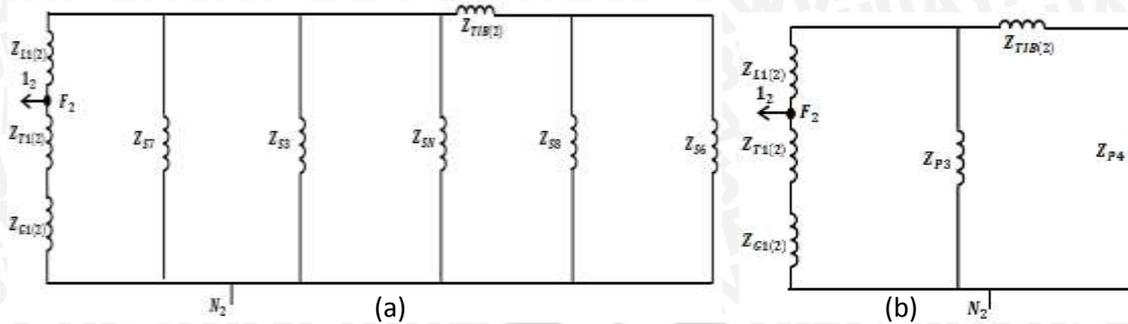
Langkah selanjutnya, impedansi urutan negatif penyederhanaan paralel (Z_P) yang telah diketahui dapat dijumlah dengan impedansi urutan negatif lain yang terhubung seri dengannya dan hasil penjumlahannya disederhanakan lagi dengan impedansi lainnya yang terhubung paralel. Gambar 4.24 (a) menunjukkan penyederhanaan Z_P dengan impedansi urutan negatif lain yang terhubung seri dari Gambar 4.23 (b), sedangkan Gambar 4.24 (b) menunjukkan penyederhanaan Z_{S7} , Z_{S3} , dan Z_{SN} yang terhubung paralel serta Z_{S8} dengan Z_{S6} yang juga terhubung paralel dari Gambar 4.24 (a).

$$Z_{S7} = Z_{P1} + Z_{H2(2)} + Z_{L2(2)} = (0.00000095 + j0.085871) \text{ p.u.}$$

$$Z_{S8} = Z_{P2} + Z_{H4(2)} + Z_{L4(2)} = (0.00000346 + j0.0858657) \text{ p.u.}$$

$$Z_{P3} = Z_{S7} // Z_{S3} // Z_{SN} = (0.00000129188 + 0.03389379044) \text{ p.u.}$$

$$Z_{P4} = Z_{S8} // Z_{S6} = (0.00000237993 + j0.06142349273) \text{ p.u.}$$



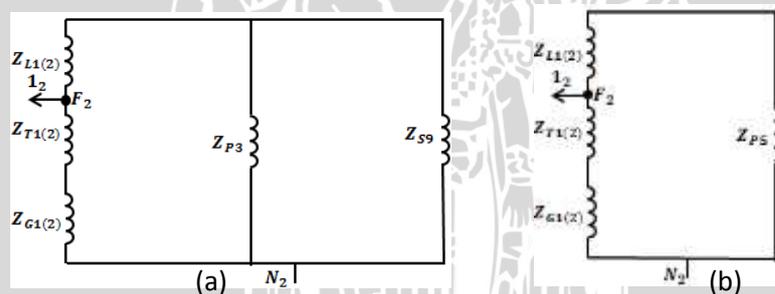
Gambar 4.24 (a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.23 (b)
 (b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.24 (a)
 Sumber: Penulis, 2015

Z_{P4} dengan impedansi urutan negatif trafo inter bus ($Z_{TIB(2)}$) yang terhubung seri disederhanakan dengan cara di bawah ini, dan Gambar 4.25 (a) menunjukkan rangkaian penyederhanaan Z_{P4} dan $Z_{TIB(2)}$ dari Gambar 4.24 (b).

$$Z_{S9} = Z_{TIB(2)} + Z_{P4} = (0.00000237993 + j0.08842349213) p. u.$$

Z_{S9} dan Z_{P3} yang terhubung paralel disederhanakan dengan cara di bawah ini, Gambar 4.25 (b) menunjukkan rangkaian penyederhanaan Z_{S9} dan Z_{P3} dari Gambar 4.25 (a).

$$Z_{P5} = Z_{P3} // Z_{S9} = (0.0000008587 + 0.02450275456) p. u.$$



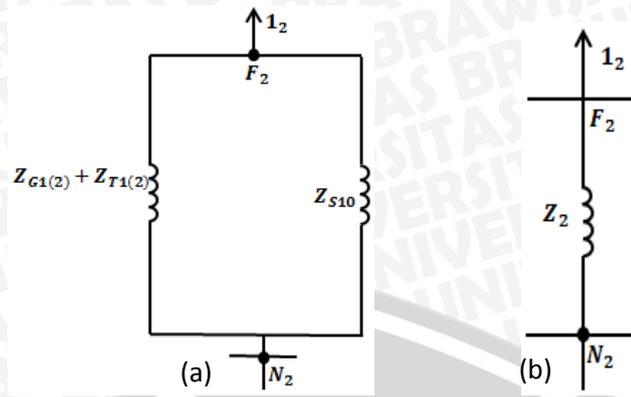
Gambar 4.25 (a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.24 (b)
 (b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.25 (a)
 Sumber: Penulis, 2015

Z_{P5} dan impedansi urutan negatif saluran sub-pembangkit 1 ($Z_{L1(2)}$) dari Gambar 4.25 (b) disederhanakan lagi dengan cara di bawah ini, dan rangkaian penyederhanaannya ditunjukkan pada Gambar 4.26 (a).

$$Z_{S10} = Z_{P5} + Z_{L1(2)} = (0.00000180787 + j0.02452375456) p. u.$$

Setelah Z_{S10} dari Gambar 4.25 (b) diketahui, impedansi pengganti urutan negatif untuk titik gangguan 1 dapat dihitung dengan cara di bawah ini, dan rangkaian impedansi ekuivalen urutan negatif pada titik gangguan 1 ditunjukkan pada Gambar 4.26 (b).

$$Z_2 = (Z_{G1(2)} + Z_{T1(2)}) // Z_{S10} = (0.00000145787 + j0.02202227739) p. u.$$

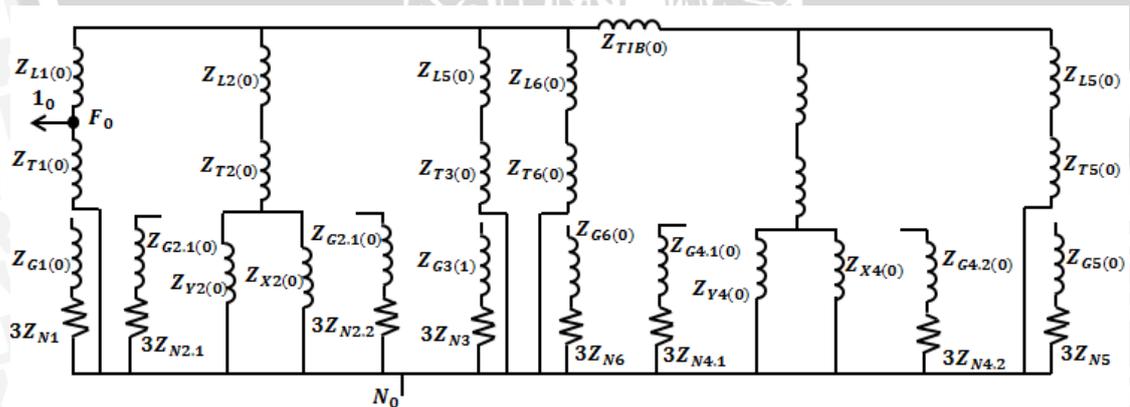


Gambar 4.26 (a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.25 (b)
 (b) Rangkaian Impedansi Ekuivalen Urutan Negatif (Z_2) Pada Titik Gangguan 1
 Sumber: Penulis, 2015

Dalam penyederhanaannya, membuktikan bahwa besar nilai impedansi ekuivalen urutan negatif (Z_2) sama dengan impedansi urutan positif (Z_1). Untuk titik gangguan lainnya, nilai impedansi ekuivalen urutan negatif dapat dicari dengan cara yang sama berdasarkan Lampiran I.

4.2.4.3 Perhitungan impedansi ekuivalen urutan nol (Z_0)

Sama halnya dengan rangkaian impedansi urutan positif dan negatif, dengan mengambil contoh kasus pada titik gangguan satu, diperoleh rangkaian impedansi urutan nol setelah penambahan unit pembangkit baru yang ditunjukkan pada Gambar 4.27.



Gambar 4.27 Rangkaian Impedansi Urutan Nol Pada Titik Gangguan 1 Setelah Penambahan Unit Pembangkit Baru
 Sumber: Penulis, 2015

Sama dengan rangkaian impedansi urutan positif dan negatif, Gambar 4.27 yang menunjukkan rangkaian impedansi urutan nol ketika gangguan terjadi pada titik gangguan 1, impedansi-impedansi urutan nol pada Gambar 4.27 disederhanakan



menjadi rangkaian pengganti atau ekuivalen untuk mendapatkan nilai impedansi urutan nol (Z_0). Langkah awal penyederhanaan rangkaian dimulai dengan menyederhanakan nilai impedansi urutan nol yang terhubung paralel (Z_p) dari Gambar 4.27 dan rangkaian penyederhanaannya ditunjukkan pada Gambar 4.28 (a).

$$Z_{P1} = Z_{Y2(0)} // Z_{X2(0)} = j0.02275 \text{ p.u.}$$

$$Z_{P2} = Z_{Y4(0)} // Z_{X4(0)} = j0.02275 \text{ p.u.}$$

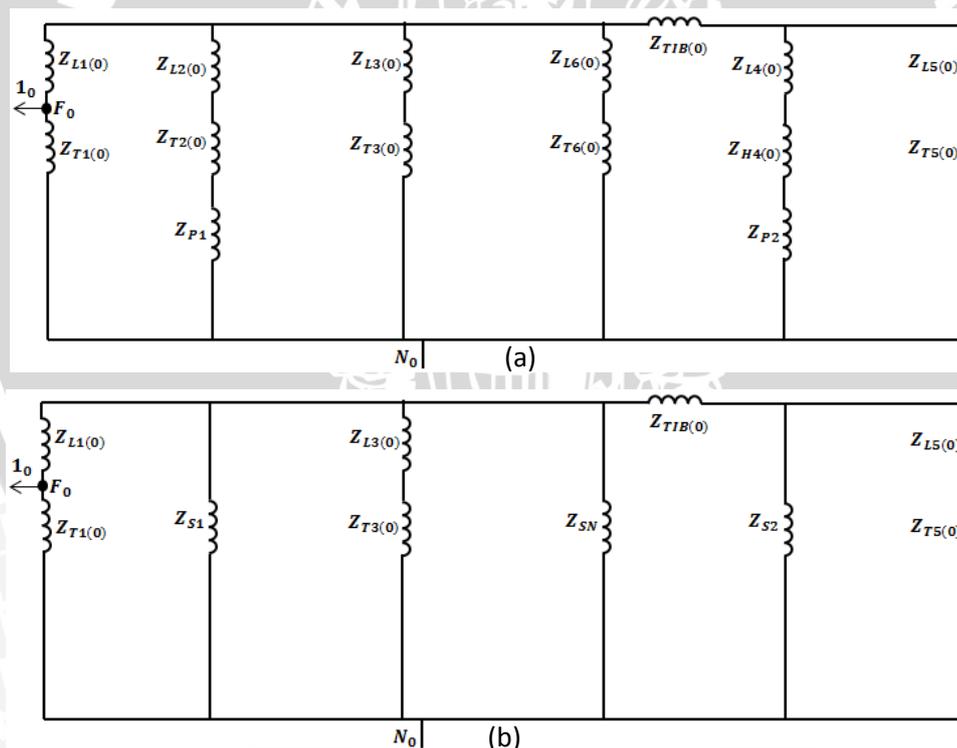
Langkah selanjutnya impedansi paralel yang sudah dihitung dijumlah dengan nilai impedansi yang terhubung seri dengannya pada Gambar 4.28 (a) dan rangkaian penyederhanaannya ditunjukkan pada Gambar 4.28 (b).

$$Z_{S1} = Z_{H2(0)} + Z_{P1} + Z_{L2(0)} = (0.00000095 + j0.016271) \text{ p.u.}$$

$$Z_{S2} = Z_{H4(0)} + Z_{P2} + Z_{L4(0)} = (0.00000346 + j0.0162657) \text{ p.u.}$$

$$Z_{SN} = Z_{T6(0)} + Z_{L6(0)} = (0.00000095 + j0.031421) \text{ p.u.}$$

Dimana Z_{SN} merupakan penyederhanaan impedansi urutan nol sistem pembangkit baru urutan positif yang terhubung seri.



