

**ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN UNIT PEMBANGKIT
BARU TERHADAP ARUS GANGGUAN KE TANAH
PADA GARDU INDUK GRATI**

**SKRIPSI
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO**

Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:
GALUH INDRA PERMADI
NIM. 0910630060 - 63

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

LEMBAR PERSETUJUAN

**ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN UNIT PEMBANGKIT BARU
TERHADAP ARUS GANGGUAN KE TANAH PADA GARDU INDUK GRATI**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:
GALUH INDRA PERMADI
NIM. 0910630060 - 63

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

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

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

LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN UNIT PEMBANGKIT BARU
TERHADAP ARUS GANGGUAN KE TANAH PADA GARDU INDUK GRATI**

SKRIPSI

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh:

GALUH INDRA PERMADI

NIM. 0910630060

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
Tanggal 11 Desember 2013

DOSEN PENGUJI

Ir. Hery Purnomo, MT

NIP. 19550708 198212 1 001

Dr. Ir. Harry S. Dachlan, MSc

NIP. 19490309 198602 1 001

Ir. Soeprapto, MT

NIP. 19561020 198903 1 001

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro

M. Aziz Muslim, ST., MT., Ph.D

NIP. 19741203 200012 1 001

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Robbil 'Alamiin, puji dan syukur senantiasa tercurahkan kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga skripsi dengan judul “*Analisis Pengaruh Penambahan Unit Pembangkit Baru terhadap Arus Gangguan ke Tanah pada Gardu Induk Grati*” dapat selesai dengan baik. Tidak lupa shalawat dan salam semoga senantiasa tercurahkan kepada Rasulullah SAW, beserta keluarga, sahabat, dan para pengikut beliau.

Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya juga disampaikan kepada :

1. Bapak M. Aziz Muslim, ST., MT., Ph.D., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro.
2. Bapak Hadi Suyono, ST., MT., Ph.D., selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro.
3. Bapak M. Rif'an, ST., MT., selaku Ketua Program Studi Jurusan Teknik Elektro.
4. Ibu Dr. Rini Nur Hasanah, ST., M.Sc., selaku Ketua Kelompok Dosen dan Keahlian Teknik Energi Elektrik.
5. Bapak Drs. Ir. Moch. Dhofir, MT., dan Bapak Ir. Mahfudz Shidiq, MT., sebagai dosen pembimbing atas waktu, saran, nasehat, dan kesabarannya dalam pengerjaan hingga penyelesaian skripsi ini.
6. Bapak/Ibu Dosen dan segenap Karyawan Jurusan Teknik Elektro.
7. Ayah Riyamun, Ibu Safriaty Hadju, Kakak Ryanda Soemantri, Adek Fenda Ayu Prahesty, Adek Pramudi Maulana dan keluargaku tercinta. Terima kasih atas dukungan, kepercayaan, perhatian, pengertian dan kasih sayangnya.
8. Ignatius Agung Pratama yang telah menemani dan membantu selama ini. Terima kasih atas perhatian, bantuan dan masukannya.
9. Bapak Bayu Priyo, Bapak Khayubi dan segenap pegawai PT. Indonesia Power Unit Bisnis Pembangkitan Perak dan Grati.
10. Bapak Suyud, Bapak Handoko dan segenap pegawai GITET Grati.
11. Keluarga besar Mahasiswa Teknik Elektro Universitas Brawijaya.

12. Rekan-rekan asisten Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi atas dukungan, waktu dan kebersamaannya.
13. Dan semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu.

Hal yang perlu disadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan dan kesalahan sehingga saran dan kritik membangun sangat diharapkan untuk memperbaiki kekurangan tersebut.

Semoga skripsi ini dapat bermanfaat untuk perkembangan kegiatan pendidikan dan penelitian, khususnya di Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya. Amin.

Malang, November 2013

Penulis



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR.....	vi
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR LAMPIRAN.....	ix
ABSTRAK.....	x
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	1
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan.....	2
1.5 Sistematika Penulisan.....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Gangguan ke Tanah pada Sistem Gardu Induk.....	4
2.2 Analisis Arus Gangguan ke Tanah Sebelum Penambahan Pembangkit.....	4
2.2.1 Impedansi Urutan Sebelum Penambahan Pembangkit.....	7
2.3 Analisis Arus Gangguan ke Tanah Sesudah Penambahan Pembangkit.....	23
2.3.1 Impedansi Urutan dengan Titik Netral Sub-Sistem Baru Ditanahkan Langsung.....	25
2.3.2 Impedansi Urutan dengan Titik Netral Sub-Sistem Baru Ditanahkan Melalui Tahanan	34
2.4 Persamaan Arus Gangguan ke Tanah.....	38
2.4.1 Gangguan Satu Fasa ke Tanah	38
2.4.2 Gangguan Dua Fasa ke Tanah.....	39
2.4.3 Gangguan Tiga Fasa ke Tanah	40

BAB III METODOLOGI

3.1	Studi Literatur	43
3.2	Pengumpulan Data	43
3.3	Perhitungan Arus Gangguan pada Sistem Gardu Induk Grati	44
3.3.1.	Data-Data Spesifikasi Sistem Sebelum Penambahan Pembangkit.....	45
3.3.2.	Penentuan Letak Titik Gangguan.....	45
3.3.3.	Perhitungan Impedansi Urutan.....	45
3.3.4	Perhitungan Arus Gangguan Berdasarkan Jenis Gangguan ..	46
3.3.5	Data-Data Spesifikasi Sub-Sistem Baru.....	46
3.3.5	Perhitungan Arus Gangguan Sesudah Penambahan Pembangkit.....	46
3.4	Analisis Hasil Perhitungan.....	47
3.5	Pengambilan Kesimpulan dan Saran.....	47

BAB IV PERHITUNGAN DAN ANALISIS

4.1	Spesifikasi Komponen Sistem Gardu Induk Grati	48
4.1.1	Unit Pembangkit.....	48
4.1.2	Trafo Daya.....	50
4.1.1	Saluran.....	50
4.2	Perhitungan Arus Gangguan ke Tanah Sebelum Penambahan Pembangkit.....	51
4.3	Spesifikasi Sub-Sistem Baru	55
4.3.1	Unit Pembangkit Baru.....	55
4.3.2	Trafo Daya Baru.....	56
4.3.2	Saluran Baru	56
4.4	Perhitungan Arus Gangguan ke Tanah Sesudah Penambahan Pembangkit.....	56
4.4.1	Kondisi Titik Netral Sub-Sistem yang Baru Ditanahkan Langsung	56
4.4.1	Kondisi Titik Netral Sistem yang Baru Ditanahkan melalui Tahanan	57
4.5	Analisis Hasil Perhitungan.....	58

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan.....	61
5.2 Saran.....	62

DAFTAR PUSTAKA.....	63
----------------------------	-----------

LAMPIRAN.....	64
----------------------	-----------



DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Hal.
Gambar 2.1	Diagram Garis Tunggal Sistem Gardu Induk Grati 500 kV Sebelum Penambahan Pembangkit.....	5
Gambar 2.2	Diagram Garis Tunggal Sistem Gardu Induk Grati 150 kV Sebelum Penambahan Pembangkit.....	6
Gambar 2.3	(a) Simbol Diagram Garis Pembangkit dengan Z_N	7
	(b) Rangkaian Ekuivalen Impedansi Urutan Nol Pembangkit dengan Z_N	7
Gambar 2.4	(a) Diagram Belitan Trafo Daya Tiga Belitan	8
	(b) Rangkaian Ekuivalen Impedansi Urutan Trafo Daya Tiga Belitan	8
Gambar 2.5	(a) Rangkaian Impedansi Urutan Positif untuk Gambar 2.1.....	9
	(b) Rangkaian Impedansi Urutan Negatif untuk Gambar 2.1	9
	(c) Rangkaian Impedansi Urutan Nol untuk Gambar 2.1	10
Gambar 2.6	(a) Rangkaian Impedansi Urutan Positif untuk Gambar 2.2.....	10
	(b) Rangkaian Impedansi Urutan Negatif untuk Gambar 2.2.....	11
	(c) Rangkaian Impedansi Urutan Nol untuk Gambar 2.2	11
Gambar 2.7	(a) Rangkaian Impedansi Urutan Z_1 untuk Gangguan pada Titik 1 _A	12
	(b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 2.7 (a).....	13
	(c) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 2.7 (b).....	13
	(d) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 2.7 (c).....	14
	(e) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 2.7 (d).....	14
	(f) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 2.7 (e).....	15
	(g) Rangkaian Ekuivalen Impedansi Z_1 untuk Gangguan pada Titik 1 _A	15
Gambar 2.8	(a) Rangkaian Impedansi Urutan Z_2 untuk Gangguan pada Titik 1 _A	16
	(b) Rangkaian Ekuivalen Impedansi Z_2	16
Gambar 2.9	Rangkaian Impedansi Urutan Z_0 untuk Gangguan pada Titik 1 _A dan Penyederhanaannya	17
Gambar 2.10	Diagram Garis Tunggal Sistem Gardu Induk Grati Sesudah Penambahan Satu Unit Pembangkit.....	23



Gambar 2.11	(a) Rangkaian Impedansi Urutan Positif Sistem 500 kV Sesudah Penambahan Pembangkit.....	25
	(b) Rangkaian Impedansi Urutan Negatif Sistem 500 kV Sesudah Penambahan Pembangkit.....	26
	(c) Rangkaian Impedansi Urutan Nol Sistem 500 kV Sesudah Penambahan Pembangkit.....	26
Gambar 2.12	Diagram Garis Tunggal Sub-Sistem Baru dengan Titik Netral Ditanahkan melalui Tahanan	34
Gambar 2.13	(a) Trafo Hubungan Δ - Y dengan Titik Netral Ditanahkan melalui Impedansi Z_N	35
	(b) Rangkaian Ekuivalen Impedansi Urutan Nol nya.....	35
Gambar 2.14	Rangkaian Impedansi Z_0 Sistem 500 kV Sesudah Penambahan Pembangkit dengan Titik Netral Sub-Sistem VI Ditanahkan melalui Z_{N-T6}	35
Gambar 2.15	Hubungan Jaringan Urutan Gangguan Satu Fasa ke Tanah	38
Gambar 2.16	Hubungan Jaringan Urutan Gangguan Dua Fasa ke Tanah.....	39
Gambar 2.17	Hubungan Jaringan Urutan Gangguan Tiga Fasa ke Tanah	40
Gambar 3.1	Diagram Alir Metodologi	42
Gambar 3.2	Diagram Alir Perhitungan Arus Gangguan Sebelum dan Sesudah Penambahan Satu Pembangkit Pada Sistem Gardu Induk Grati.....	44
Gambar 4.1	Diagram Garis Tunggal Sistem Gardu Induk Grati Sebelum Penambahan Pembangkit.....	49

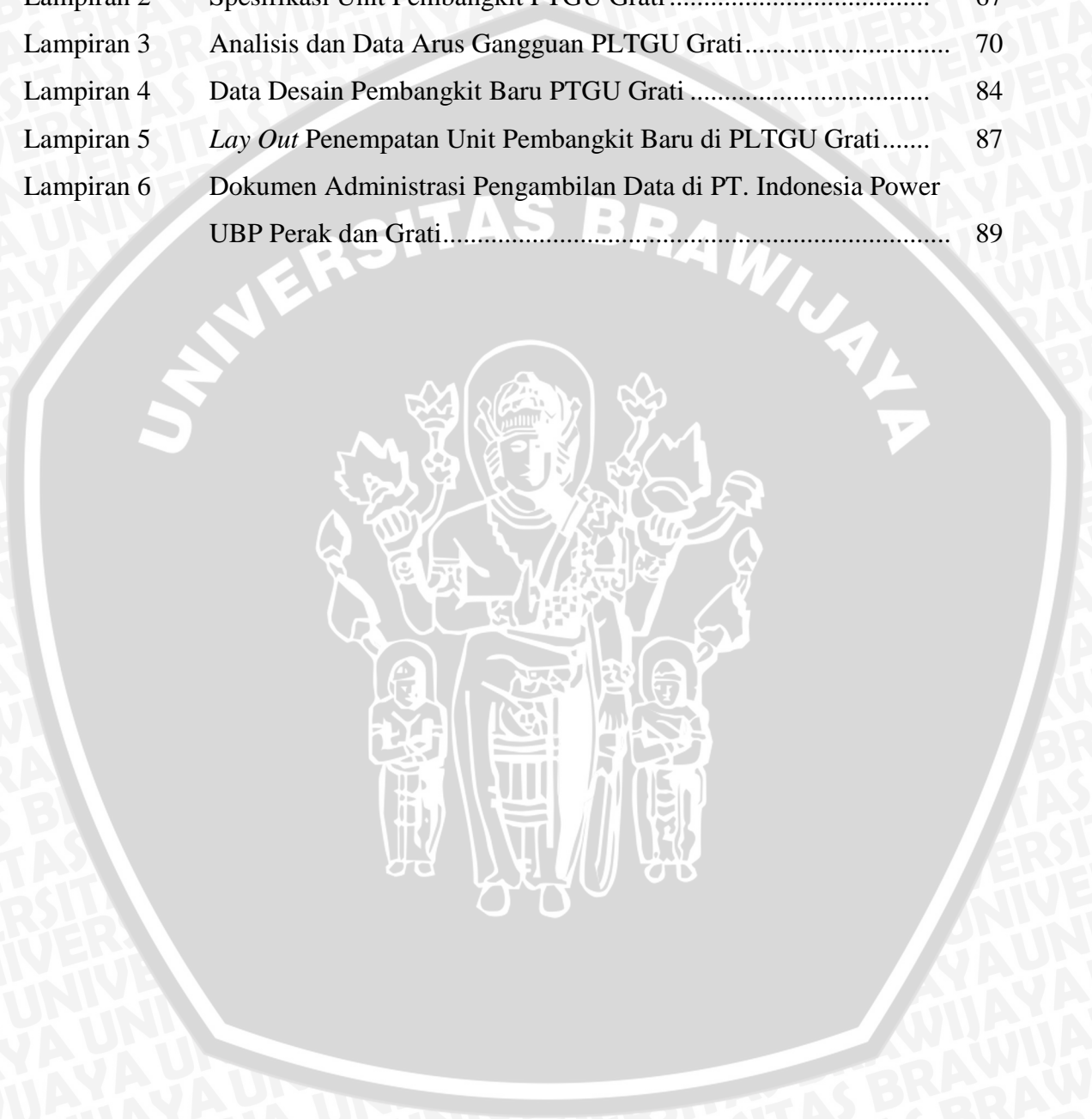
DAFTAR TABEL

No.	Judul	Hal.
Tabel 2.1	Perhitungan Impedansi Urutan Z_1, Z_2, Z_0 di Setiap Titik Gangguan Pada Sistem Gardu Induk Grati Sebelum Penambahan Pembangkit	18
Tabel 2.2	Perhitungan Impedansi Urutan Z_1, Z_2, Z_0 di Setiap Titik Gangguan Pada Sistem Gardu Induk Grati Sesudah Penambahan Pembangkit	27
Tabel 2.3	Perhitungan Impedansi Z_0 di Setiap Titik Gangguan Pada Sistem Gardu Induk Grati dengan Titik Netral Sub-Sistem VI Ditanahkan melalui Z_{N-T6}	36
Tabel 4.1	Data Spesifikasi Pembangkit pada Sistem Gardu Induk Grati Sebelum Penambahan Pembangkit	48
Tabel 4.2	Data Spesifikasi Trafo Daya pada Sistem Gardu Induk Grati Sebelum Penambahan Pembangkit	50
Tabel 4.3	Data Spesifikasi Saluran pada Sistem Gardu Induk Grati	50
Tabel 4.4	Nilai Impedansi Urutan Tiap Komponen Pada Sistem Gardu Induk Grati Sebelum Penambahan Pembangkit	52
Tabel 4.5	Nilai Arus Gangguan ke Tanah pada Sistem Gardu Induk Grati Sebelum Penambahan Pembangkit	54
Tabel 4.6	Data Arus Gangguan PLTGU Grati pada Rel 150 dan 500 kV	55
Tabel 4.7	Nilai Impedansi Urutan Komponen Sub-Sistem Baru	56
Tabel 4.8	Nilai Arus Gangguan ke Tanah Sesudah Penambahan Pembangkit dengan Titik Netral Sub-Sistem yang Baru Ditanahkan Langsung ...	57
Tabel 4.9	Nilai Arus Gangguan ke Tanah Sesudah Penambahan Pembangkit dengan Titik Netral Sub-Sistem yang Baru Ditanahkan melalui Tahanan	58



DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul	Hal.
Lampiran 1	Diagram Garis Tunggal GITET Grati 150 kV dan 500 kV	64
Lampiran 2	Spesifikasi Unit Pembangkit PTGU Grati	67
Lampiran 3	Analisis dan Data Arus Gangguan PLTGU Grati.....	70
Lampiran 4	Data Desain Pembangkit Baru PTGU Grati	84
Lampiran 5	<i>Lay Out</i> Penempatan Unit Pembangkit Baru di PLTGU Grati.....	87
Lampiran 6	Dokumen Administrasi Pengambilan Data di PT. Indonesia Power UBP Perak dan Grati.....	89



ABSTRAK

Galuh Indra Permadi, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Oktober 2013, *Analisis Pengaruh Penambahan Unit Pembangkit Baru Terhadap Arus Gangguan ke Tanah pada Gardu Induk Grati*, Dosen Pembimbing : Drs. Ir. Moch. Dhofir, MT. dan Ir. Mahfudz Shidiq, MT.

Skripsi ini membahas tentang arus gangguan pada sistem Gardu Induk Grati. Penambahan Unit Pembangkit baru pada PLTGU yang dekat dengan Gardu Induk Grati membuat arus gangguan pada sistem tersebut berubah, khususnya ketika gangguan terjadi di sisi Pembangkit dan di sisi Gardu Induk. Permasalahan yang muncul inilah yang dianalisis, apakah arus gangguan ke tanah pada Gardu Induk Grati menurun atau justru semakin meningkat. Analisis ini dilakukan dengan menghitung nilai arus gangguan satu fasa ke tanah, dua fasa ke tanah dan tiga fasa ke tanah sebelum dan sesudah penambahan Unit Pembangkit baru dengan metode perhitungan impedansi urutan ekuivalen sistem sesuai dengan titik dimana gangguan terjadi. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa penambahan Unit Pembangkit baru membuat nilai arus gangguan ke tanah meningkat, khususnya arus gangguan maksimum yaitu dari 32343.521 A menjadi 36565.117 A. Analisis ini juga dilakukan untuk kondisi titik netral sub-sistem baru yang ditanahkan melalui tahanan 500 Ω . Hasilnya adalah pada gangguan satu fasa ke tanah dan dua fasa ke tanah, arus gangguan maksimum menurun dengan selisih mencapai 2.3 %.

Kata Kunci—Gardu Induk Grati, impedansi urutan, arus gangguan ke tanah.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan daya listrik di Pulau Jawa khususnya di wilayah Jawa Timur yang terus meningkat perlu diikuti dengan penyediaan daya listrik dengan cara menambah unit-unit Pembangkit baru. Untuk memenuhi kebutuhan permintaan daya listrik tersebut, PT. Indonesia Power (Pembangkit Listrik Tenaga Gas–Uap, disingkat PLTGU) yang berada di Grati, Kabupaten Pasuruan menambah satu Unit Pembangkit baru. PLTGU Grati berada dekat dengan Gardu Induk sehingga pembangunan Pembangkit baru ini tentu saja harus diikuti dengan pembangunan Gardu Induk.

Penambahan Unit Pembangkit baru pada suatu Sistem Gardu Induk sangat mempengaruhi besar arus gangguan ke tanah, utamanya gangguan ke tanah pada sisi Pembangkit dan pada sisi Gardu Induk. Gangguan ke tanah yang terjadi pada sisi Pembangkit dan sisi Gardu Induk ini menghasilkan arus yang sangat besar bila dibandingkan dengan arus gangguan yang terjadi di sisi jaringan transmisi maupun di sisi beban pada keseluruhan sistem yang lebih luas.

Oleh karena itu, dalam perencanaan pembangunan Gardu Induk Grati analisis arus gangguan ke tanah di sisi Pembangkit dan di sisi Gardu Induk perlu dilakukan. Skripsi ini juga menganalisis pengaruh tahanan titik netral sub-sistem Pembangkit baru terhadap nilai arus gangguan ke tanah. Nilai-nilai arus gangguan dari hasil analisis selanjutnya dapat dimanfaatkan untuk kajian-kajian lain, seperti kajian untuk dasar penentuan proteksi arus lebih dan pentanahan peralatan pada Gardu Induk Grati.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan permasalahan yang ada, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

- 1) Berapa besarnya arus gangguan ke tanah di sisi Pembangkit dan di sisi Gardu Induk pada Sistem Gardu Induk Grati sebelum dan sesudah adanya penambahan Unit Pembangkit baru.

- 2) Bagaimana pengaruh tahanan titik netral terhadap arus gangguan ke tanah untuk sub-sistem (Sistem Pembangkit) baru.

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini membahas analisis arus gangguan ke tanah akibat adanya penambahan Pembangkit baru pada Sistem Gardu Induk Grati dengan batasan sebagai berikut :

- 1) Analisis arus gangguan ke tanah meliputi gangguan satu fasa ke tanah, gangguan dua fasa ke tanah dan gangguan tiga fasa ke tanah di sisi Pembangkit dan di sisi Gardu Induk sebelum dan sesudah penambahan satu Unit Pembangkit baru.
- 2) Analisis dilakukan dengan asumsi bahwa Sakelar Pemutus ke sistem jaringan yang lain dalam keadaan hubung-buka ketika terjadi gangguan.
- 3) Perhitungan dilakukan berdasarkan data-data komponen Sistem Gardu Induk Grati dan data-data desain Unit Pembangkit baru yang diperoleh dari PLTGU Grati.