Gambar 4.28 (a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.27

(b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.28 (a)

Sumber: Penulis, 2015

Nilai Z_{S1} dengan Z_{SN} yang terhubung paralel dengan hasil penjumlahan $Z_{T3(0)}$ dan $Z_{L3(0)}$, serta Z_{S2} yang juga terhubung paralel dengan hasil penjumlahan $Z_{T5(0)}$ dan $Z_{L5(0)}$ pada

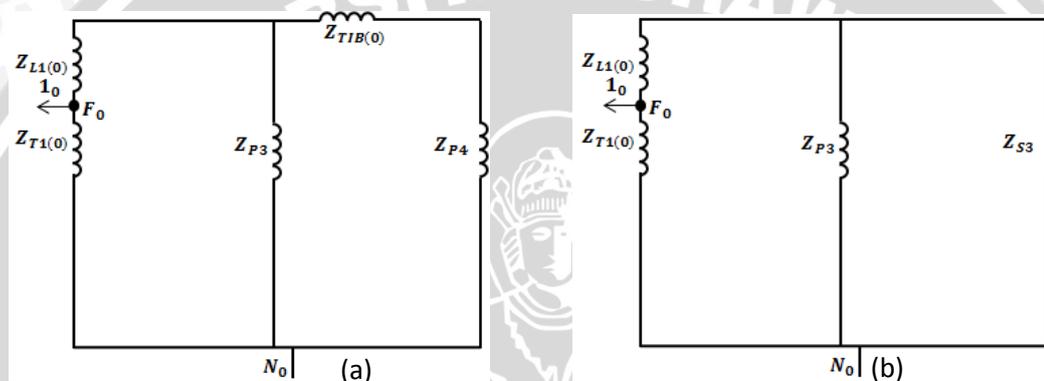
Gambar 4.28 (b) disederhanakan dengan cara di bawah ini dan rangkaian penyederhanannya ditunjukkan pada Gambar 4.29 (a).

$$\begin{aligned} Z_{P3} &= Z_{S1} // (Z_{T3(0)} + Z_{L3(0)}) // Z_{SN(0)} \\ &= (0.00000041685 + j0.00940564528) \text{ p.u.} \end{aligned}$$

$$Z_{P4} = Z_{S2} // (Z_{T5(0)} + Z_{L5(0)}) = (0.00000258546 + j0.01342029061) \text{ p.u.}$$

Karena Z_{P4} terhubung seri dengan impedansi urutan nol trafo inter bus $Z_{TIB(0)}$ penyederhanannya dapat langsung dijumlahkan, Gambar 4.29 (b) menunjukkan rangkaian penyederhanaan Z_{P4} dengan $Z_{TIB(0)}$ dari Gambar 4.29 (a).

$$Z_{S3} = Z_{TIB(0)} + Z_{P4} = (0.00000258546 + j0.04042029061) \text{ p.u.}$$



Gambar 4.29 (a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.28 (b)
(b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.29 (a)

Sumber: Penulis, 2015

Z_{S3} yang terhubung paralel dengan Z_{P3} dari Gambar 4.29 (b) disederhanakan dengan cara di bawah ini dan rangkaian penyederhanaannya ditunjukkan pada Gambar 4.30 (a).

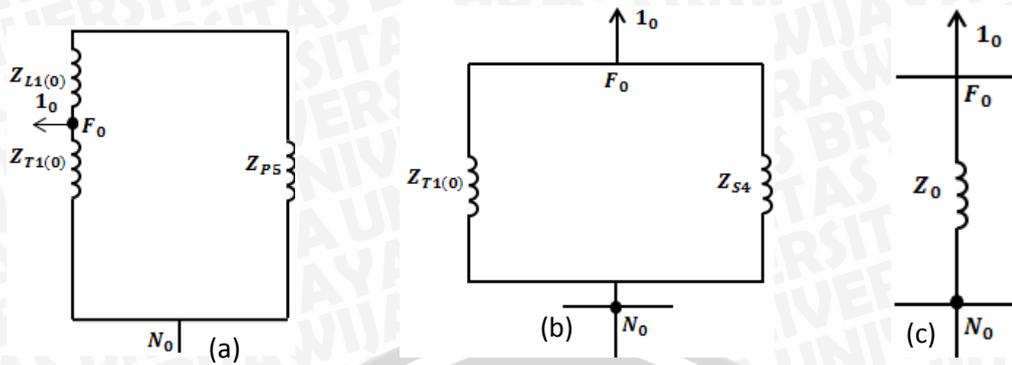
$$Z_{P5} = Z_{S3} // Z_{P3} = (0.00000036645 + j0.00763014099) \text{ p.u.}$$

Z_{P5} yang terhubung seri dengan impedansi saluran urutan nol ($Z_{L1(0)}$) dari Gambar 4.30 (a) dapat disederhanakan dengan cara menjumlahkannya langsung dan rangkaian penyederhanaannya ditunjukkan pada Gambar 4.30 (b).

$$Z_{S4} = Z_{L1(0)} + Z_{P5} = (0.00001816645 + j0.00767014099) \text{ p.u.}$$

Setelah nilai Z_{S4} diketahui maka impedansi ekivalen urutan nol pada titik gangguan 1 dapat diketahui dengan memparalelkan Z_{S4} dengan impedansi urutan nol trafo utama sub pembangkit 1 dari Gambar 4.30 (b), Gambar 4.30 (c) menunjukkan rangkaian impedansi ekivalen urutan nol pada titik gangguan 1.

$$Z_0 = Z_{S4} // Z_{T1(0)} = (0.00001392861 + j0.0067161816) \text{ p.u.}$$



Gambar 4.30 (a) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.29 (b)
 (b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 4.30 (a)
 (c) Rangkaian Impedansi Ekuivalen Urutan Nol (Z_0) Pada Titik Gangguan 1
 Sumber: Penulis, 2015

Dengan menggunakan cara yang sama dengan penyederhanaan impedansi urutan positif, negatif, dan nol pada titik gangguan 1 dan berdasarkan Lampiran I, besar impedansi ekuivalen urutan positif, negatif, dan nol pada masing-masing titik gangguan setelah penambahan unit pembangkit baru pada PLTGU Grati dapat diketahui. Hasil perhitungan impedansi urutan ekuivalen pada masing-masing titik gangguan di PLTGU Grati setelah penambahan unit pembangkit baru ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Impedansi Urutan Ekuivalen Pada Masing-masing Titik Gangguan di PLTGU Grati Setelah Penambahan Unit Pembangkit baru

Titik Gangguan	Impedansi Urutan $Z_1, Z_2,$ dan Z_0 ($p.u.$)
1	$Z_1 = 0.00001297152 + j0.02203246095$ $Z_2 = Z_1$ $Z_0 = 0.00001392861 + j0.0067161816$
2	$Z_1 = 0.00000127858 + j0.022015113$ $Z_2 = Z_1$ $Z_0 = 0.00000070449 + j0.0068724434$
3	$Z_1 = 0.00000145787 + j0.02202227739$ $Z_2 = Z_1$ $Z_0 = 0.00000133755 + j0.00670343605$
4	$Z_1 = 0.00000190357 + j0.02938129186$ $Z_2 = Z_1$ $Z_0 = 0.00000073569 + j0.00969759049$

Titik Gangguan	Impedansi Urutan $Z_1, Z_2,$ dan Z_0 (p.u).
5	$Z_1 = 0.000006284518 + j0.029388492$ $Z_2 = Z_1$ $Z_0 = 0.00000701937 + j0.00971402929$
6	$Z_1 = 0.00000119934 + j0.02201656626$ $Z_2 = Z_1$ $Z_0 = 0.00000109809 + j0.00669815329$

Sumber: Hasil Perhitungan, 2015

Setelah nilai impedansi urutan komponen sub-sistem baru diketahui, dengan cara yang sama seperti sub-bab sebelumnya maka arus gangguan hubung singkat pada masing-masing titik gangguan dapat diketahui. Sebagai contoh perhitungan, dengan mengambil kasus pada perhitungan gangguan tiga fasa pada keluaran trafo utama satu, Impedansi urutan pada Tabel 4.8 dimasukkan ke dalam persamaan (2-34).

dengan $E_a = 1\angle 0^\circ$ p.u.

$$Z_1 = (0.00001297152 + j0.02203246095) \text{ p.u.}$$

$$Z_2 = Z_1$$

$$Z_0 = (0.00001392861 + j0.0067161816) \text{ p.u., maka :}$$

$$I_f = \frac{E_a}{Z_1}$$

$$= \frac{(1\angle 0^\circ)}{(0.00001297152 + j0.02203246095)}$$

$$= (0.026721737 - j45.38756046) \text{ p.u.}$$

Arus dasar diperoleh dengan menggunakan persamaan (2-26).

dengan $S_{\text{dasar}} = 100000$ kVA

$V_{\text{dasar}} = 500$ kV, maka :

$$I_{\text{dasar}} (\text{A}) = \frac{S_{\text{dasar}} (\text{KVA})}{\sqrt{3} \cdot V_{\text{dasar}} (\text{kV})}$$

$$I_{\text{dasar}} = \frac{100000}{\sqrt{3}(500)}$$

$$= 115.47 \text{ A}$$

Sehingga arus gangguan tiga fasa saat gangguan terjadi pada titik 1 adalah :

$$I_f(A) = I_f(p. u.) \times I_{dasar}(A)$$

$$\begin{aligned} I_f(A) &= (0.026721737 - j45.38756046) \times 115.47 \\ &= 3.085559083 - j5240.901606 \\ &= 5240.902514 A \end{aligned}$$

Arus gangguan hubung singkat pada masing-masing titik gangguan di PLTGU Grati setelah penambahan unit pembangkit baru yang lain ditunjukkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Arus Gangguan Hubung Singkat Pada Masing-masing Titik Gangguan di PLTGU Grati Setelah Penambahan Unit Pembangkit baru

Titik Gangguan	Arus Gangguan (A)			
	3Φ	2Φ	2Φ-G	1Φ-G
1	5240.90251	4538.75471	4248.40113	2273.87662
2	5245.03325	4542.33204	4237.03005	2268.44684
3	5243.32691	4540.85430	4251.25379	2275.36101
4	13100.17276	11345.08240	10495.63611	5622.24685
5	13096.96296	11342.30263	10490.79159	5619.71514
6	5244.68704	4542.03221	4252.68286	2276.11025

Sumber: Hasil Perhitungan, 2015

4.3 Setelan OCR dan GFR Sebelum dan Setelah Penambahan Unit Pembangkit Baru

4.3.1 Setelan OCR dan GFR sebelum penambahan unit pembangkit baru

Tabel 4.10 menunjukkan data rele arus lebih dan rele gangguan tanah yang dipakai di masing-masing keluaran trafo utama Gardu Induk Grati.

Tabel 4.10 Data OCR dan GFR Pada Keluaran Trafo Utama Gardu Induk Grati

Trafo Utama	f (Hz)	Tipe Rele	Jenis Rele	CT Rasio	Setelan Arus OCR (A)	Setelan Arus GFR (A)	Waktu Kerja (s)
1	50	Siemens 7UM511	Standart Invers	1500/5	320	85	1.5
2	50	Siemens 7UM511	Standart Invers	2000/5	390	110	1.5

Trafo Utama	f (Hz)	Tipe Rele	Jenis Rele	CT Rasio	Setelan Arus OCR (A)	Setelan Arus GFR (A)	Waktu Kerja (s)
3	50	Siemens 7UM511	Standart Invers	1500/5	245	75	1.5
4	50	Siemens 7UM511	Standart Invers	3000/5	1300	355	1.1
5	50	Siemens 7UM511	Standart Invers	3000/5	650	180	1.1

Sumber: PLN Pusat Pelayanan Enjiniring, 1994 : 1

4.3.1.1 Setelan rele arus lebih sebelum penambahan unit pembangkit baru

Berdasarkan Tabel 4.10, perhitungan Setelan arus dan *time dial* dari rele arus lebih dilakukan dengan menggunakan rumus yang ada pada BAB II.

A. Penyetelan Arus

Untuk menentukan nilai setelan arus rele arus lebih yang terpasang pada sisi keluaran trafo utama, dihitung berdasarkan arus maksimum yang mengalir pada sisi keluaran trafo utama tersebut. Arus maksimum yang mengalir pada sisi keluaran trafo utama merupakan arus nominal *transformator* yang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2-5), dengan mengambil contoh kasus pada keluaran trafo utama satu diperoleh arus nominal trafo sebagai berikut :

dengan $kVA_{trafo} = 250000$ kVA

$kV_{dasar} = 500$ kV, maka :

$$I_n = \frac{kVA_{trafo}}{\sqrt{3} \cdot kV_{dasar}}$$

$$I_n = \frac{250000}{\sqrt{3} \cdot 500}$$

$$I_n = 288.67513 \text{ A}$$

Setelan arus pada bagian primer dan sekunder OCR dapat dihitung menggunakan persamaan (2-4) dan (2-6) sebagai berikut :

dengan $I_n = I_{maksimum} = 288.67513$ A, maka :

$$I_{set \text{ primer}} = 1.1 \times I_{maksimum}$$

$$I_{set \text{ primer}} = 1.1 \times 288.67513 = 317.54264 \text{ A}$$

Sehingga dipilih $I_{set \text{ primer}} = 318$ A

Sedangkan setelan arus pada bagian sekunder OCR yaitu :

dengan $n_{CT} = 1500/5$, maka :

$$I_{set\ sekunder} = I_{set\ primer} \times \frac{1}{n_{CT}}$$

$$I_{set\ sekunder} = 318 \times \frac{5}{1500} = 1.05847\text{ A}$$

Sehingga dipilih $I_{set\ sekunder} = 1.06\text{ A}$

Penyetelan arus pada bagian primer menunjukkan bahwa, jika terdapat arus gangguan hubung singkat fasa-fasa dengan nilai sama dengan atau lebih besar dari 318 A, maka rele arus lebih pada sisi keluaran trafo utama satu akan mendeteksinya dan kemudian memerintahkan PMT untuk bekerja (*trip*). Akan tetapi jika terdapat arus gangguan hubung singkat fasa-fasa kurang dari 318 A maka rele arus lebih tidak akan mendeteksi gangguan tersebut.