1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis pengaruh dari penambahan Unit Pembangkit baru terhadap arus gangguan ke tanah yang terjadi dengan cara membandingkan arus gangguan ke tanah sebelum dan sesudah penambahan satu Unit Pembangkit pada Sistem Gardu Induk Grati serta pengaruhnya untuk kondisi pentanahan titik netral sub-sistem yang baru menggunakan tahanan.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penyusunan skripsi ini adalah sebagai berikut :

BAB I Pendahuluan

Memuat latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, dan sistematika penulisan.

BAB II Tinjauan Pustaka

Membahas teori dasar analisis arus gangguan ke tanah pada setiap titik gangguan di Sistem Gardu Induk Grati sebelum dan sesudah adanya penambahan Unit Pembangkit baru.

BAB III Metodologi

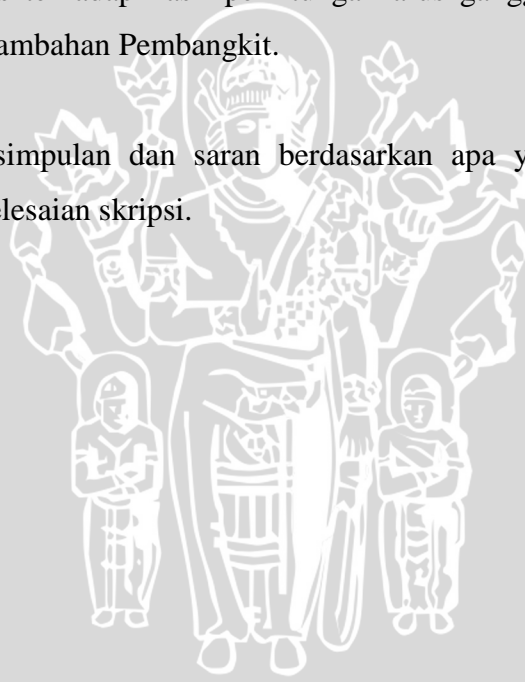
Menjelaskan tentang tahapan penyelesaian skripsi yang meliputi Studi Literatur, Pengumpulan Data, Perhitungan dan Analisis Arus Gangguan Sebelum dan Sesudah Penambahan Pembangkit serta Kesimpulan dan Saran.

BAB IV Perhitungan dan Analisis

Menjelaskan tentang langkah-langkah perhitungan, hasil perhitungan serta analisis terhadap hasil perhitungan arus gangguan sebelum dan sesudah penambahan Pembangkit.

BAB VI Penutup

Memuat kesimpulan dan saran berdasarkan apa yang telah dicapai dalam penyelesaian skripsi.



BAB II DASAR TEORI

2.1 Gangguan ke Tanah pada Sistem Gardu Induk

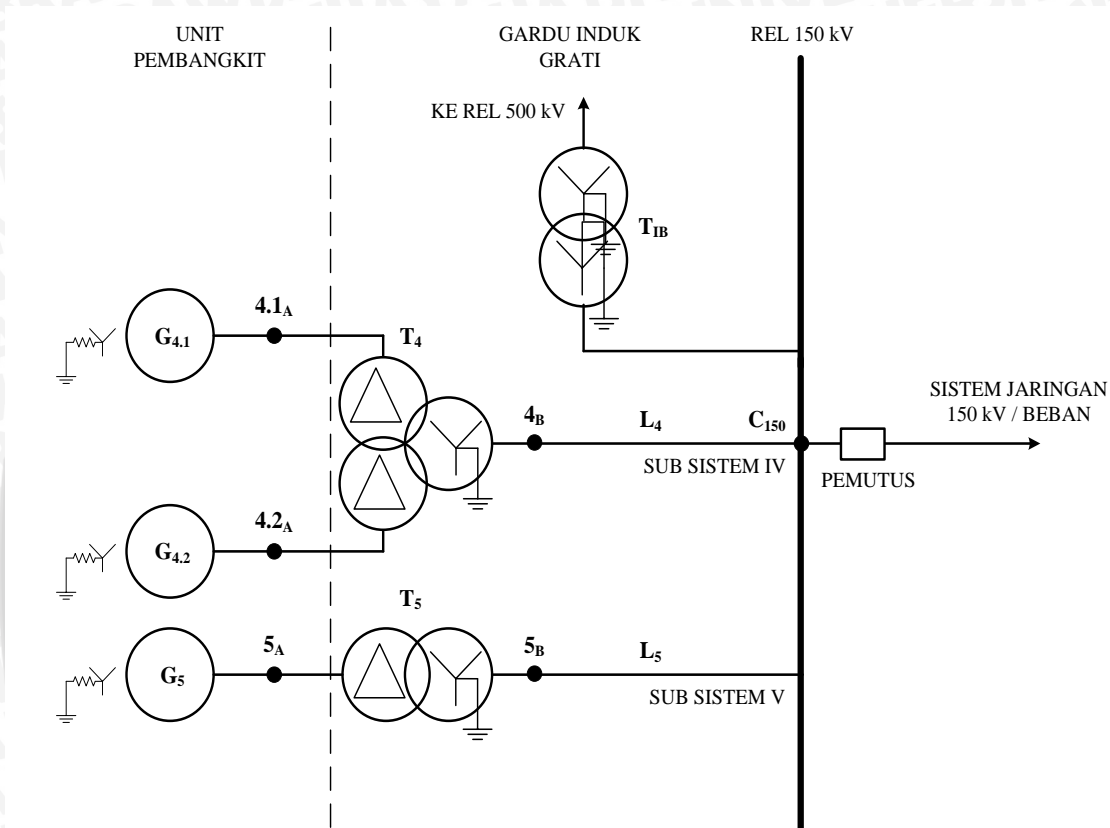
Gangguan tanah merupakan gangguan yang paling sering terjadi pada sistem tenaga dan dapat berakibat fatal pada sistem. Gangguan tanah terjadi akibat adanya tegangan induksi kumparan-kumparan Trafo atau Pembangkit terhadap struktur logam disekitarnya; adanya arus bocor akibat gangguan sistem isolasi (*breakdown isolation*) antar bagian yang bertegangan sehingga terjadi hubung singkat; serta adanya kenaikan tegangan mendadak akibat surja hubung atau surja petir (Hutauruk, 1999 : 120).

Gangguan ke tanah sering terjadi juga pada Sistem Gardu Induk, khususnya pada Sistem Gardu Induk yang dekat dengan Pembangkit seperti pada Gardu Induk Grati. Gangguan pada Sistem Gardu Induk ini biasanya terjadi pada sisi Pembangkit dan pada sisi Gardu Induk. Teori selanjutnya akan membahas analisis arus gangguan ke tanah pada Sistem Gardu Induk Grati sebelum dan sesudah adanya penambahan Pembangkit di setiap titik gangguan dengan jenis gangguan antara lain Gangguan Satu Fasa ke Tanah, Gangguan Dua Fasa ke Tanah, dan Gangguan Tiga Fasa ke Tanah serta membahas analisis pengaruh arus gangguan ke tanah untuk beberapa bentuk pentanahan titik netral pada sistem yang sudah ditambahkan.

2.2 Analisis Arus Gangguan ke Tanah Sebelum Penambahan Pembangkit

Dalam analisis arus gangguan ke tanah, besaran yang dibutuhkan untuk menghitung suatu nilai arus gangguan selain arus dan tegangan adalah reaktansi atau impedansi urutan (Sulasno, 1993 : 165). Setiap komponen pada Sistem Gardu Induk memiliki nilai impedansi urutan yang membentuk rangkaian impedansi urutan sistem. Dengan adanya rangkaian impedansi urutan ini, arus gangguan yang terjadi di suatu titik pada sistem dapat dicari yaitu dengan mendapatkan nilai penyederhanaan impedansi urutannya. Penyederhanaan impedansi urutan inilah yang kemudian akan dimasukkan ke dalam persamaan arus gangguan ke tanah.

- 2) Sub-Sistem II antara lain : $G_{2,1}$ dan $G_{2,2}$ adalah Pembangkit II; T_2 adalah Trafo II; L_2 adalah Saluran II.
- 3) Sub-Sistem III antara lain : G_3 adalah Pembangkit III; T_3 adalah Trafo III; L_3 adalah Saluran III.



Gambar 2.2 Diagram Garis Tunggal Sistem Gardu Induk Grati 150 kV Sebelum Penambahan Pembangkit.

Sumber : PLN Pusat Pelayanan Enjiniring : Bab 6.0, Hal. 7.

Adapun Sistem Gardu Induk 150 kV ditunjukkan pada Gambar 2.2, dimana Rel 150 kV pada Gambar 2.2 dihubungkan ke Rel 500 kV melalui suatu Trafo Penghubung antar Rel atau *Inter Bus Power Transformer*. Komponen-komponen Sistem Gardu Induk pada Gambar 2.2 adalah sebagai berikut :

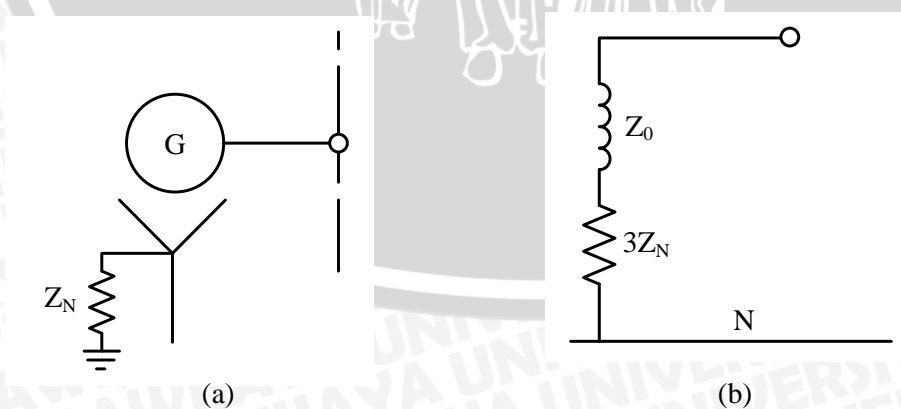
- 1) Sub-Sistem IV antara lain : $G_{4,1}$ dan $G_{4,2}$ adalah Pembangkit IV; T_4 adalah Trafo IV; L_4 adalah Saluran IV.
- 2) Sub-Sistem V antara lain : G_5 adalah Pembangkit V; T_5 adalah Trafo V; L_5 adalah Saluran V.
- 3) T_{IB} adalah Trafo Penghubung antar Rel.

2.2.1 Impedansi Urutan Sebelum Penambahan Pembangkit

Setiap komponen pada Gambar 2.1 dan Gambar 2.2 memiliki tiga impedansi urutan, yaitu impedansi urutan positif (Z_1), impedansi urutan negatif (Z_2) dan impedansi urutan nol (Z_0). Impedansi setiap komponen sistem antara lain sebagai berikut :

- 1) Unit-unit Pembangkit antara lain : G_1 yaitu $Z_{G1(1)}, Z_{G1(2)}, Z_{G1(0)}, Z_{N1}$; $G_{2.1}$ yaitu $Z_{G2.1(1)}, Z_{G2.1(2)}, Z_{G2.1(0)}, Z_{N2.1}$; $G_{2.2}$ yaitu $Z_{G2.2(1)}, Z_{G2.2(2)}, Z_{G2.2(0)}, Z_{N2.2}$; G_3 yaitu $Z_{G3(1)}, Z_{G3(2)}, Z_{G3(0)}, Z_{N3}$; $G_{4.1}$ yaitu $Z_{G4.1(1)}, Z_{G4.1(2)}, Z_{G4.1(0)}, Z_{N4.1}$; $G_{4.2}$ yaitu $Z_{G4.2(1)}, Z_{G4.2(2)}, Z_{G4.2(0)}, Z_{N4.2}$; G_5 yaitu $Z_{G5(1)}, Z_{G5(2)}, Z_{G5(0)}, Z_{N5}$.
- 2) Trafo Daya antara lain : T_1 yaitu $Z_{T1(1)}, Z_{T1(2)}, Z_{T1(0)}$; T_2 yaitu $Z_{HX2}, Z_{HY2}, Z_{XY2}$; T_3 yaitu $Z_{T3(1)}, Z_{T3(2)}, Z_{T3(0)}$; T_4 yaitu $Z_{HX4}, Z_{HY4}, Z_{XY4}$; T_5 yaitu $Z_{T5(1)}, Z_{T5(2)}, Z_{T5(0)}$; T_{IB} yaitu $Z_{TIB(1)}, Z_{TIB(2)},$ dan $Z_{TIB(0)}$.
- 3) Saluran antara lain : L_1 yaitu $Z_{L1(1)}, Z_{L1(2)}, Z_{L1(0)}$; L_2 yaitu $Z_{L2(1)}, Z_{L2(2)}, Z_{L2(0)}$; L_3 yaitu $Z_{L3(1)}, Z_{L3(2)}, Z_{L3(0)}$; L_4 yaitu $Z_{L4(1)}, Z_{L4(2)}, Z_{L4(0)}$; L_5 yaitu $Z_{L5(1)}, Z_{L5(2)}, Z_{L5(0)}$.

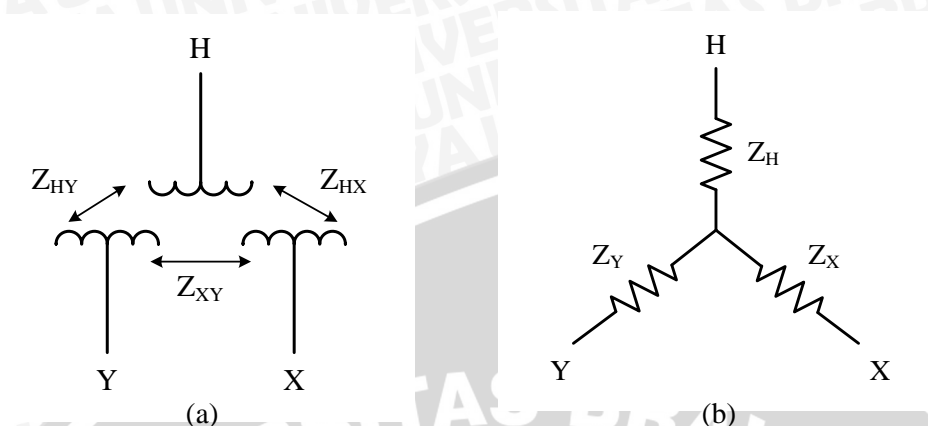
Setiap Unit Pembangkit pada Gambar 2.1 dan Gambar 2.2 memiliki impedansi pentanahan (Z_N) yang menghubungkan titik netral Pembangkit ke tanah. Impedansi Z_N mempengaruhi rangkaian ekivalen impedansi urutan Z_0 Pembangkit sehingga nilainya menjadi $Z_0 + 3Z_N$. Rangkaian ekivalen impedansi urutan nol Pembangkit ditunjukkan oleh Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Pembangkit dengan Z_N : (a) Simbol Diagram Garis, (b) Rangkaian Ekivalen Impedansi Urutan Nol nya.

Sumber : Stevenson, 1993 : 276.

Dua Unit Pembangkit pada Sub-Sistem II dan IV dihubungkan oleh Trafo Daya tiga belitan sebelum terhubung ke sistem jaringan 500 kV.



Gambar 2.4 Trafo Daya Tiga Belitan : (a) Diagram Belitan, (b) Rangkaian Ekuivalen Impedansi Urutan.

Sumber : Paul M. Anderson, 1995 : 237.

Penentuan impedansi urutan pada Trafo Daya tiga belitan ditunjukkan pada Gambar 2.4. Hal ini berbeda dengan Trafo Daya dua belitan dimana penentuan impedansi urutannya diambil dari reaktansi Trafo itu sendiri. Sedangkan impedansi urutan pada Trafo Daya tiga belitan ditentukan berdasarkan persamaan 2.1 – 2.3 (Paul M. Anderson, 1995 : 239).

$$Z_H = \frac{1}{2}(Z_{HX} + Z_{HY} - Z_{XY}) \tag{2.1}$$

$$Z_X = \frac{1}{2}(Z_{HX} + Z_{XY} - Z_{HY}) \tag{2.2}$$

$$Z_Y = \frac{1}{2}(Z_{HY} + Z_{XY} - Z_{HX}) \tag{2.3}$$

dimana :

- Z_{XY} = Impedansi antar belitan tegangan rendah.
- Z_{HX}, Z_{HY} = Impedansi antara belitan 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).

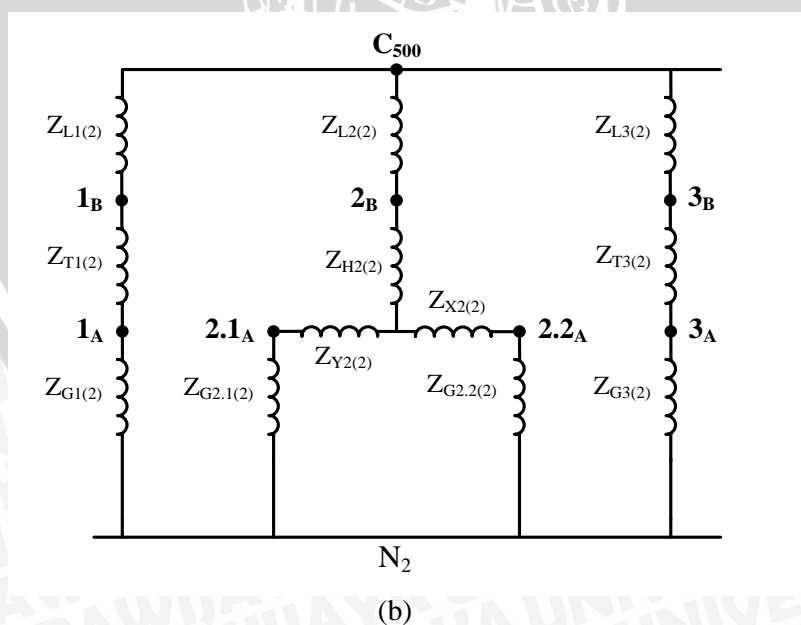
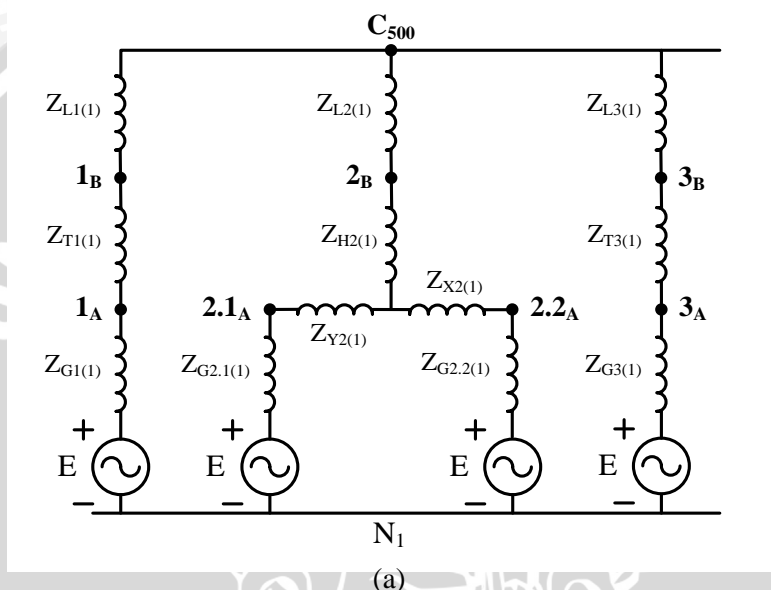
Impedansi $Z_H, Z_X,$ dan Z_Y berlaku untuk impedansi urutan positif, urutan negatif dan urutan nol nya.



Titik-titik pada Gambar 2.1 dan Gambar 2.2 merupakan titik-titik dimana gangguan terjadi. Titik-titik tersebut antara lain :

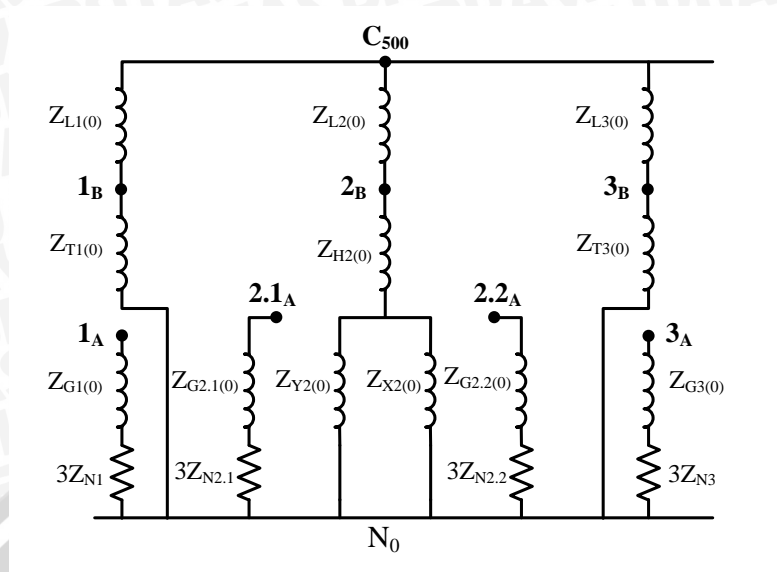
- 1) 1_A , 2.1_A , 2.2_A , 3_A , 4.1_A , 4.2_A , dan 5_A adalah terminal keluaran Pembangkit; 1_B , 2_B , 3_B , 4_B , dan 5_B adalah terminal keluaran Trafo.
- 2) C_{500} dan C_{150} adalah Rel / Busbar.

Diagram garis tunggal Gambar 2.1 dapat disusun menjadi rangkaian impedansi urutan yang ditunjukkan pada Gambar 2.5 (Sulasno, 1993 : 174 – 175).



Gambar 2.5 Rangkaian Impedansi Urutan untuk Gambar 2.1 : (a) Urutan Positif dan (b) Urutan Negatif .