B. Penyetelan waktu

Untuk penyetelan TMS dari rele arus lebih pada sisi keluaran trafo utama dihitung berdasarkan persamaan (2-8), arus gangguan yang digunakan dalam perhitungan adalah arus gangguan terbesar. Berdasarkan Tabel 4.6, arus gangguan fasa-fasa terbesar yaitu arus gangguan tiga fasa. Dengan mengambil contoh kasus pada keluaran trafo utama satu diperoleh perhitungan TMS sebagai berikut :

$$TMS = \frac{\left[\left(\frac{I_f}{I_{set}}\right)^\alpha\right]^{-1}}{\beta} \times t$$

$$TMS = \frac{\left[\left(\frac{3996.14955}{318}\right)^{0.02}\right]^{-1}}{0.14} \times 1.5 = 0.55665$$

Sehingga dipilih $TMS = 0.56$

Untuk Setelan arus dan TMS OCR di titik gangguan lainnya dilakukan dengan cara yang sama seperti penentuan Setelan rele pada contoh kasus keluaran trafo utama satu.

4.3.1.2 Setelan rele gangguan tanah sebelum penambahan unit pembangkit baru

Berdasarkan Tabel 4.10, perhitungan Setelan arus dan *time dial* dari rele gangguan tanah dilakukan dengan menggunakan rumus yang ada pada BAB II.

A. Penyetelan Arus

Sama seperti dengan penentuan Setelan arus pada rele arus lebih, untuk menentukan nilai Setelan arus rele gangguan tanah yang dipasang di sisi keluaran trafo utama juga dihitung berdasarkan nilai arus maksimum yang merupakan arus nominal trafo di sisi keluaran trafo tersebut. Namun dalam penentuan Setelan arus pada rele gangguan tanah harus dibuat lebih sensitif dibandingkan Setelan arus pada rele arus lebih. Untuk menentukan nilai Setelan arus primer maupun sekunder dari rele gangguan tanah dapat dihitung menggunakan persamaan (2-9) dan (2-10), mengambil contoh kasus pada keluaran trafo utama satu diperoleh Setelan arus rele gangguan tanah sebagai berikut :

dengan $I_n = I_{maksimum} = 288.67513 \text{ A}$, maka :

$$I_{set \text{ Primer}} = 0,3 \times I_{maksimum}$$

$$I_{set \text{ Primer}} = 0,3 \times 288.67513 = 86.60253 \text{ A}$$

Sehingga dipilih $I_{set \text{ Primer}} = 87 \text{ A}$

Sedangkan setelan arus pada bagian sekunder rele gangguan tanah yaitu :

dengan $n_{CT} = 1500/5$, maka :

$$I_{set \text{ sekunder}} = I_{set \text{ primer}} \times \frac{1}{n_{CT}}$$

$$I_{set \text{ sekunder}} = 87 \times \frac{5}{1500} = 0.29001 \text{ A}$$

Sehingga dipilih $I_{set \text{ sekunder}} = 0.29 \text{ A}$

Sama seperti OCR, untuk penyetelan arus pada bagian primer GFR menunjukkan bahwa jika terdapat arus gangguan hubung singkat fasa-tanah dengan nilai sama dengan atau lebih besar dari 87 A, maka rele gangguan tanah pada sisi keluaran trafo utama satu akan mendeteksinya dan kemudian memerintahkan PMT untuk bekerja (*trip*). Akan tetapi jika terdapat arus gangguan hubung singkat fasa-tanah kurang dari 87 A maka rele gangguan tanah tidak akan mendeteksi gangguan tersebut.

B. Penyetelan Waktu

Sama seperti penyetelan waktu untuk OCR, penyetelan TMS rele gangguan tanah pada sisi keluaran trafo utama berdasarkan persamaan (2-12), arus gangguan yang digunakan dalam perhitungan adalah arus gangguan terbesar. Berdasarkan Tabel 4.6 arus gangguan tanah terbesar yaitu arus gangguan dua fasa ke tanah. Dengan mengambil

contoh kasus pada sisi keluaran trafo utama satu diperoleh perhitungan TMS sebagai berikut :

$$TMS = \frac{\left[\left(\frac{I_f}{I_{set}} \right)^\alpha \right]^{-1}}{\beta} \times t$$

$$TMS = \frac{\left[\left(\frac{3254.90505}{87} \right)^{0.02} \right]^{-1}}{0.14} \times 1.5 = 0.80494$$

Sehingga dipilih $TMS = 0.80$

Setelan arus dan TMS rele gangguan tanah pada titik gangguan lain dapat diperoleh dengan cara yang sama untuk mendapatkan Setelan arus dan TMS untuk rele gangguan tanah pada sisi keluaran trafo utama satu. Tabel 4.11 menunjukkan Setelan OCR dan GFR pada masing-masing titik gangguan sebelum penambahan unit pembangkit baru.

Tabel 4.11 Setelan OCR dan GFR Pada Masing-masing Titik Gangguan Sebelum Penambahan Unit Pembangkit Baru

Lokasi Gangguan	Setelan OCR	Setelan GFR
Keluaran Trafo Utama I	$I_{Set Primer} = 318 \text{ A}$ $I_{Set Sekunder} = 1.06 \text{ A}$ $TMS = 0.55$	$I_{Set Primer} = 87 \text{ A}$ $I_{Set Sekunder} = 0.29 \text{ A}$ $TMS = 0.80$
Keluaran Trafo Utama II	$I_{Set Primer} = 390 \text{ A}$ $I_{Set Sekunder} = 0.98 \text{ A}$ $TMS = 0.51$	$I_{Set Primer} = 107 \text{ A}$ $I_{Set Sekunder} = 0.26 \text{ A}$ $TMS = 0.76$
Keluaran Trafo Utama III	$I_{Set Primer} = 245 \text{ A}$ $I_{Set Sekunder} = 0.82 \text{ A}$ $TMS = 0.62$	$I_{Set Primer} = 73 \text{ A}$ $I_{Set Sekunder} = 0.24 \text{ A}$ $TMS = 0.84$
Keluaran Trafo Utama IV	$I_{Set Primer} = 1302 \text{ A}$ $I_{Set Sekunder} = 2.17 \text{ A}$ $TMS = 0.35$	$I_{Set Primer} = 355 \text{ A}$ $I_{Set Sekunder} = 0.59 \text{ A}$ $TMS = 0.53$
Keluaran Trafo Utama V	$I_{Set Primer} = 651 \text{ A}$ $I_{Set Sekunder} = 1.08 \text{ A}$ $TMS = 0.46$	$I_{Set Primer} = 178 \text{ A}$ $I_{Set Sekunder} = 0.29 \text{ A}$ $TMS = 0.64$

Sumber: Hasil Perhitungan, 2015

4.3.2 Setelan OCR dan GFR setelah penambahan unit pembangkit baru

Berdasarkan Tabel 4.6 dan Tabel 4.9 menunjukkan bahwa besar arus gangguan hubung singkat setelah adanya penambahan unit pembangkit baru mengalami kenaikan, sehingga perlu dilakukan perubahan Setelan OCR dan GFR agar sistem proteksi dapat berjalan dengan baik sejalan dengan perubahan besar arus gangguan hubung singkat. Data spesifikasi OCR dan GFR yang digunakan pada Keluaran baru adalah :

Tipe Rele	: Siemens 7UM511
Jenis Rele	: Standart Invers
Frekuensi	: 50 Hz
CT Rasio	: 2000/5
Waktu Kerja	: 1.5 s

4.3.2.1 Setelan rele arus lebih setelah penambahan unit pembangkit baru

Berdasarkan penjelasan sebelumnya disebutkan bahwa terjadi kenaikan arus gangguan setelah adanya penambahan unit pembangkit baru, terutama arus gangguan hubung singkat fasa ke fasa yang mengalami kenaikan cukup besar pada masing-masing titik gangguan, sehingga penyetelan ulang OCR harus dilakukan agar menjaga keandalan sistem PLTGU Grati.

A. Penyetelan Arus

Sama dengan penyetelan arus OCR sebelum penambahan pembangkit baru, untuk penyetelan OCR pada sisi Keluaran setelah penambahan unit pembangkit baru dihitung berdasarkan arus maksimum yang mengalir pada sisi keluaran trafo daya tersebut. Setelan arus pada bagian primer dan sekunder dapat dihitung menggunakan persamaan (2-4) dan (2-6). Karena dalam penyetelan OCR setelah penambahan unit pembangkit baru arus maksimum yang berupa arus nominal *transformator* tetap, maka setelan arus OCR pada Keluaran setelah penambahan unit pembangkit baru masih mengikuti setelan arus OCR sebelum penambahan unit pembangkit baru. Dengan mengambil contoh pada Setelan arus pada Keluaran satu, langkah pertama yang dilakukan yaitu menentukan arus nominal trafo menggunakan persamaan (2-5).

dengan $kVA_{trafo} = 250000$ kVA

$kV_{dasar} = 500$ kV, maka :

$$I_n = \frac{kVA_{trafo}}{\sqrt{3} \cdot kV_{dasar}}$$

$$I_n = \frac{250000}{\sqrt{3} \cdot 500}$$

$$I_n = 288.67513 \text{ A}$$

Setelan arus pada bagian primer dan sekunder OCR dapat dihitung menggunakan persamaan (2-4) dan (2-6) sebagai berikut :

dengan $I_n = I_{maksimum} = 288.67513$ A, maka :

$$I_{set \text{ primer}} = 1.1 \times I_{maksimum}$$

$$I_{set \text{ primer}} = 1.1 \times 288.67513 = 317.54264 \text{ A,}$$

Sehingga dipilih $I_{set \text{ primer}} = 318$ A

Sedangkan setelan arus pada bagian sekunder OCR yaitu :

dengan $n_{CT} = 1500/5$, maka :

$$I_{set \text{ sekunder}} = I_{set \text{ primer}} \times \frac{1}{n_{CT}}$$

$$I_{set \text{ sekunder}} = 318 \times \frac{5}{1500} = 1.05847 \text{ A}$$

Sehingga dipilih $I_{set \text{ sekunder}} = 1.06$ A

penyetelan arus pada bagian primer menunjukkan bahwa, jika terdapat arus gangguan hubung singkat fasa-fasa dengan nilai sama dengan atau lebih besar dari 318 A, maka rele arus lebih pada sisi keluaran trafo utama satu akan mendeteksinya dan kemudian memerintahkan PMT untuk bekerja (*trip*). Akan tetapi jika terdapat arus gangguan hubung singkat fasa-fasa kurang dari 318 A, maka rele arus lebih tidak akan mendeteksi gangguan tersebut.

B. Penyetelan Waktu

Untuk penyetelan TMS rele arus lebih pada sisi keluaran trafo utama setelah penambahan unit pembangkit baru dihitung berdasarkan persamaan (2-8), arus gangguan yang digunakan dalam perhitungan adalah arus gangguan terbesar yaitu arus gangguan tiga fasa. Dengan mengambil contoh kasus pada keluaran trafo utama satu diperoleh perhitungan TMS sebagai berikut :

$$TMS = \frac{\left[\left(\frac{I_f}{I_{set}} \right)^\alpha \right]^{-1}}{\beta} \times t$$

$$TMS = \frac{\left[\frac{5240.90251}{318} \right]^{0.02} - 1}{0.14} \times 1.5 = 0.61794$$

Sehingga dipilih $TMS = 0.62$

Dari perhitungan membuktikan bahwa setelan arus OCR setelah penambahan unit pembangkit baru masih menggunakan setelan arus OCR sebelum penambahan unit pembangkit baru, namun untuk nilai TMS mengalami perubahan karena adanya kenaikan arus gangguan. Untuk Setelan OCR di titik gangguan lainnya dilakukan dengan cara yang sama untuk mendapatkan Setelan arus dan waktu kerja untuk rele arus lebih pada keluaran trafo utama satu.

4.3.2.2 Setelan rele gangguan tanah setelah penambahan unit pembangkit baru

Berdasarkan Tabel 4.9 disebutkan bahwa terjadi kenaikan arus gangguan setelah penambahan unit pembangkit baru. Kenaikan arus gangguan hubung singkat juga terjadi pada gangguan fasa ke tanah pada sisi keluaran trafo utama, sehingga penyetelan ulang GFR harus dilakukan dalam menjaga keandalan sistem PLTGU Grati.