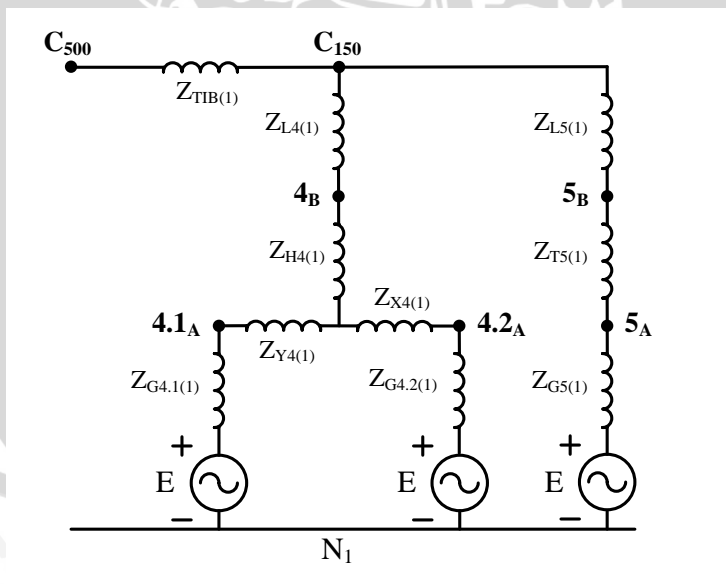
Sumber : Sulasno, 1993 : 177 dan 179.



(c)

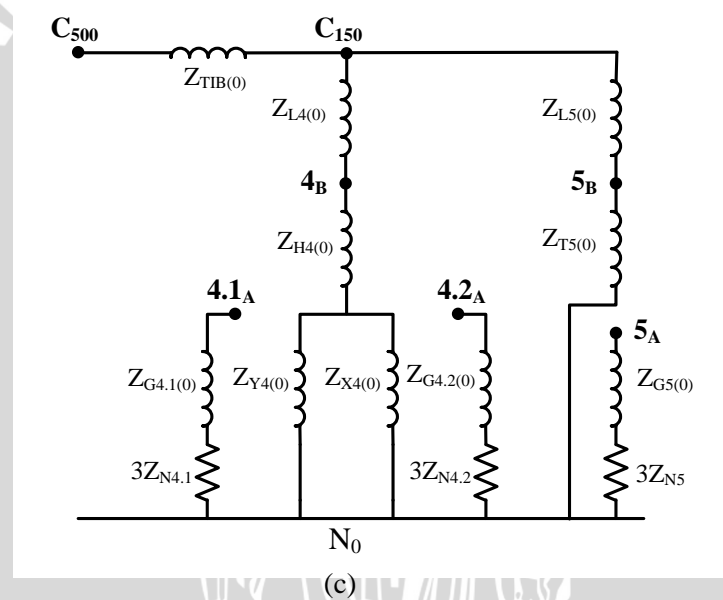
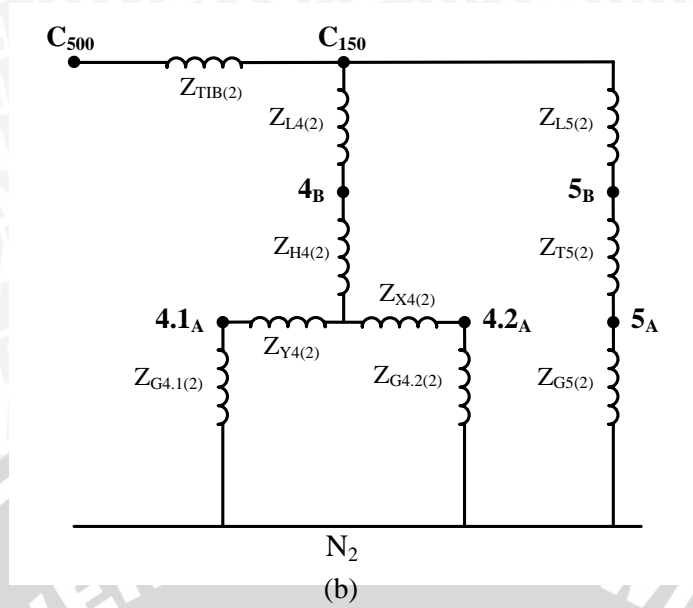
Gambar 2.5 (c) Rangkaian Impedansi Urutan Nol untuk Gambar 2.1.
 Sumber : Sulasno, 1993 : 181.

Adapun rangkaian impedansi urutan untuk Diagram Garis Tunggal Sistem 150 kV (Gambar 2.2) ditunjukkan pada Gambar 2.7. Rangkaian impedansi ini tersambung dengan rangkaian impedansi urutan Sistem 500 kV (Gambar 2.5).



(a)

Gambar 2.6 (a) Rangkaian Impedansi Urutan Positif untuk Gambar 2.2.
 Sumber : Sulasno, 1993 : 177.



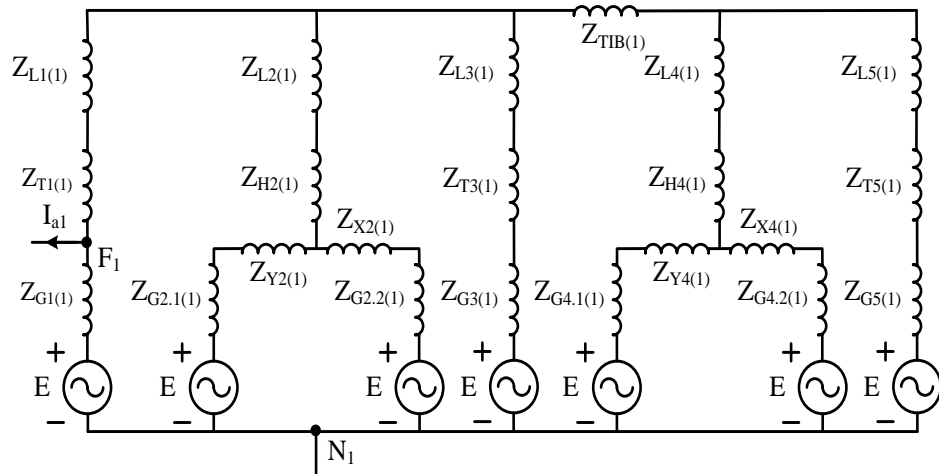
Gambar 2.6 Rangkaian Impedansi Urutan untuk Gambar 2.2 : (b) Urutan Negatif dan (c) Urutan Nol.

Sumber : Sulasno, 1993 : 179 dan 181.

Gambar 2.5 dan Gambar 2.6 menunjukkan rangkaian setara dari diagram garis tunggal Sistem Gardu Induk Grati. Pembangkit pada Sistem Gardu Induk hanya mempunyai tegangan internal urutan positif, karena pembangkit tersebut dirancang untuk membangkitkan tegangan yang seimbang (Stevenson, 1993 : 278). Karena impedansi urutan positif dan negatif sama dalam sistem simetris statis, maka rangkaian impedansi urutan negatif diperoleh dengan cara

mengabaikan emf-nya. Pengabaian emf ini didasarkan pada anggapan bahwa tegangan yang dibangkitkan adalah seimbang dan bahwa tidak ada tegangan urutan negatif yang diimbaskan dari sumber luar. Rangkaian impedansi urutan nol terbentuk karena titik netral Sistem Gardu Induk ditanahkan sehingga nilai-nilai tahanan pentanahan pada titik netral tersebut berpengaruh pada rangkaian ini. Nilai impedansi urutan ekivalen pada setiap titik gangguan dicari dengan menggabungkan rangkaian Sistem 500 kV dan Sistem 150 kV (Gambar 2.5 dan Gambar 2.6). Sebagai contoh kasus, ketika gangguan F terjadi pada titik 1_A, penentuan impedansi urutan ekivalennya ditunjukkan pada Gambar 2.7 – 2.9.

1) Impedansi Urutan Positif (Z_1)



(a)

Gambar 2.7 (a) Rangkaian Impedansi Urutan Z_1 untuk Gangguan pada Titik 1_A.

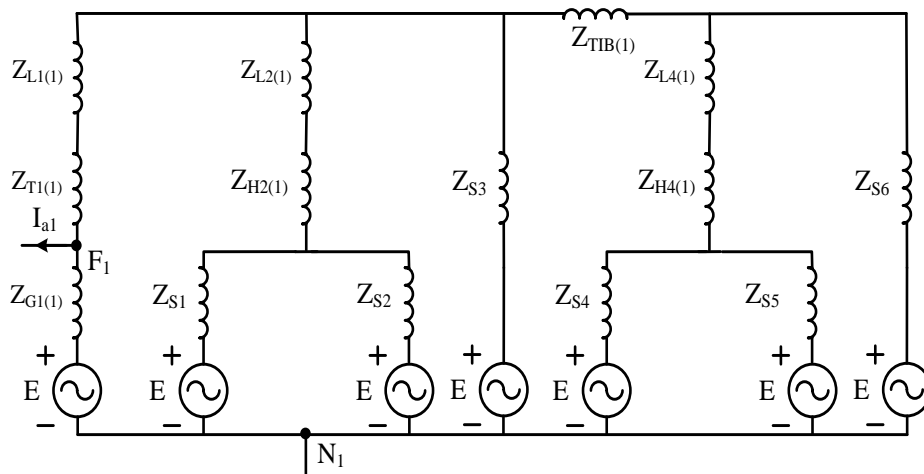
Sumber : Sulasno, 1993 : 177 – 178.

Gambar 2.7 (a) menunjukkan rangkaian impedansi urutan positif ketika gangguan terjadi. Impedansi – impedansi urutan yang dapat diseri pada Gambar 2.7 (a) disederhanakan sehingga menjadi rangkaian pada Gambar 2.7 (b) dengan persamaan :

$$Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)} = Z_{S1} ; Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)} = Z_{S4}$$

$$Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)} = Z_{S2} ; Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)} = Z_{S5}$$

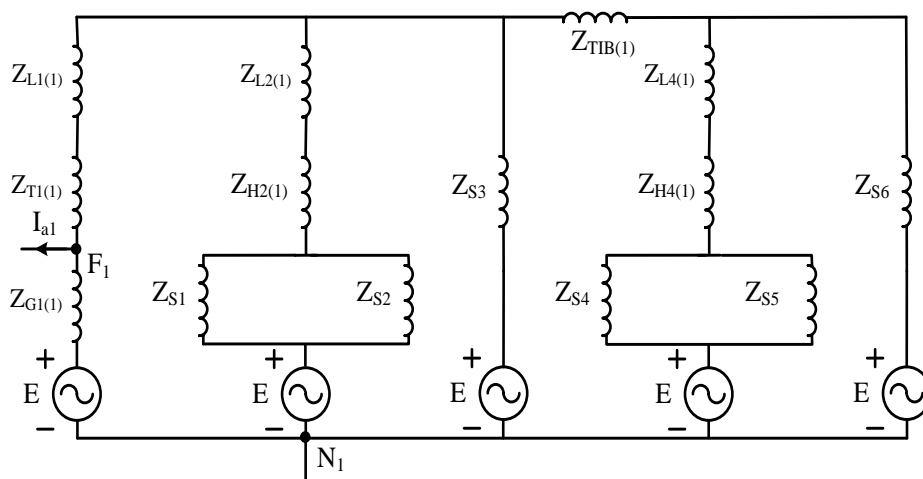
$$Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)} = Z_{S3} ; Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)} = Z_{S6}$$



(b)

Gambar 2.7 (b) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 2.7 (a).
 Sumber : Sulasno, 1993 : 177 – 178.