A. Penyetelan Arus

Sama seperti penyetelan rele gangguan tanah sebelum penambahan unit pembangkit baru, untuk menentukan nilai Setelan arus rele gangguan tanah yang dipasang di sisi keluaran trafo utama juga dihitung berdasarkan nilai arus nominal trafo di sisi keluaran trafo tersebut. Karena dalam penyetelan GFR setelah penambahan unit pembangkit baru arus nominal *transformator* tetap, maka setelan arus GFR pada keluaran trafo utama lama masih mengikuti setelan arus GFR sebelum penambahan unit pembangkit baru. Untuk menentukan nilai Setelan arus GFR pada bagian primer maupun sekunder dapat dihitung menggunakan persamaan (2-9) dan (2-10), mengambil contoh kasus pada keluaran trafo utama satu diperoleh Setelan arus GFR sebagai berikut :

dengan $I_n = I_{maksimum} = 288.67513$ A, maka :

$$I_{Set Primer} = 0,3 \times I_{maksimum}$$

$$I_{Set Primer} = 0,3 \times 288.67513 = 86.60253 \text{ A}$$

Sehingga dipilih $I_{Set Primer} = 87 \text{ A}$

Sedangkan setelan arus pada bagian sekunder GFR yaitu :

dengan $n_{CT} = 1500/5$, maka :

$$I_{set\ sekunder} = I_{set\ primer} \times \frac{1}{n_{CT}}$$

$$I_{set\ sekunder} = 87 \times \frac{5}{1500} = 0.29001\text{ A}$$

Sehingga dipilih $I_{set\ sekunder} = 0.29\text{ A}$

Sama seperti OCR, untuk penyetelan arus pada bagian primer rele gangguan tanah menunjukkan bahwa jika terdapat arus gangguan hubung singkat fasa ke tanah dengan nilai sama dengan atau lebih besar dari 87 A, maka rele gangguan tanah pada sisi keluaran trafo utama satu akan mendeteksinya dan kemudian memerintahkan PMT untuk bekerja (*trip*). Akan tetapi jika terdapat arus gangguan hubung singkat fasa ke tanah kurang dari 87 A, maka rele gangguan tanah tidak akan mendeteksi gangguan tersebut.

B. Penyetelan Waktu

Sama seperti penyetelan waktu untuk OCR, penyetelan TMS rele gangguan tanah pada sisi keluaran trafo utama berdasarkan persamaan (2-12), arus gangguan yang digunakan dalam perhitungan adalah arus gangguan terbesar. Berdasarkan Tabel 4.6 arus gangguan terbesar yaitu arus gangguan dua fasa ke tanah. Dengan mengambil contoh kasus pada keluaran trafo utama satu diperoleh perhitungan TMS sebagai berikut :

$$TMS = \frac{\left[\frac{I_f}{I_{set}}\right]^\alpha}{\beta} \times t$$

$$TMS = \frac{\left[\frac{4248.40113}{87}\right]^{0.02}}{0.14} \times 1.5 = 0.86648$$

Sehingga dipilih $TMS = 0.87$

Dari perhitungan membuktikan bahwa setelan arus GFR setelah penambahan unit pembangkit masih menggunakan setelan arus GFR sebelum penambahan unit pembangkit baru, namun untuk nilai TMS mengalami perubahan karena adanya kenaikan arus gangguan. Setelan arus dan TMS rele gangguan tanah pada titik gangguan lainnya dapat diperoleh dengan cara yang sama untuk mendapatkan Setelan arus dan TMS untuk rele gangguan tanah pada sisi keluaran trafo utama satu. Tabel 4.12 menunjukkan Setelan OCR dan GFR pada masing-masing titik gangguan setelah penambahan unit pembangkit baru.

Tabel 4.12 Setelan OCR dan GFR Pada Masing-masing Titik Gangguan Setelah Penambahan Unit Pembangkit Baru

Lokasi Gangguan	Setelan OCR	Setelan GFR
Keluaran Trafo Utama I	$I_{Set Primer} = 318 \text{ A}$ $I_{Set Sekunder} = 1.06 \text{ A}$ $TMS = 0.62$	$I_{Set Primer} = 87 \text{ A}$ $I_{Set Sekunder} = 0.29 \text{ A}$ $TMS = 0.87$
Keluaran Trafo Utama II	$I_{Set Primer} = 390 \text{ A}$ $I_{Set Sekunder} = 0.98 \text{ A}$ $TMS = 0.57$	$I_{Set Primer} = 107 \text{ A}$ $I_{Set Sekunder} = 0.26 \text{ A}$ $TMS = 0.82$
Keluaran Trafo Utama III	$I_{Set Primer} = 245 \text{ A}$ $I_{Set Sekunder} = 0.82 \text{ A}$ $TMS = 0.68$	$I_{Set Primer} = 73 \text{ A}$ $I_{Set Sekunder} = 0.24 \text{ A}$ $TMS = 0.89$
Keluaran Trafo Utama IV	$I_{Set Primer} = 1302 \text{ A}$ $I_{Set Sekunder} = 2.17 \text{ A}$ $TMS = 0.37$	$I_{Set Primer} = 355 \text{ A}$ $I_{Set Sekunder} = 0.59 \text{ A}$ $TMS = 0.55$
Keluaran Trafo Utama V	$I_{Set Primer} = 651 \text{ A}$ $I_{Set Sekunder} = 1.08 \text{ A}$ $TMS = 0.49$	$I_{Set Primer} = 178 \text{ A}$ $I_{Set Sekunder} = 0.29 \text{ A}$ $TMS = 0.66$
Keluaran Trafo Utama Baru	$I_{Set Primer} = 445 \text{ A}$ $I_{Set Sekunder} = 1.11 \text{ A}$ $TMS = 0.54$	$I_{Set Primer} = 121 \text{ A}$ $I_{Set Sekunder} = 0.30 \text{ A}$ $TMS = 0.79$

Sumber: Hasil Perhitungan, 2015

4.3.3 Analisis perbandingan koordinasi OCR dan GFR sebelum dan setelah penambahan unit pembangkit baru

Dari hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat yang ditunjukkan pada Tabel 4.6 untuk kondisi sebelum penambahan unit pembangkit baru dan Tabel 4.9 untuk kondisi setelah penambahan unit pembangkit baru, menunjukkan bahwa besar arus gangguan mengalami kenaikan setelah adanya penambahan unit pembangkit baru. Arus gangguan hubung singkat tertinggi baik sebelum, maupun setelah penambahan unit pembangkit baru terjadi pada keluaran trafo utama empat dengan nilai 11772.74842 A berbanding 13100.17270 A. Besar kenaikan untuk arus gangguan hubung singkat terbesar untuk arus gangguan maksimum (3Φ) dengan besar kenaikan dalam persen adalah sebagai berikut :

$$\text{Selisih Kenaikan} = \frac{\text{Setelah Penambahan pembangkit baru} - \text{Sebelum Penambahan Pembangkit Baru}}{\text{Sebelum Penambahan Pembangkit Baru}} \times 100 \%$$

$$\text{Selisih Kenaikan} = \frac{13100.17270 - 11772.74842}{11772.74842} \times 100 \%$$

$$\text{Selisih Kenaikan} = 11.2753 \%$$

Jadi, selisih kenaikan arus gangguan maksimum setelah penambahan unit pembangkit baru dengan arus gangguan maksimum sebelum penambahan unit pembangkit baru mencapai 11.2753 %.

Gambar 4.31 menunjukkan perbandingan besar arus tiga fasa yang merupakan arus gangguan terbesar pada masing-masing titik gangguan antara sebelum dan setelah penambahan unit pembangkit baru.



Gambar 4.31 Perbandingan Arus Gangguan Tertinggi (3Φ) Pada Masing-masing Titik Gangguan Antara Sebelum dan Setelah Penambahan Unit Pembangkit Baru

Sumber: Hasil Perhitungan, 2015

Nilai arus gangguan maksimum sangat berpengaruh pada rating kerja peralatan, khususnya peralatan pemutus yaitu Pemutus Tenaga/PMT (*circuit breaker/CB*) yang berada di titik gangguan maksimum itu terjadi dengan spesifikasi sebagai berikut :

Jenis PMT : GCB

Jenis Gas : SF6

Rating Tegangan : 170 kV

Rating Arus : 4000 A

Breaking Current : 40 kA

Arus pemutusan (*Breaking Current*) PMT berdasarkan data di atas menunjukkan bahwa PMT tersebut memiliki kemampuan memutus arus sampai 40 kA dengan media isolasi gas SF₆. Dari perhitungan arus gangguan, nilai arus gangguan tertinggi yang dihasilkan karena adanya penambahan unit pembangkit baru sebesar 13100.17276 A, yang artinya masih dibawah rating arus pemutusan dari PMT tersebut. Dengan kata lain peralatan pemutus dalam hal ini PMT pada Gardu Induk Grati masih bisa untuk digunakan apabila ditambahkan unit pembangkit baru.

Meskipun secara teknis PMT masih bisa bekerja meski ada penambahan unit pembangkit baru, namun perlu adanya penyetelan ulang OCR dan GFR karena adanya kenaikan arus gangguan hubung singkat setelah adanya penambahan unit Pembangkit baru pada PLTGU Grati. Tabel 4.13 menunjukkan perbandingan Setelan OCR dan GFR pada sisi keluaran trafo utama baik sebelum maupun setelah penambahan unit pembangkit baru.

Tabel 4.13 Perbandingan Setelan OCR dan GFR Sebelum dan Setelah Penambahan Unit Pembangkit Baru Pada Sisi Keluaran Trafo Utama

Lokasi Gangguan	OCR		GFR	
	Sebelum	Setelah	Sebelum	Setelah
Keluaran Trafo Utama I	$I_{Set Primer} = 318 A$	$I_{Set Primer} = 318 A$	$I_{Set Primer} = 87 A$	$I_{Set Primer} = 87 A$
	$I_{Set Sekunder} = 1.06 A$	$I_{Set Sekunder} = 1.06 A$	$I_{Set Sekunder} = 0.29 A$	$I_{Set Sekunder} = 0.29 A$
	$TMS = 0.55$	$TMS = 0.62$	$TMS = 0.80$	$TMS = 0.87$
Keluaran Trafo Utama II	$I_{Set Primer} = 390 A$	$I_{Set Primer} = 390 A$	$I_{Set Primer} = 107 A$	$I_{Set Primer} = 107 A$
	$I_{Set Sekunder} = 0.98 A$	$I_{Set Sekunder} = 0.98 A$	$I_{Set Sekunder} = 0.26 A$	$I_{Set Sekunder} = 0.26 A$
	$TMS = 0.51$	$TMS = 0.57$	$TMS = 0.76$	$TMS = 0.82$
Keluaran Trafo Utama III	$I_{Set Primer} = 245 A$	$I_{Set Primer} = 245 A$	$I_{Set Primer} = 73 A$	$I_{Set Primer} = 73 A$
	$I_{Set Sekunder} = 0.82 A$	$I_{Set Sekunder} = 0.82 A$	$I_{Set Sekunder} = 0.24 A$	$I_{Set Sekunder} = 0.24 A$
	$TMS = 0.62$	$TMS = 0.68$	$TMS = 0.84$	$TMS = 0.89$
Keluaran Trafo Utama IV	$I_{Set Primer} = 1302 A$	$I_{Set Primer} = 1302 A$	$I_{Set Primer} = 355 A$	$I_{Set Primer} = 355 A$
	$I_{Set Sekunder} = 2.17 A$	$I_{Set Sekunder} = 2.17 A$	$I_{Set Sekunder} = 0.59 A$	$I_{Set Sekunder} = 0.59 A$
	$TMS = 0.35$	$TMS = 0.37$	$TMS = 0.53$	$TMS = 0.55$
Keluaran Trafo Utama V	$I_{Set Primer} = 651 A$	$I_{Set Primer} = 651 A$	$I_{Set Primer} = 178 A$	$I_{Set Primer} = 178 A$
	$I_{Set Sekunder} = 1.08 i$	$I_{Set Sekunder} = 1.08 A$	$I_{Set Sekunder} = 0.29 A$	$I_{Set Sekunder} = 0.29 A$
	$TMS = 0.46$	$TMS = 0.49$	$TMS = 0.64$	$TMS = 0.66$
Keluaran Trafo Utama Baru	-	$I_{Set Primer} = 445 A$	-	$I_{Set Primer} = 121 A$
	-	$I_{Set Sekunder} = 1.11 A$	-	$I_{Set Sekunder} = 0.30 A$
	-	$TMS = 0.54$	-	$TMS = 0.79$

Sumber: Hasil Perhitungan, 2015

Dari Tabel 4.13 menunjukkan secara keseluruhan terdapat perbedaan Setelan OCR dan GFR antara sebelum dan setelah penambahan unit pembangkit baru. Namun untuk Setelan arus pada OCR dan GFR pada sisi keluaran trafo utama setelah penambahan unit pembangkit baru nilainya sama dengan Setelan arus sebelum penambahan unit pembangkit baru, hanya terdapat perbedaan pada penyetelan nilai *time multiple setting* (TMS). Berdasar hasil perhitungan menunjukkan bahwa adanya penambahan unit pembangkit baru mengakibatkan naiknya nilai arus gangguan hubung singkat yang selanjutnya mengakibatkan naiknya nilai setelan TMS dari OCR dan GFR pada masing-masing titik gangguan. Jadi secara matematis adanya penambahan unit pembangkit baru pada PLTGU Grati mengakibatkan perubahan Setelan OCR dan GFR pada sisi keluaran trafo utama masing-masing pembangkit.

Berdasarkan hasil perhitungan yang ditunjukkan pada Tabel 4.12, penyetelan OCR sisi keluaran trafo utama baru disarankan dengan nilai Setelan arus sebesar 445 A dan Nilai TMS sebesar 0.54. sedangkan untuk penyetelan GFR pada keluaran trafo utama baru disarankan dengan nilai Setelan arus sebesar 121 A dengan nilai TMS sebesar 0.79.



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari analisis dan pembahasan pada penelitian ini, maka kesimpulan yang dapat diambil adalah :

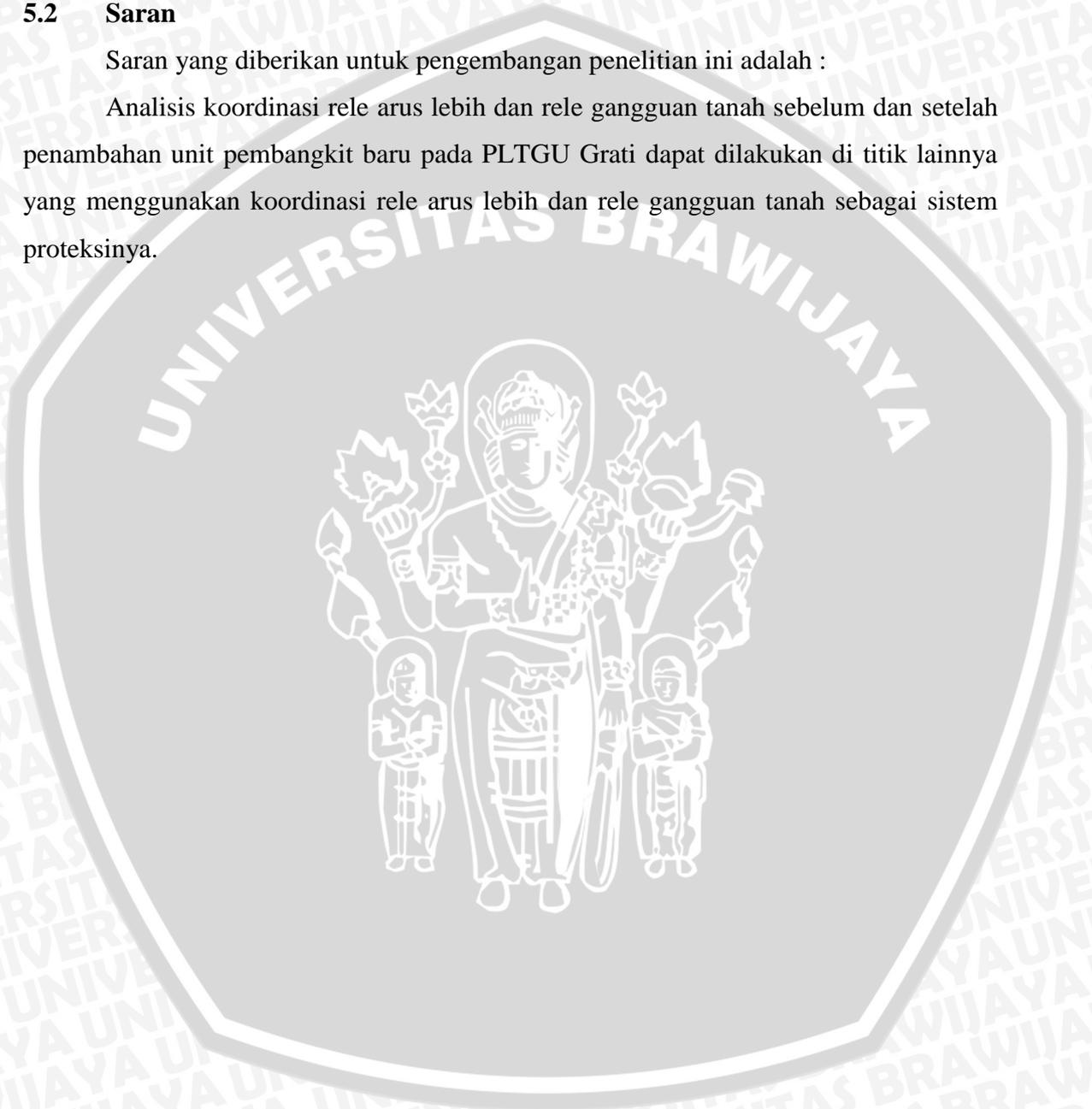
1. Adanya penambahan unit pembangkit baru mengakibatkan meningkatnya nilai arus gangguan hubung singkat pada masing-masing titik gangguan (keluaran trafo utama).
2. Meningkatnya nilai arus gangguan hubung singkat karena adanya penambahan unit pembangkit baru mengakibatkan perubahan setelan rele arus lebih dan rele gangguan tanah. Perubahan setelan rele arus lebih dan rele gangguan tanah antara sebelum dan setelah penambahan unit pembangkit baru pada masing-masing titik gangguan didefinisikan sebagai berikut :
 - a. Pada keluaran trafo utama satu, dua, dan tiga yang terhubung ke Bus 500 kV, setelan arus rele arus lebih sebelum dan setelah penambahan unit pembangkit baru berturut-turut tetap 318 A, 390 A, dan 245 A, sedangkan nilai TMS dari rele arus lebih berturut-turut berubah dari 0.55 menjadi 0.62, 0.51 menjadi 0.57, dan 0.62 menjadi 0.68. Sedangkan pada rele gangguan tanah setelan arus sebelum dan setelah penambahan unit pembangkit baru berturut-turut tetap 87 A, 107 A, dan 73 A, sedangkan nilai TMS dari ketiga rele gangguan tanah berturut-turut berubah dari 0.80 menjadi 0.87, 0.76 menjadi 0.82, dan 0.84 menjadi 0.89.
 - b. Pada keluaran trafo utama empat dan lima yang terhubung ke Bus 150 kV, setelan arus rele arus lebih sebelum dan setelah penambahan unit pembangkit baru berturut-turut tetap 1302 A dan 651 A, sedangkan nilai TMS dari rele arus lebih berturut-turut berubah dari 0.35 menjadi 0.37 dan 0.46 menjadi 0.49. Sedangkan pada rele gangguan tanah setelan arus sebelum dan sesudah penambahan unit pembangkit baru berturut-turut tetap 355 A dan 178 A, sedangkan nilai TMS dari kedua rele gangguan tanah tersebut berturut-turut berubah dari 0.53 menjadi 0.55, dan 0.64 menjadi 0.66.

- c. Penyetelan rele arus lebih pada keluaran trafo utama baru disarankan dengan nilai setelan arus sebesar 445 A dan TMS sebesar 0.54, sedangkan untuk penyetelan rele gangguan tanahnya dengan nilai setelan arus sebesar 121 A dan TMS sebesar 0.79.

5.2 Saran

Saran yang diberikan untuk pengembangan penelitian ini adalah :

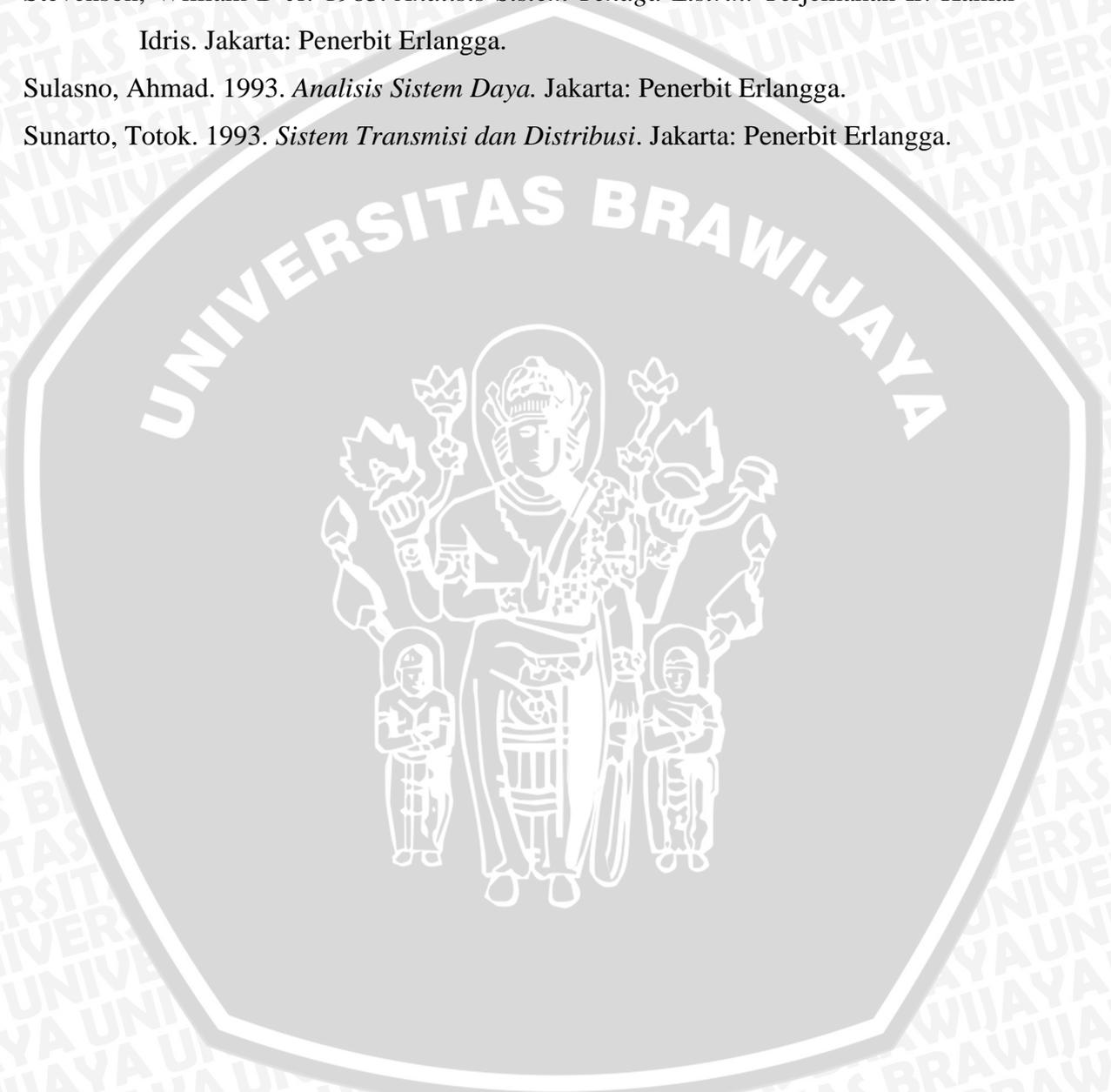
Analisis koordinasi rele arus lebih dan rele gangguan tanah sebelum dan setelah penambahan unit pembangkit baru pada PLTGU Grati dapat dilakukan di titik lainnya yang menggunakan koordinasi rele arus lebih dan rele gangguan tanah sebagai sistem proteksinya.



DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, Paul M. 1995. *Analysis of Faulted Power Systems*. IEEE Inc., New York.
- Anderson, Paul. 1985. *Power Analysis*. Prentice-Hall International Inc.
- Anonymous. 2002. *Network Protection & Automation Guide Alsthom*.
- British BS 142-1966 Standart.
- Eugene C. Lister, Ir. Drs. Hanapi Gunawan. 1993. *Rangkaian Listrik dan Analisis Sistem Daya*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Gonen, Turan. 1988. *Modern Power System Analysis*. California: John Wiley & Sons Inc.
- Hutauruk, Tumpak S. 1991. *Pentanahan Titik Netral Sistem Tenaga dan Pentanahan Peralatan*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- IEC 60255-3.
- Pandjaitan, Bonar. 2012. *Proteksi Sistem Tenaga Listrik*. Yogyakarta: Andi Offset.
- Permadi, Galuh Indra. 2013. *Analisis Pengaruh Penambahan Unit Pembangkit Baru Terhadap Arus Gangguan ke Tanah pada Gardu Induk Grati*. Skripsi. Malang: Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
- PLN Corporate University. Tanpa Tahun. *Pengenalan Proteksi Sistem Distribusi*. PT. PLN (Persero).
- PLN Pusat Pelayanan Enjiniring. 1994. *Grati Combined Cycle Power Plant 1 X 500 MW + 3 X 100 MW Design Manual*. Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.
- PLN Pusat Pelayanan Enjiniring, Co. Ltd. 2004. *Single Line GI Grati*. Penerbit: PLN, Jakarta.
- Preve, Christophe. 2006. *Protection of Electrical Network*. Great Britanian. United States: ISTE Ltd.
- Ravindranath, B. 1976. *Power System Protection and Switchgear*. Singapore: John Wiley & Sons.
- Saksomo, Setiyo. Tanpa Tahun. *Diktat Proteksi Sistem Tenaga Listrik*. Malang: Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- Samulah, Hazairin. 2004. *Dasar-dasar Sistem Proteksi Tenaga Listrik*. Universitas Sriwijaya.