Dalam menghitung impedansi urutan, tegangan dan daya dasar sistem perlu ditetapkan untuk memudahkan perhitungan. Karena tegangan dasar pada sistem sama dan diasumsikan bahwa tidak ada tegangan dari sistem lain yang berimbas, maka Gambar 2.7 (b) dapat disederhanakan menjadi Gambar 2.7 (c).



(c)

Gambar 2.7 (c) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 2.7 (b).
 Sumber : Sulasno, 1993 : 177 – 178.

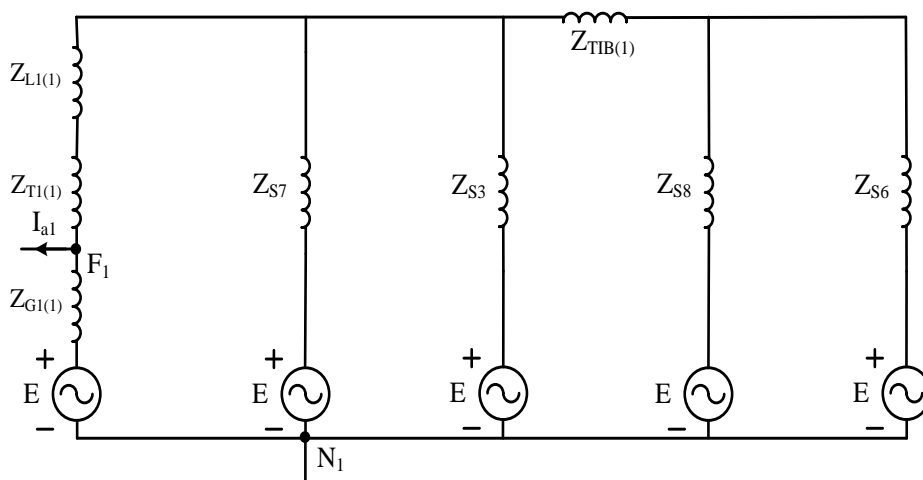
Rangkaian pada Gambar 2.7 (c) disederhanakan dengan persamaan :

$$Z_{S1} // Z_{S2} = Z_{P1} ; Z_{S4} // Z_{S5} = Z_{P2}$$

Selanjutnya, Impedansi Z_{P1} dan Z_{P2} masing-masing disederhanakan dengan persamaan :

$$Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)} = Z_{S7} ; Z_{P2} + Z_{H4(1)} + Z_{L4(1)} = Z_{S8}$$

Hasil penyederhanaan di atas ditunjukkan pada Gambar 2.7 (d).



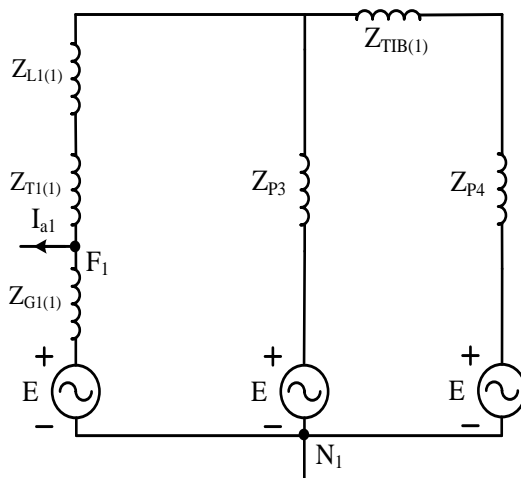
(d)

Gambar 2.7 (d) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 2.7 (c).

Sumber : Sulasno, 1993 : 177 – 178.

Dengan menganggap bahwa tegangan setiap cabang pada rangkaian sama, Gambar 2.7 (d) dapat disederhanakan menjadi Gambar 2.7 (e) dengan persamaan :

$$Z_{S3} // Z_{S7} = Z_{P3} ; Z_{S6} // Z_{S8} = Z_{P4}$$



(e)

Gambar 2.7 (e) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 2.7 (d).

Sumber : Sulasno, 1993 : 177 – 178.

Rangkaian pada Gambar 2.7 (e) disederhanakan dengan persamaan :

$$Z_{P4} + Z_{TIB(1)} = Z_{S9}$$

Kemudian, Z_{S9} disederhanakan dengan Z_{P3} dengan persamaan :

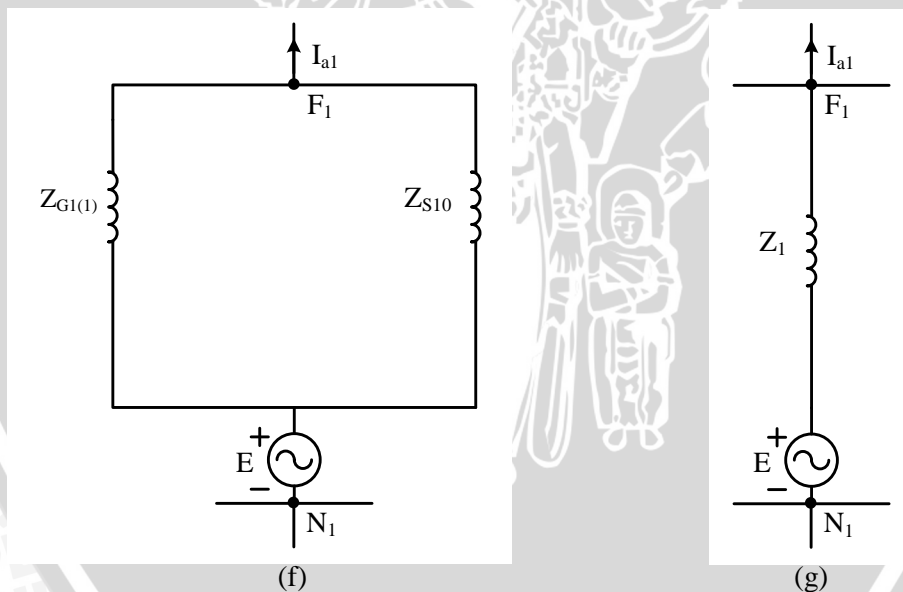
$$Z_{P3} // Z_{S9} = Z_{P5}$$

Selanjutnya, Z_{P5} disederhanakan dengan $Z_{T1(1)}$ dengan persamaan :

$$Z_{P5} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)} = Z_{S10}$$

Hasil penyederhanaannya ditunjukkan pada Gambar 2.7 (f). Dengan cara yang sama, rangkaian pada Gambar 2.7 (f) dapat disederhanakan menjadi rangkaian pada Gambar 2.7 (g). Gambar 2.7 (g) menunjukkan rangkaian pengganti / ekivalen untuk mendapatkan nilai impedansi urutan positif (Z_1). Dengan demikian, Z_1 diperoleh dengan persamaan :

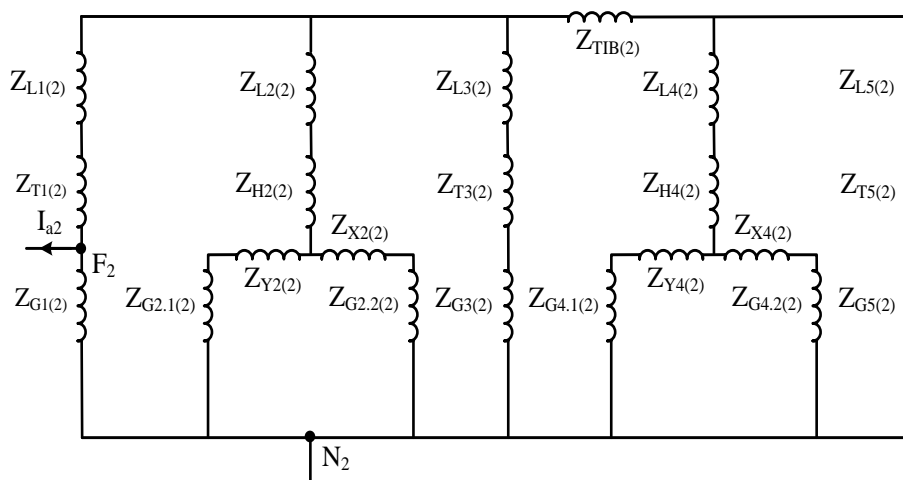
$$Z_1 = Z_{G1(1)} // Z_{S10}$$



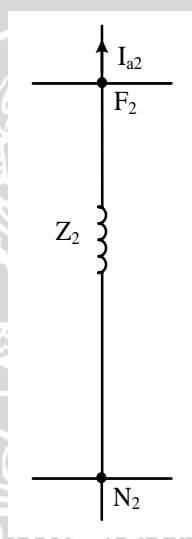
Gambar 2.7 (f) Rangkaian Penyederhanaan dari Gambar 2.7 (e) dan (g) Rangkaian Ekivalen Impedansi Z_1 untuk Gangguan pada Titik 1_A .

Sumber : Sulasno, 1993 : 177 – 178.

2) Impedansi Urutan Negatif (Z_2)



(a)



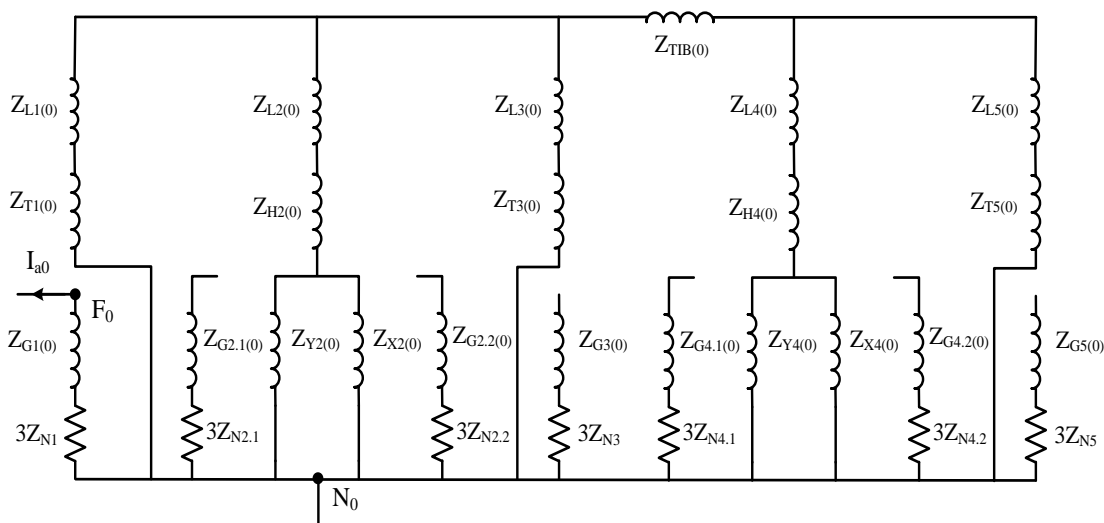
(b)

Gambar 2.8 (a) Rangkaian Impedansi Urutan Z_2 untuk Gangguan pada Titik 1_A dan (b) Rangkaian Ekuivalen Impedansi Z_2 .
 Sumber : Sulasno, 1993 : 179 – 180.