- Sarimun, Wahyudi. 2012. *Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Sleva, anthony F. 2009. *Protective Relay Principles*. USA: CRC Press.
- Soekarto, J. Tanpa Tahun. *Kursus Relay Proteksi*. Semarang: PT. PLN (Persero) UDIKLAT.
- Stevenson, William D Jr. 1983. *Analisis Sistem Tenaga Listrik*. Terjemahan Ir. Kamal Idris. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Sulasno, Ahmad. 1993. *Analisis Sistem Daya*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Sunarto, Totok. 1993. *Sistem Transmisi dan Distribusi*. Jakarta: Penerbit Erlangga.



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

LAMPIRAN I

Perhitungan Impedansi Ekuivalen Urutan Positif, Negatif, dan Nol



Lampiran I

Tabel L1.1 Perhitungan Impedansi Ekuivalen Urutan Positif, Negatif, dan Nol Sesuai Titik Gangguan Sebelum Penambahan Unit Pembangkit Baru

No	Titik Gangguan	Impedansi Urutan (Z_1, Z_2, Z_0)
1	1	$Z_{S1} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)}; Z_{S2} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)};$ $Z_{S3} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)}; Z_{S4} = Z_{G4(1)} + Z_{Y4(1)};$ $Z_{S5} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)}; Z_{S6} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)};$ $Z_{P1} = Z_{S1} // Z_{S2}; Z_{P2} = Z_{S4} // Z_{S5};$ $Z_{S7} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)}; Z_{S8} = Z_{P2} + Z_{H4(1)} + Z_{L4(1)};$ $Z_{P3} = Z_{S7} // Z_{S3}; Z_{P4} = Z_{S8} // Z_{S6}; Z_{S9} = Z_{TIB(1)} + Z_{P4};$ $Z_{P5} = Z_{P3} // Z_{S9}; Z_{S10} = Z_{P5} + Z_{L1(1)}$
		<p>Sehingga</p> $Z_1 = (Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)}) // Z_{S10}$
		$Z_2 = Z_1$
1	1	$Z_{P1} = Z_{Y2(0)} // Z_{X2(0)}; Z_{P2} = Z_{Y4(0)} // Z_{X4(0)};$ $Z_{S1} = Z_{H2(0)} + Z_{P1} + Z_{L2(0)}; Z_{S2} = Z_{H4(0)} + Z_{P2} + Z_{L4(0)};$ $Z_{P3} = Z_{S1} // (Z_{T3(0)} + Z_{L3(0)});$ $Z_{P4} = Z_{S2} // (Z_{T5(0)} + Z_{L5(0)}); Z_{S3} = Z_{TIB(0)} + Z_{P4};$ $Z_{P5} = Z_{S3} // Z_{P3}; Z_{S4} = Z_{L1(0)} + Z_{P5};$
		<p>Sehingga</p> $Z_0 = Z_{S4} // Z_{T1(0)}$
2	2	$Z_{S1} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)};$ $Z_{S2} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)}; Z_{S3} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)};$ $Z_{S4} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)}; Z_{S5} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)};$ $Z_{S6} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)}; Z_{S7} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)};$ $Z_{P1} = Z_{S2} // Z_{S3}; Z_{P2} = Z_{S5} // Z_{S6}; Z_{S8} = Z_{P1} + Z_{H2(1)};$ $Z_{S9} = Z_{P2} + Z_{H4(1)} + Z_{L4(1)}; Z_{P3} = Z_{S7} // Z_{S9};$ $Z_{S10} = Z_{P3} + Z_{TIB}; Z_{P4} = Z_{S1} // Z_{S4} // Z_{S10};$
		<p>Sehingga</p> $Z_1 = Z_{S8} // (Z_{P4} + Z_{L2(1)})$

No	Titik Gangguan	Impedansi Urutan (Z_1, Z_2, Z_0)
2	2	$Z_2 = Z_1$ $Z_{P1} = Z_{Y2(0)} // Z_{X2(0)}; Z_{P2} = Z_{Y4(0)} // Z_{X4(0)};$ $Z_{S1} = Z_{H2(0)} + Z_{P1}; Z_{S2} = Z_{H4(0)} + Z_{P2} + Z_{L4(0)};$ $Z_{P3} = Z_{S2} // (Z_{T5(0)} + Z_{L5(0)}); Z_{S3} = Z_{TIB(0)} + Z_{P3};$ $Z_{P4} = Z_{S3} // (Z_{T1(0)} + Z_{L1(0)}) // (Z_{T3(0)} + Z_{L3(0)})$ $Z_{S4} = Z_{L2(0)} + Z_{P4}$ Sehingga $Z_0 = Z_{S4} // Z_{S1}$
		$Z_{S1} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)}; Z_{S2} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)};$ $Z_{S3} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)}; Z_{S4} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)};$ $Z_{S5} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)}; Z_{S6} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)};$ $Z_{P1} = Z_{S1} // Z_{S2}; Z_{P2} = Z_{S4} // Z_{S5};$ $Z_{S7} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)}; Z_{S8} = Z_{P2} + Z_{H4(1)} + Z_{L4(1)};$ $Z_{P3} = Z_{S7} // Z_{S3}; Z_{P4} = Z_{S8} // Z_{S6}; Z_{S9} = Z_{TIB(1)} + Z_{P4};$ $Z_{P5} = Z_{P3} // Z_{S9}; Z_{10} = Z_{P5} + Z_{L3(1)}$ Sehingga $Z_1 = (Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)}) // Z_{S10}$
3	3	$Z_2 = Z_1$ $Z_{P1} = Z_{Y2(0)} // Z_{X2(0)}; Z_{P2} = Z_{Y4(0)} // Z_{X4(0)};$ $Z_{S1} = Z_{H2(0)} + Z_{P1} + Z_{L2(0)}; Z_{S2} = Z_{H4(0)} + Z_{P2} + Z_{L4(0)};$ $Z_{P3} = Z_{S1} // (Z_{T1(0)} + Z_{L1(0)});$ $Z_{P4} = Z_{S2} // (Z_{T5(0)} + Z_{L5(0)}); Z_{S3} = Z_{TIB(0)} + Z_{P4};$ $Z_{P5} = Z_{S3} // Z_{P3}; Z_{S4} = Z_{L3(0)} + Z_{P5}$ Sehingga $Z_0 = Z_{S4} // Z_{T3(0)}$
		$Z_{S1} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)}; Z_{S2} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)};$ $Z_{S3} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)}; Z_{S4} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)};$ $Z_{S5} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)}; Z_{S6} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)};$ $Z_{S7} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)}; Z_{P1} = Z_{S2} // Z_{S3};$
4	4	$Z_{S1} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)}; Z_{S2} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)};$ $Z_{S3} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)}; Z_{S4} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)};$ $Z_{S5} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)}; Z_{S6} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)};$ $Z_{S7} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)}; Z_{P1} = Z_{S2} // Z_{S3};$



No	Titik Gangguan	Impedansi Urutan (Z_1, Z_2, Z_0)
4	4	$Z_{P2} = Z_{S5} // Z_{S6}; Z_{S8} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)};$ $Z_{S9} = Z_{P2} + Z_{H4(1)}; Z_{P3} = Z_{S1} // Z_{S4} // Z_{S8};$ $Z_{S10} = Z_{P3} + Z_{T1B}; Z_{P4} = Z_{S7} // Z_{S10};$ Sehingga $Z_1 = Z_{S9} // (Z_{P4} + Z_{L4(1)})$
		$Z_2 = Z_1$
		$Z_{P1} = Z_{Y2(0)} // Z_{X2(0)}; Z_{P2} = Z_{Y4(0)} // Z_{X4(0)};$ $Z_{S1} = Z_{H2(0)} + Z_{P1} + Z_{L2(0)}; Z_{S2} = Z_{H4(0)} + Z_{P2};$ $Z_{P3} = Z_{S1} // (Z_{T1(0)} + Z_{L1(0)}) // (Z_{T3(0)} + Z_{L3(0)});$ $Z_{S3} = Z_{T1B(0)} + Z_{P3}; Z_{P4} = Z_{S3} // (Z_{T5(0)} + Z_{L5(0)});$ $Z_{S4} = Z_{L4(0)} + Z_{P4}$ Sehingga $Z_0 = Z_{S4} // Z_{S2}$
5	5	$Z_{S1} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)}; Z_{S2} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)};$ $Z_{S3} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)}; Z_{S4} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)};$ $Z_{S5} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)}; Z_{S6} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)};$ $Z_{P1} = Z_{S1} // Z_{S2}; Z_{P2} = Z_{S4} // Z_{S5};$ $Z_{S7} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)}; Z_{S8} = Z_{P2} + Z_{H4(1)} + Z_{L4(1)};$ $Z_{P3} = Z_{S7} // Z_{S3} // Z_{S6}; Z_{S9} = Z_{T1B(1)} + Z_{P3};$ $Z_{P4} = Z_{S8} // Z_{S9}; Z_{S10} = Z_{P4} + Z_{L5(1)}$ Sehingga $Z_1 = (Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)}) // Z_{S10}$
		$Z_2 = Z_1$
		$Z_{P1} = Z_{Y2(0)} // Z_{X2(0)}; Z_{P2} = Z_{Y4(0)} // Z_{X4(0)};$ $Z_{S1} = Z_{H2(0)} + Z_{P1} + Z_{L2(0)}; Z_{S2} = Z_{H4(0)} + Z_{P2} + Z_{L4(0)};$ $Z_{P3} = Z_{S1} // (Z_{T1(0)} + Z_{L1(0)}) // (Z_{T3(0)} + Z_{L3(0)});$ $Z_{S3} = Z_{T1B(0)} + Z_{P3}; Z_{P4} = Z_{S3} // Z_{S2}; Z_{S4} = Z_{L5(0)} + Z_{P4}$ Sehingga $Z_0 = Z_{S4} // Z_{T5(0)}$



Tabel L1.2 Perhitungan Impedansi Ekvivalen Urutan Positif, Negatif, dan Nol Sesuai Titik Gangguan Setelah Penambahan Unit Pembangkit Baru

No	Titik Gangguan	Impedansi Urutan (Z_1, Z_2, Z_0)
1	1	$Z_{S1} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)}; Z_{S2} = Z_{G2.1(1)} + Z_{X2(1)};$ $Z_{S3} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)}; Z_{S4} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)};$ $Z_{S5} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)}; Z_{S6} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)};$ $Z_{SN} = Z_{G6(1)} + Z_{T6(1)} + Z_{L6(1)};$ $Z_{P1} = Z_{S1} // Z_{S2}; Z_{P2} = Z_{S4} // Z_{S5};$ $Z_{S7} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)};$ $Z_{S8} = Z_{P2} + Z_{H4(1)} + Z_{L4(1)};$ $Z_{P3} = Z_{S7} // Z_{S3} // Z_{SN}; Z_{P4} = Z_{S8} // Z_{S6};$ $Z_{S9} = Z_{TIB(1)} + Z_{P4};$ $Z_{P5} = Z_{P3} // Z_{S9}; Z_{S10} = Z_{P5} + Z_{L1(1)}$ Sehingga $Z_1 = (Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)}) // Z_{S10}$
		$Z_2 = Z_1$
		$Z_{P1} = Z_{Y2(0)} // Z_{X2(0)}; Z_{P2} = Z_{Y4(0)} // Z_{X4(0)};$ $Z_{S1} = Z_{H2(0)} + Z_{P1} + Z_{L2(0)};$ $Z_{S2} = Z_{H4(0)} + Z_{P2} + Z_{L4(0)};$ $Z_{SN} = Z_{T6(0)} + Z_{L6(0)};$ $Z_{P3} = Z_{S1} // (Z_{T3(0)} + Z_{L3(0)}) // Z_{SN};$ $Z_{P4} = Z_{S2} // (Z_{T5(0)} + Z_{L5(0)}); Z_{S3} = Z_{TIB(0)} + Z_{P4};$ $Z_{P5} = Z_{S3} // Z_{P3}; Z_{S4} = Z_{L1(0)} + Z_{P5}$ Sehingga $Z_0 = Z_{S4} // Z_{T1(0)}$
2	2	$Z_{S1} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)};$ $Z_{S2} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)}; Z_{S3} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)};$ $Z_{S4} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)}; Z_{S5} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)};$ $Z_{S6} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)}; Z_{S7} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)};$ $Z_{SN} = Z_{G6(1)} + Z_{T6(1)} + Z_{L6(1)};$

No	Titik Gangguan	Impedansi Urutan (Z_1, Z_2, Z_0)
2	2	$Z_{P1} = Z_{S2} // Z_{S3}; Z_{P2} = Z_{S5} // Z_{S6};$ $Z_{S8} = Z_{P1} + Z_{H2(1)}; Z_{S9} = Z_{P2} + Z_{H4(1)} + Z_{L4(1)};$ $Z_{P3} = Z_{S7} // Z_{S9}; Z_{S10} = Z_{P3} + Z_{TIB};$ $Z_{P4} = Z_{S1} // Z_{S4} // Z_{S10} // Z_{SN}$ Sehingga $Z_1 = Z_{S8} // (Z_{P4} + Z_{L2(1)})$
		$Z_2 = Z_1$ $Z_{P1} = Z_{Y2(0)} // Z_{X2(0)}; Z_{P2} = Z_{Y4(0)} // Z_{X4(0)};$ $Z_{S1} = Z_{H2(0)} + Z_{P1}; Z_{S2} = Z_{H4(0)} + Z_{P2} + Z_{L4(0)};$ $Z_{SN} = Z_{T6(0)} + Z_{L6(0)};$ $Z_{P3} = Z_{S2} // (Z_{T5(0)} + Z_{L5(0)}); Z_{S3} = Z_{TIB(0)} + Z_{P3};$ $Z_{P4} = Z_{S3} // (Z_{T1(0)} + Z_{L1(0)}) // (Z_{T3(0)} + Z_{L3(0)}) // Z_{SN};$ $Z_{S4} = Z_{L2(0)} + Z_{P4}$ Sehingga $Z_0 = Z_{S4} // Z_{S1}$
3	3	$Z_{S1} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)}; Z_{S2} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)};$ $Z_{S3} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)}; Z_{S4} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)};$ $Z_{S5} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)}; Z_{S6} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)};$ $Z_{SN} = Z_{G6(1)} + Z_{T6(1)} + Z_{L6(1)}$ $Z_{P1} = Z_{S1} // Z_{S2}; Z_{P2} = Z_{S4} // Z_{S5};$ $Z_{S7} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)};$ $Z_{S8} = Z_{P2} + Z_{H4(1)} + Z_{L4(1)};$ $Z_{P3} = Z_{S7} // Z_{S3} // Z_{SN}; Z_{P4} = Z_{S8} // Z_{S6};$ $Z_{S9} = Z_{TIB(1)} + Z_{P4};$ $Z_{P5} = Z_{P3} // Z_{S9}; Z_{S10} = Z_{P5} + Z_{L3(1)}$ Sehingga $Z_1 = (Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)}) // Z_{S10}$ $Z_2 = Z_1$



No	Titik Gangguan	Impedansi Urutan (Z_1, Z_2, Z_0)
3	3	$Z_{P1} = Z_{Y2(0)} // Z_{X2(0)}; Z_{P2} = Z_{Y4(0)} // Z_{X4(0)};$ $Z_{S1} = Z_{H2(0)} + Z_{P1} + Z_{L2(0)};$ $Z_{S2} = Z_{H4(0)} + Z_{P2} + Z_{L4(0)};$ $Z_{SN} = Z_{T6(0)} + Z_{L6(0)};$ $Z_{P3} = Z_{S1} // (Z_{T1(0)} + Z_{L1(0)}) // Z_{SN};$ $Z_{P4} = Z_{S2} // (Z_{T5(0)} + Z_{L5(0)}); Z_{S3} = Z_{T1B(0)} + Z_{P4};$ $Z_{P5} = Z_{S3} // Z_{P3}; Z_{S4} = Z_{L3(0)} + Z_{P5}$ <p>Sehingga</p> $Z_0 = Z_{S4} // Z_{T3(0)}$
4	4	$Z_{S1} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)};$ $Z_{S2} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)}; Z_{S3} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)};$ $Z_{S4} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)}; Z_{S5} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)};$ $Z_{S6} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)};$ $Z_{S7} = Z_{G5(1)} + Z_{H5(1)} + Z_{L5(1)};$ $Z_{SN} = Z_{G6(1)} + Z_{T6(1)} + Z_{L6(1)};$ $Z_{P1} = Z_{S2} // Z_{S3}; Z_{P2} = Z_{S5} // Z_{S6};$ $Z_{S8} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)}; Z_{S9} = Z_{P2} + Z_{H4(1)};$ $Z_{P3} = Z_{S1} // Z_{S4} // Z_{S8} // Z_{SN}; Z_{S10} = Z_{P3} + Z_{T1B};$ $Z_{P4} = Z_{S7} // Z_{S10}$ <p>Sehingga</p> $Z_1 = Z_{S9} // (Z_{P4} + Z_{L4(1)})$
		$Z_2 = Z_1$ $Z_{P1} = Z_{Y2(0)} // Z_{X2(0)}; Z_{P2} = Z_{Y4(0)} // Z_{X4(0)};$ $Z_{SN} = Z_{T6(0)} + Z_{L6(0)};$ $Z_{S1} = Z_{H2(0)} + Z_{P1} + Z_{L2(0)}; Z_{S2} = Z_{H4(0)} + Z_{P2};$ $Z_{P3} = Z_{S1} // (Z_{T1(0)} + Z_{L1(0)}) // (Z_{T3(0)} + Z_{L3(0)}) // Z_{SN};$ $Z_{S3} = Z_{T1B(0)} + Z_{P3}; Z_{P4} = Z_{S3} // (Z_{T5(0)} + Z_{L5(0)});$ $Z_{S4} = Z_{L4(0)} + Z_{P4};$



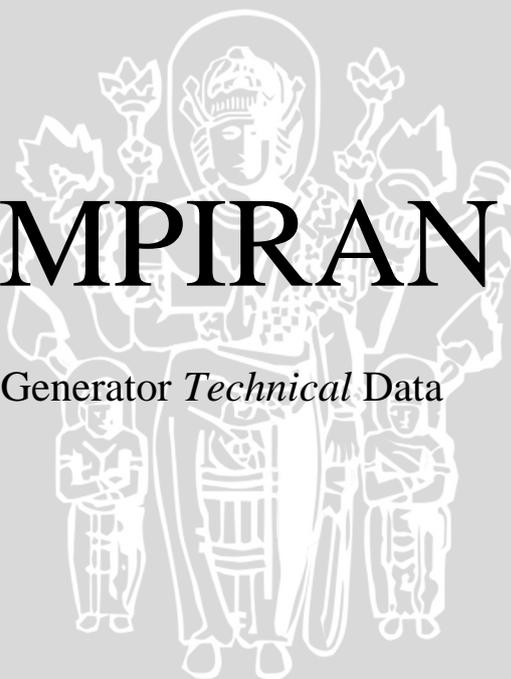
No	Titik Gangguan	Impedansi Urutan (Z_1, Z_2, Z_0)
4	4	<p>Sehingga</p> $Z_0 = Z_{S4} // Z_{S2}$
5	5	$Z_{S1} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)}; Z_{S2} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)};$ $Z_{S3} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)}; Z_{S4} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)};$ $Z_{S5} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)}; Z_{S6} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)};$ $Z_{SN} = Z_{G6(1)} + Z_{T6(1)} + Z_{L6(1)};$ $Z_{P1} = Z_{S1} // Z_{S2}; Z_{P2} = Z_{S4} // Z_{S5};$ $Z_{S7} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)}; Z_{S8} = Z_{P2} + Z_{H4(1)} + Z_{L4(1)};$ $Z_{P3} = Z_{S7} // Z_{S3} // Z_{S6} // Z_{SN}; Z_{S9} = Z_{TIB(1)} + Z_{P3};$ $Z_{P4} = Z_{S8} // Z_{S9}; Z_{S10} = Z_{P4} + Z_{L5(1)}$ <p>Sehingga</p> $Z_1 = (Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)}) // Z_{S10}$ <hr/> $Z_2 = Z_1$ <hr/> $Z_{P1} = Z_{Y2(0)} // Z_{X2(0)}; Z_{P2} = Z_{Y4(0)} // Z_{X4(0)};$ $Z_{SN} = Z_{T6(0)} + Z_{L6(0)}$ $Z_{S1} = Z_{H2(0)} + Z_{P1} + Z_{L2(0)};$ $Z_{S2} = Z_{H4(0)} + Z_{P2} + Z_{L4(0)};$ $Z_{P3} = Z_{S1} // (Z_{T1(0)} + Z_{L1(0)}) // (Z_{T3(0)} + Z_{L3(0)}) // Z_{SN};$ $Z_{S3} = Z_{TIB(0)} + Z_{P3}; Z_{P4} = Z_{S3} // Z_{S2};$ $Z_{S4} = Z_{L5(0)} + Z_{P4}$ <p>Sehingga</p> $Z_0 = Z_{S4} // Z_{T5(0)}$
6	6	$Z_{S1} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)}; Z_{S2} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)};$ $Z_{S3} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)}; Z_{S4} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)};$ $Z_{S5} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)}; Z_{S6} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)};$ $Z_{SN} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)};$ $Z_{P1} = Z_{S1} // Z_{S2}; Z_{P2} = Z_{S4} // Z_{S5};$

No	Titik Gangguan	Impedansi Urutan (Z_1, Z_2, Z_0)
		$Z_{S7} = Z_{P1} + Z_{T2(1)} + Z_{L2(1)};$ $Z_{S8} = Z_{P2} + Z_{H4(1)} + Z_{L4(1)};$ $Z_{P3} = Z_{S7} // Z_{S3} // Z_{SN}; Z_{P4} = Z_{S8} // Z_{S6};$ $Z_{S9} = Z_{TIB(1)} + Z_{P4}; Z_{P5} = Z_{P3} // Z_{S9};$ $Z_{S10} = Z_{P5} + Z_{L6(1)}$ <p>Sehingga</p> $Z_1 = (Z_{G6(1)} + Z_{T6(1)}) // Z_{S10}$
6	6	$Z_{P1} = Z_{Y2(0)} // Z_{X2(0)}; Z_{P2} = Z_{Y4(0)} // Z_{X4(0)};$ $Z_{S1} = Z_{H2(0)} + Z_{P1} + Z_{L2(0)};$ $Z_{S2} = Z_{H4(0)} + Z_{P2} + Z_{L4(0)};$ $Z_{S3} = Z_{T3(0)} + Z_{L3(0)};$ $Z_{P3} = Z_{S1} // (Z_{T1(0)} + Z_{L1(0)}) // Z_{S3};$ $Z_{P4} = Z_{S2} // (Z_{T5(0)} + Z_{L5(0)}); Z_{S3} = Z_{TIB(0)} + Z_{P4};$ $Z_{P5} = Z_{S3} // Z_{P3}; Z_{S4} = Z_{L6(0)} + Z_{P5}$ <p>Sehingga</p> $Z_0 = Z_{S4} // Z_{T6(0)}$

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

LAMPIRAN II

Generator *Technical Data*



Lampiran II

1. Grati CCPP

Gas Turbin Generator

Generator Technical Data

Generator Type	TLRI 108/36
Rating	153.75 MVA
Voltage Variation	10.5 kV
Power Factor	0.8
Rated Current	8454 A
Frequency	50 Hz
Speed	3000 rpm
Cooling Medium	Air
Cooling System Stator	Indirect
Cooling System Rotor	Direct
Cooling Medium Inlet-Temperature	40 °C
Synchronous Reactance X_d (unsat)	226 %
Synchronous Reactance X'_d (unsat)	29.6 %
Synchronous Reactance X''_d (unsat)	21.4 %
Positive Sequence Reactance X_1	21.4 %
Zero Sequence Reactance X_0	11.07 %
Netral Grounding Resistance	500 Ω
Short Circuit Ratio	0.48
Type of Excitation	Static
Rated Excitation Current	880 A
Rated Excitation Voltage	390 V
Efficiency at (without field-losses)	
4/4 Load	98.70 %
3/4 Load	98.53 %
2/4 Load	98.08 %
1/4 Load	96.55 %

2. Grati CCPP

Steam Turbin Generator

Generator Technical Data

Generator Type	TLRI 100/42
Rating	251.75 MVA
Rated Voltage	15.75 kV
Voltage Variation	+/- 5 %
Power Factor	0.8
Rated Current	9228 A
Frequency	50 Hz
Speed	3000 rpm
Cooling Medium	Hydrogen Gas
Gas Pressure	3 Bar
Cooling System Stator	Indirect
Cooling System Rotor	Direct
Cooling Medium Inlet-Temperature	40 °C
Synchronous Reactance X_d (unsat)	232 %
Synchronous Reactance X'_d (unsat)	27.2 %
Synchronous Reactance X''_d (unsat)	22.1 %
Positive Sequence Reactance X_1	22.0 %
Zero Sequence Reactance X_0	11.1 %
Neutral Grounding Resistance	500 Ω
Short Circuit Ratio	0.48
Type of Excitation	Static
Rated Excitation Current	2510 A
Rated Excitation Voltage	345 V
Efficiency at (without field-losses)	
4/4 Load	99.17 %
3/4 Load	99.18 %
2/4 Load	99.08 %
1/4 Load	98.49 %

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

LAMPIRAN III

Data Desain Unit Pembangkit Baru PLTGU Grati



Lampiran III

DATA DESAIN PEMBANGKIT PLTGU Grati (400 – 500 MW)

1.	Data Pembangkit	
2 unit (1 on 1) (1 Gas turbine, 1 Steam Turbine) + 1 HRSG	Gas Turbine (1x300 MW) → Generator Terminal voltage = 21 kV	
	Steam Turbine (1x150 MW) → Generator Terminal voltage = 13.5 kV	
3 Unit (2 on 1) (2 Gas turbine, 1 Steam Turbine) + 2 HRSG	Gas Turbine (2x150 MW) → Generator Terminal Voltage = 13.5 kV	
	Steam Turbine (1x150 MW) → Generator Terminal voltage = 13.5 kV	
4 unit (3 on 1) (3 Gas turbine, 1 Steam Turbine) + 3 HRSG	Gas Turbine (3x100 MW) → Generator Terminal voltage = 10.5 kV	
	Steam Turbine (1x200 MW) → Generator Terminal voltage = 15.75 kV	
2.	Data Trafo	
1 on 1	Dua (2) two winding transformer :	
	350 MVA ; 21 kV / 500kV ; Z = 11% (Gas Turbine) 186 MVA ; 13.5 kV / 500 kV ; Z = 14.5 % (Steam Turbine)	
2 on 1	Satu (1) three winding transformer :	
	372 MVA ; 13.5 kV / 500 kV ; Z = 11 % (Gas Turbine) Satu (1) two winding transformer 186 MVA ; 13.5 kV / 500 kV ; Z= 14.5 % (Steam Turbine)	
3 on 1	Satu (1) three winding transformer :	
	307.5 MVA ; 10.5 kV / 500 kV ; Z = 10 % (Gas Turbine) Dua (2) two Winding transformer 153.75 MVA ; 10.5 kV / 500 kV ; Z = 32 % (Gas Turbine)	

	Data Trafo	
3 on 1	250 MVA ; 15.75 kV / 500 kV ; Z = 13.5 % (Steam Turbine)	
3.	Data Impedansi Sistem	
	Impedansi ekivalen sistem urutan positif (Z_1) dan impedansi ekivalen sistem urutan nol (Z_0) → pilih opsi tipikal di software	
	Arus gangguan maksimum → 40 kA	

KETERANGAN :

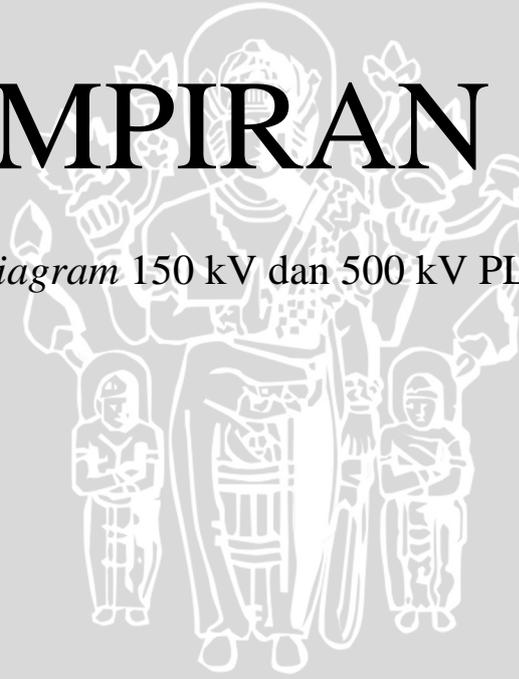


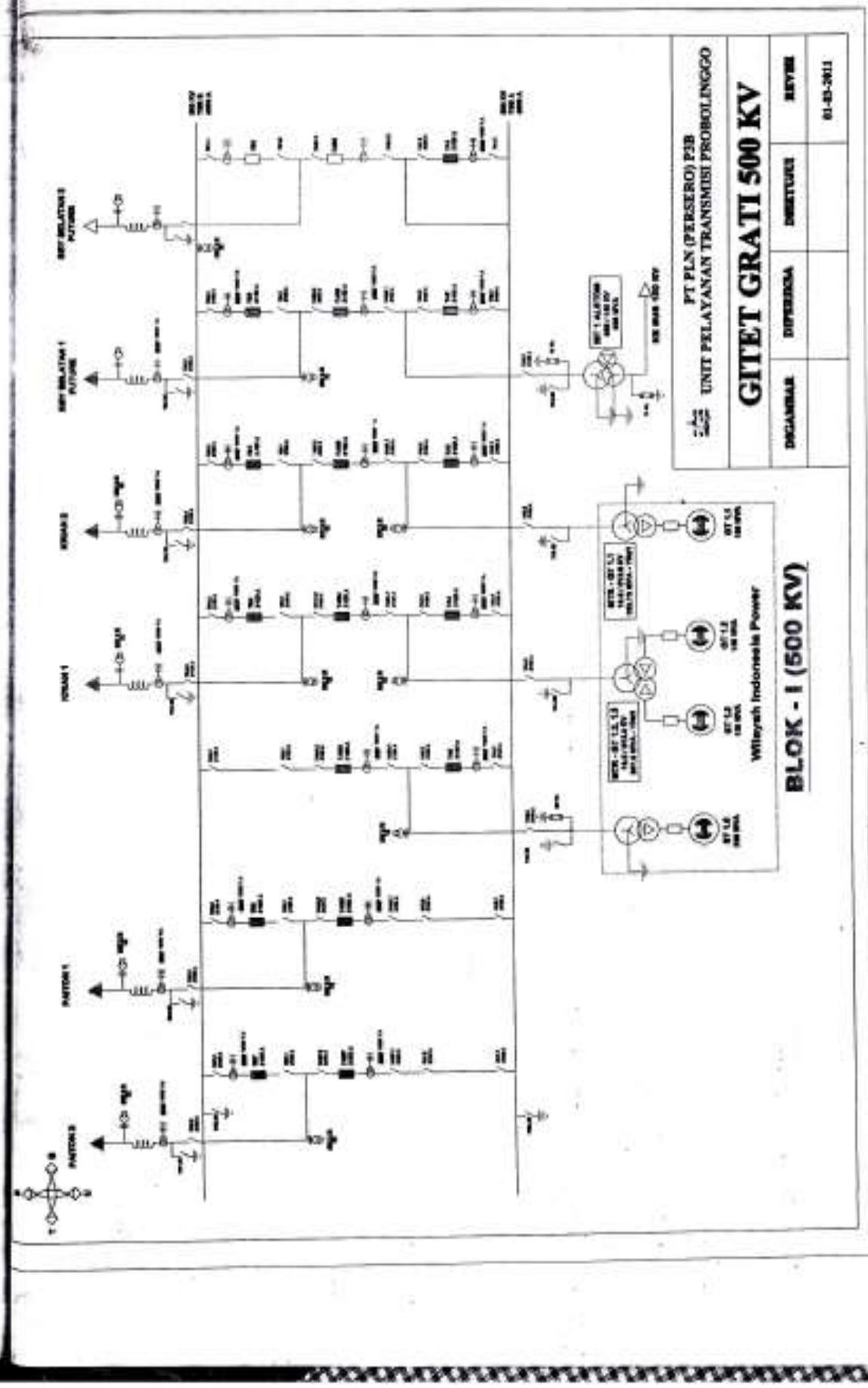
: Unit yang Ditambahkan

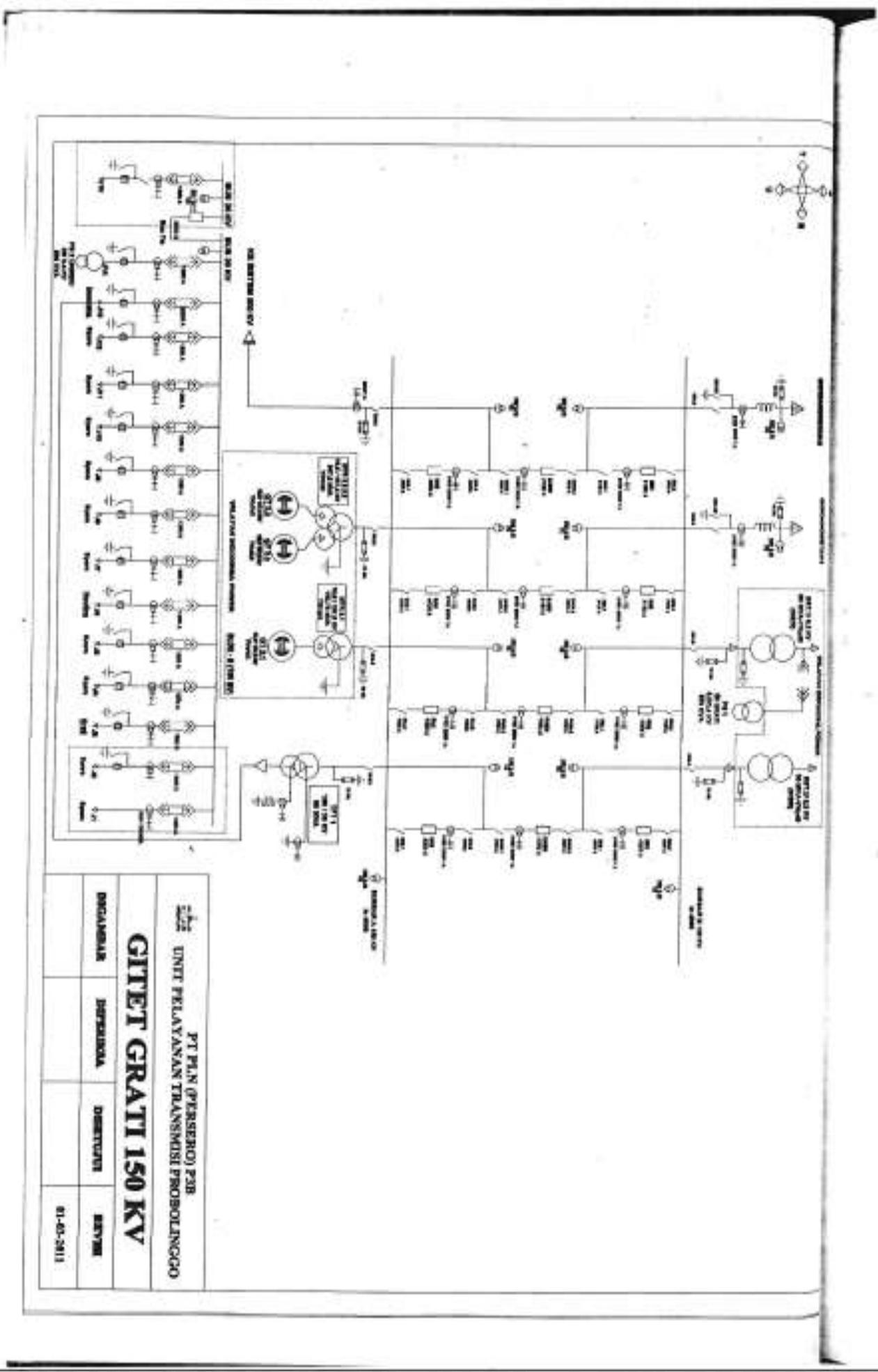


LAMPIRAN IV

Single Line Diagram 150 kV dan 500 kV PLTGU Grati







PT PLN (PERSERO) P3B
UNIT PELAYANAN TRANSMISI PROBOLINGGO

DOKUMEN	REVISI	DESIGNER	REVISOR

GITET GRATI 150 KV

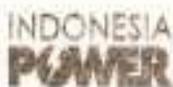
NO. DOKUMEN	REVISI	DESIGNER	REVISOR

81-03-2011



LAMPIRAN V

Lembar Persetujuan Pengambilan Data di PLTGU Grati



UNIT BISNIS PEMBANGKITAN PERAK - GRATI

Jl. Raya Surabaya - Gresik - On 75 PG, Sarif, Sid 47181
Desa Wadas, Kecamatan Lela, Kabupaten Gresik
Telp: (031) 4255 4750
Faksimili: (031) 4255 4256
S.A.N. : (031) 4255 4255 (PABX) Gresik, Perak



Nomor : Y/ 32 / UPPGT / 2015
Lembaran :
Perihal : Pengambilan data skripsi

Perkiraan : 18 Mei 2015

Kepada

Kaprodi Teknik Elektro
Universitas Brawijaya
Jl. Mayjen Haryono no.187
Malang 65146

Mendaklanjut surat Seputra,

Nomor : 1424/UN10.6/WK/2015
Perihal : Pengambilan data skripsi

Dengan ini diinformasikan bahwa pada prinsipnya kami menyetujui permohonan saudara untuk melaksanakan praktik kerja di tempat kami dengan nama mahasiswa abb

NO	NAMA	JURUSAN	PENEMPATAN PKL
1	Ivovari Adita Pratama	Teknik Elektro	Fasilitas Labor P. TGU Unit

- Jadwal praktik kerja mulai tanggal **18 Mei - 31 Mei 2015**
- Perusahaan tidak memberikan fasilitas antar jemput / bantuan uang transport, penginapan, uang makan, uang saku maupun asuransi kecelakaan.
- Siswa datang langsung ke Bidang Humas Unit Pembangkitan Perak Grati dengan membawa copy surat ini yang telah diampas kampus / sekolah.

Siswa diwajibkan:

- Melaksanakan praktik kerja sesuai dengan jadwal yang telah ditetapkan dan mematuhi peraturan yang berlaku di perusahaan
- Jadwal masuk Senin - Jumat 07.30 WIB
Jadwal pulang Senin - Kamis 16.00 WIB
Jumat 18.30 WIB
- Membawa pakaian kerja lapangan, safety shoes, helm dan pakaian olah raga.
- Menyediakan foto berwarna ukuran 4x 6 sebanyak 2 (dua) lembar.
- Membuat laporan praktik kerja lapangan

Demikian diinformasikan, atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih