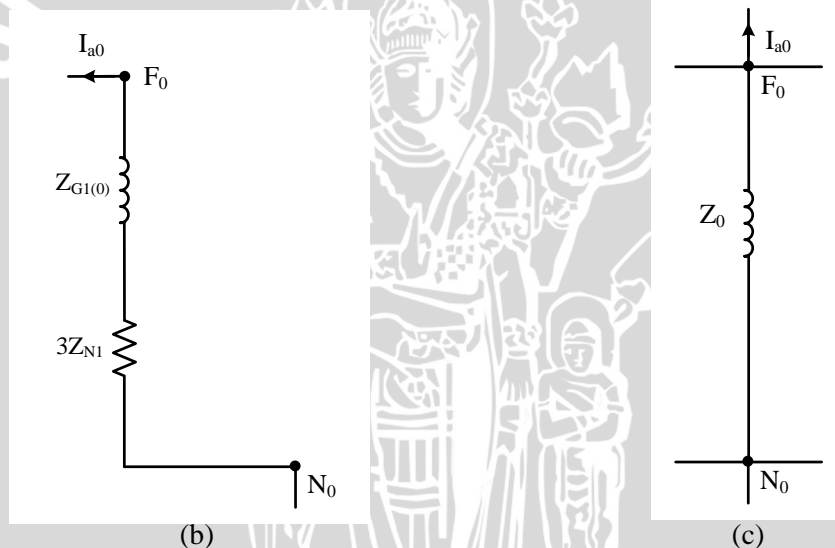
Gambar 2.8 menunjukkan rangkaian impedansi urutan negatif (Z_2) ketika gangguan terjadi pada titik 1_A . Pada Gambar 2.8, langkah penyederhanan rangkaian (a) untuk menjadi rangkaian (b) sama dengan langkah untuk menentukan impedansi urutan Z_1 .



3) Impedansi Urutan Nol (Z_0)



(a)



(b)

(c)

Gambar 2.9 Rangkaian Impedansi Urutan Z_0 untuk Gangguan pada Titik 1_A dan Penyederhanaannya.

Sumber : Sulasno, 1993 : 181.

Gambar 2.9 menunjukkan rangkaian impedansi urutan nol ketika gangguan terjadi pada titik 1_A . Karena komponen impedansi Pembangkit 1 ($3Z_{N1}$ dan $Z_{G1(0)}$) pada rangkaian terbuka, maka hanya komponen tersebut yang mempengaruhi nilai impedansi Z_0 . Sehingga impedansi urutan nol dapat dicari dengan persamaan :

$$Z_0 = 3Z_{N1} + Z_{G1(0)}$$

Secara rinci perhitungan nilai impedansi urutan pada setiap titik gangguan, yaitu titik 1_A, 1_B, 2.1_A, 2.2_A, 2_B, 3_A, 3_B, dan C sebelum penambahan Pembangkit dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Perhitungan Impedansi Urutan Z_1 , Z_2 , Z_0 di Setiap Titik Gangguan Pada Sistem Gardu Induk Grati Sebelum Penambahan Pembangkit.

No	Titik Gangguan	Impedansi Urutan (Z_1 , Z_2 , Z_0)
1	1 _A	$Z_{S1} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)}$; $Z_{S2} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)}$; $Z_{S3} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)}$; $Z_{S4} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)}$; $Z_{S5} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)}$; $Z_{S6} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)}$ $Z_{P1} = Z_{S1} // Z_{S2}$; $Z_{P2} = Z_{S4} // Z_{S5}$; $Z_{S7} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)}$; $Z_{S8} = Z_{P2} + Z_{H4(1)} + Z_{L4(1)}$ $Z_{P3} = Z_{S7} // Z_{S3}$; $Z_{P4} = Z_{S8} // Z_{S6}$; $Z_{S9} = Z_{TIB(1)} + Z_{P4}$; $Z_{P5} = Z_{P3} // Z_{S9}$; $Z_{S10} = Z_{T1(1)} + Z_{P5} + Z_{L1(1)}$ Sehingga : $Z_1 = Z_{G1(1)} // Z_{S10}$
		$Z_2 = Z_1$
		$Z_0 = 3Z_{N1} + Z_{G1(0)}$
2	2.1 _A	$Z_{S1} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)}$; $Z_{S2} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)}$; $Z_{S3} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)}$; $Z_{S4} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)}$; $Z_{S5} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)}$; $Z_{S6} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)}$ $Z_{P1} = Z_{S1} // Z_{S3} // Z_{S9}$; $Z_{P2} = Z_{S4} // Z_{S5}$; $Z_{S7} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)}$; $Z_{S8} = Z_{P2} + Z_{H4(1)} + Z_{L4(1)}$ $Z_{P3} = Z_{S7} // Z_{S2}$; $Z_{P4} = Z_{S8} // Z_{S6}$; $Z_{S9} = Z_{TIB(1)} + Z_{P4}$; $Z_{S10} = Z_{Y2(1)} + Z_{P3}$ Sehingga : $Z_1 = Z_{G2.1(1)} // Z_{S10}$
		$Z_2 = Z_1$
		$Z_0 = 3Z_{N2.1} + Z_{G2.1(0)}$
3	2.2 _A	$Z_{S1} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)}$; $Z_{S2} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)}$; $Z_{S3} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)}$; $Z_{S4} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)}$; $Z_{S5} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)}$; $Z_{S6} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)}$ $Z_{P1} = Z_{S1} // Z_{S3} // Z_{S9}$; $Z_{P2} = Z_{S4} // Z_{S5}$; $Z_{S7} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)}$; $Z_{S8} = Z_{P2} + Z_{H4(1)} + Z_{L4(1)}$ $Z_{P3} = Z_{S7} // Z_{S2}$; $Z_{P4} = Z_{S8} // Z_{S6}$; $Z_{S9} = Z_{TIB(1)} + Z_{P4}$; $Z_{S10} = Z_{X2(1)} + Z_{P3}$ Sehingga : $Z_1 = Z_{G2.2(1)} // Z_{S10}$
		$Z_2 = Z_1$
		$Z_0 = 3Z_{N2.2} + Z_{G2.2(0)}$

Lanjutan Tabel 2.1.

No	Titik Gangguan	Impedansi Urutan (Z_1, Z_2, Z_0)
4	3 _A	$Z_{S1} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)}; Z_{S2} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)};$ $Z_{S3} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)}; Z_{S4} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)};$ $Z_{S5} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)}; Z_{S6} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)}$ $Z_{P1} = Z_{S2} // Z_{S3}; Z_{P2} = Z_{S4} // Z_{S5};$ $Z_{S7} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)}; Z_{S8} = Z_{P2} + Z_{H4(1)} + Z_{L4(1)}$ $Z_{P3} = Z_{S7} // Z_{S1}; Z_{P4} = Z_{S8} // Z_{S6}; Z_{P5} = Z_{P3} // Z_{S9};$ $Z_{S9} = Z_{TIB(1)} + Z_{P4}; Z_{S10} = Z_{T3(1)} + Z_{P5} + Z_{L3(1)}$ Sehingga : $Z_1 = Z_{G3(1)} // Z_{S10}$
		$Z_2 = Z_1$
		$Z_0 = 3Z_{N3} + Z_{G3(0)}$
5	4.1 _A	$Z_{S1} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)}; Z_{S2} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)};$ $Z_{S3} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)}; Z_{S4} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)};$ $Z_{S5} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)}; Z_{S6} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)}$ $Z_{P1} = Z_{S2} // Z_{S3}; Z_{P2} = Z_{S1} // Z_{S4} // Z_{S7};$ $Z_{S7} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)}; Z_{S8} = Z_{TIB(1)} + Z_{P2};$ $Z_{P3} = Z_{S8} // Z_{S6}; Z_{P4} = Z_{S9} // Z_{S5};$ $Z_{S9} = Z_{H4(1)} + Z_{P3} + Z_{L4(1)}; Z_{S10} = Z_{Y4(1)} + Z_{P4}$ Sehingga : $Z_1 = Z_{G4.1(1)} // Z_{S10}$
		$Z_2 = Z_1$
		$Z_0 = 3Z_{N4.1} + Z_{G4.1(0)}$
6	4.2 _A	$Z_{S1} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)}; Z_{S2} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)};$ $Z_{S3} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)}; Z_{S4} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)};$ $Z_{S5} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)}; Z_{S6} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)}$ $Z_{P1} = Z_{S2} // Z_{S3}; Z_{P2} = Z_{S1} // Z_{S4} // Z_{S7};$ $Z_{S7} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)}; Z_{S8} = Z_{TIB(1)} + Z_{P2};$ $Z_{P3} = Z_{S8} // Z_{S6}; Z_{P4} = Z_{S9} // Z_{S5};$ $Z_{S9} = Z_{H4(1)} + Z_{P3} + Z_{L4(1)}; Z_{S10} = Z_{X4(1)} + Z_{P4}$ Sehingga : $Z_1 = Z_{G4.2(1)} // Z_{S10}$
		$Z_2 = Z_1$
		$Z_0 = 3Z_{N4.2} + Z_{G4.2(0)}$
7	5 _A	$Z_{S1} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)}; Z_{S2} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)};$ $Z_{S3} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)}; Z_{S4} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)};$ $Z_{S5} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)}; Z_{S6} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)}; Z_{P1} = Z_{S2} // Z_{S3};$ $Z_{P2} = Z_{S1} // Z_{S4} // Z_{S7}; Z_{S7} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)};$ $Z_{S8} = Z_{TIB(1)} + Z_{P2}; Z_{P3} = Z_{S5} // Z_{S6}; Z_{P4} = Z_{S9} // Z_{S8};$ $Z_{S9} = Z_{H4(1)} + Z_{P3} + Z_{L4(1)}; Z_{S10} = Z_{T5(1)} + Z_{P4} + Z_{L5(1)}$ Sehingga : $Z_1 = Z_{G5(1)} // Z_{S10}$
		$Z_2 = Z_1$
		$Z_0 = 3Z_{N5} + Z_{G5(0)}$

Lanjutan Tabel 2.1.

No	Titik Gangguan	Impedansi Urutan (Z_1, Z_2, Z_0)
7	5 _A	$Z_2 = Z_1$
		$Z_0 = 3Z_{N5} + Z_{G5(0)}$
8	1 _B	$Z_{S1} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)}; Z_{S2} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)};$ $Z_{S3} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)}; Z_{S4} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)};$ $Z_{S5} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)}; Z_{S6} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)}$ $Z_{P1} = Z_{S1} // Z_{S2}; Z_{P2} = Z_{S4} // Z_{S5};$ $Z_{S7} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)}; Z_{S8} = Z_{P2} + Z_{H4(1)} + Z_{L4(1)}$ $Z_{P3} = Z_{S7} // Z_{S3}; Z_{P4} = Z_{S8} // Z_{S6}; Z_{S9} = Z_{TIB(1)} + Z_{P4};$ $Z_{P5} = Z_{P3} // Z_{S9}; Z_{S10} = Z_{P5} + Z_{L1(1)}$ Sehingga : $Z_1 = (Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)}) // Z_{S10}$
		$Z_2 = Z_1$
		$Z_{P1} = Z_{Y2(0)} // Z_{X2(0)}; Z_{P2} = Z_{Y4(0)} // Z_{X4(0)};$ $Z_{S1} = Z_{H2(0)} + Z_{P1} + Z_{L2(0)}; Z_{S2} = Z_{H4(0)} + Z_{P2} + Z_{L4(0)}$ $Z_{P3} = Z_{S1} // (Z_{T3(0)} + Z_{L3(0)});$ $Z_{P4} = Z_{S2} // (Z_{T5(0)} + Z_{L5(0)}); Z_{S3} = Z_{TIB(0)} + Z_{P4};$ $Z_{P5} = Z_{S3} // Z_{P3}; Z_{S4} = Z_{L1(0)} + Z_{P5}$ Sehingga : $Z_0 = Z_{S4} // Z_{T1(0)}$
9	2 _B	$Z_{S1} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)};$ $Z_{S2} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)}; Z_{S3} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)};$ $Z_{S4} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)}; Z_{S5} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)};$ $Z_{S6} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)}; Z_{S7} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)};$ $Z_{P1} = Z_{S2} // Z_{S3}; Z_{P2} = Z_{S5} // Z_{S6};$ $Z_{S8} = Z_{P1} + Z_{H2(1)}; Z_{S9} = Z_{P2} + Z_{H4(1)} + Z_{L4(1)}$ $Z_{P3} = Z_{S7} // Z_{S9}; Z_{S10} = Z_{P3} + Z_{TIB};$ $Z_{P4} = Z_{S1} // Z_{S4} // Z_{S10};$ Sehingga : $Z_1 = Z_{S8} // (Z_{P4} + Z_{L2(1)})$
		$Z_2 = Z_1$
		$Z_{P1} = Z_{Y2(0)} // Z_{X2(0)}; Z_{P2} = Z_{Y4(0)} // Z_{X4(0)};$ $Z_{S1} = Z_{H2(0)} + Z_{P1}; Z_{S2} = Z_{H4(0)} + Z_{P2} + Z_{L4(0)}$ $Z_{P3} = Z_{S2} // (Z_{T5(0)} + Z_{L5(0)}); Z_{S3} = Z_{TIB(0)} + Z_{P3};$ $Z_{P4} = Z_{S3} // (Z_{T1(0)} + Z_{L1(0)}) // (Z_{T3(0)} + Z_{L3(0)});$ $Z_{S4} = Z_{L2(0)} + Z_{P4}$ Sehingga : $Z_0 = Z_{S4} // Z_{S1}$
10	3 _B	$Z_{S1} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)}; Z_{S2} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)};$ $Z_{S3} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)}; Z_{S4} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)};$ $Z_{S5} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)}; Z_{S6} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)}$ $Z_{P1} = Z_{S1} // Z_{S2}; Z_{P2} = Z_{S4} // Z_{S5};$

Lanjutan Tabel 2.1.

No	Titik Gangguan	Impedansi Urutan (Z_1, Z_2, Z_0)
10	3 _B	$Z_{S7} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)}$; $Z_{S8} = Z_{P2} + Z_{H4(1)} + Z_{L4(1)}$ $Z_{P3} = Z_{S7} // Z_{S3}$; $Z_{P4} = Z_{S8} // Z_{S6}$; $Z_{S9} = Z_{TIB(1)} + Z_{P4}$; $Z_{P5} = Z_{P3} // Z_{S9}$; $Z_{S10} = Z_{P5} + Z_{L3(1)}$ Sehingga : $Z_1 = (Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)}) // Z_{S10}$
		$Z_2 = Z_1$ $Z_{P1} = Z_{Y2(0)} // Z_{X2(0)}$; $Z_{P2} = Z_{Y4(0)} // Z_{X4(0)}$; $Z_{S1} = Z_{H2(0)} + Z_{P1} + Z_{L2(0)}$; $Z_{S2} = Z_{H4(0)} + Z_{P2} + Z_{L4(0)}$ $Z_{P3} = Z_{S1} // (Z_{T1(0)} + Z_{L1(0)})$; $Z_{P4} = Z_{S2} // (Z_{T5(0)} + Z_{L5(0)})$; $Z_{S3} = Z_{TIB(0)} + Z_{P4}$; $Z_{P5} = Z_{S3} // Z_{P3}$; $Z_{S4} = Z_{L3(0)} + Z_{P5}$ Sehingga : $Z_0 = Z_{S4} // Z_{T3(0)}$
11	4 _B	$Z_{S1} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)}$; $Z_{S2} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)}$; $Z_{S3} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)}$; $Z_{S4} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)}$; $Z_{S5} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)}$; $Z_{S6} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)}$; $Z_{S7} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)}$; $Z_{P1} = Z_{S2} // Z_{S3}$; $Z_{P2} = Z_{S5} // Z_{S6}$; $Z_{S8} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)}$; $Z_{S9} = Z_{P2} + Z_{H4(1)}$ $Z_{P3} = Z_{S1} // Z_{S4} // Z_{S8}$; $Z_{S10} = Z_{P3} + Z_{TIB}$; $Z_{P4} = Z_{S7} // Z_{S10}$; Sehingga : $Z_1 = Z_{S9} // (Z_{P4} + Z_{L4(1)})$
		$Z_2 = Z_1$ $Z_{P1} = Z_{Y2(0)} // Z_{X2(0)}$; $Z_{P2} = Z_{Y4(0)} // Z_{X4(0)}$; $Z_{S1} = Z_{H2(0)} + Z_{P1} + Z_{L2(0)}$; $Z_{S2} = Z_{H4(0)} + Z_{P2}$ $Z_{P3} = Z_{S1} // (Z_{T1(0)} + Z_{L1(0)}) // (Z_{T3(0)} + Z_{L3(0)})$; $Z_{S3} = Z_{TIB(0)} + Z_{P3}$; $Z_{P4} = Z_{S3} // (Z_{T5(0)} + Z_{L5(0)})$; $Z_{S4} = Z_{L4(0)} + Z_{P4}$ Sehingga : $Z_0 = Z_{S4} // Z_{S2}$
12	5 _B	$Z_{S1} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)}$; $Z_{S2} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)}$; $Z_{S3} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)}$; $Z_{S4} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)}$; $Z_{S5} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)}$; $Z_{S6} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)}$ $Z_{P1} = Z_{S1} // Z_{S2}$; $Z_{P2} = Z_{S4} // Z_{S5}$; $Z_{S7} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)}$; $Z_{S8} = Z_{P2} + Z_{H4(1)} + Z_{L4(1)}$ $Z_{P3} = Z_{S7} // Z_{S3} // Z_{S6}$; $Z_{S9} = Z_{TIB(1)} + Z_{P3}$; $Z_{P4} = Z_{S8} // Z_{S9}$; $Z_{S10} = Z_{P4} + Z_{L5(1)}$ Sehingga : $Z_1 = (Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)}) // Z_{S10}$
		$Z_2 = Z_1$

Lanjutan Tabel 2.1.

No	Titik Gangguan	Impedansi Urutan (Z_1, Z_2, Z_0)
12	5 _B	$Z_{P1} = Z_{Y2(0)} // Z_{X2(0)}; Z_{P2} = Z_{Y4(0)} // Z_{X4(0)};$ $Z_{S1} = Z_{H2(0)} + Z_{P1} + Z_{L2(0)}; Z_{S2} = Z_{H4(0)} + Z_{P2} + Z_{L4(0)}$ $Z_{P3} = Z_{S1} // (Z_{T1(0)} + Z_{L1(0)}) // (Z_{T3(0)} + Z_{L3(0)});$ $Z_{S3} = Z_{TIB(0)} + Z_{P3}; Z_{P4} = Z_{S3} // Z_{S2}; Z_{S4} = Z_{L5(0)} + Z_{P4}$ Sehingga : $Z_0 = Z_{S4} // Z_{T5(0)}$
13	C ₅₀₀	$Z_{S1} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)}; Z_{S2} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)};$ $Z_{S3} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)}; Z_{S4} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)};$ $Z_{S5} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)}; Z_{S6} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)};$ $Z_{S7} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)}$ $Z_{P1} = Z_{S2} // Z_{S3}; Z_{P2} = Z_{S1} // Z_{S4} // Z_{S8};$ $Z_{S8} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)}; Z_{S9} = Z_{H4(1)} + Z_{P3} + Z_{L4(1)}$ $Z_{P3} = Z_{S5} // Z_{S6}; Z_{P4} = Z_{S9} // Z_{S7};$ $Z_{S10} = Z_{TIB(1)} + Z_{P4};$ Sehingga : $Z_1 = Z_{S9} // Z_{P2}$
		$Z_2 = Z_1$
		$Z_{P1} = Z_{Y2(0)} // Z_{X2(0)}; Z_{P2} = Z_{Y4(0)} // Z_{X4(0)};$ $Z_{S1} = Z_{H2(0)} + Z_{P1} + Z_{L2(0)}; Z_{S2} = Z_{H4(0)} + Z_{P2} + Z_{L4(0)};$ $Z_{P3} = (Z_{T1(0)} + Z_{L1(0)}) // Z_{S1} // (Z_{T3(0)} + Z_{L3(0)});$ $Z_{P4} = Z_{S2} // (Z_{T5(0)} + Z_{L5(0)}); Z_{S3} = Z_{TIB(0)} + Z_{P4};$ Sehingga : $Z_0 = Z_{S3} // Z_{P3}$
14	C ₁₅₀	$Z_{S1} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)}; Z_{S2} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)};$ $Z_{S3} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)}; Z_{S4} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)};$ $Z_{S5} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)}; Z_{S6} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)};$ $Z_{S7} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)}$ $Z_{P1} = Z_{S2} // Z_{S3}; Z_{P2} = Z_{S1} // Z_{S4} // Z_{S8};$ $Z_{S8} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)}; Z_{S9} = Z_{H4(1)} + Z_{P3} + Z_{L4(1)};$ $Z_{P3} = Z_{S5} // Z_{S6}; Z_{P4} = Z_{S9} // Z_{S7};$ $Z_{S10} = Z_{TIB(1)} + Z_{P2};$ Sehingga : $Z_1 = Z_{S10} // Z_{P4}$
		$Z_2 = Z_1$
		$Z_{P1} = Z_{Y2(0)} // Z_{X2(0)}; Z_{P2} = Z_{Y4(0)} // Z_{X4(0)};$ $Z_{S1} = Z_{H2(0)} + Z_{P1} + Z_{L2(0)}; Z_{S2} = Z_{H4(0)} + Z_{P2} + Z_{L4(0)};$ $Z_{P3} = (Z_{T1(0)} + Z_{L1(0)}) // Z_{S1} // (Z_{T3(0)} + Z_{L3(0)});$ $Z_{P4} = Z_{S2} // (Z_{T5(0)} + Z_{L5(0)}); Z_{S3} = Z_{TIB(0)} + Z_{P3};$ Sehingga : $Z_0 = Z_{S3} // Z_{P4}$

Sumber : Hasil Perhitungan.

- 2) T_6 adalah Trafo Daya VI, terdiri dari impedansi urutan $Z_{T6(1)}$, $Z_{T6(2)}$ dan $Z_{T6(0)}$.
- 3) L_6 adalah Saluran VI, terdiri dari impedansi urutan $Z_{L6(1)}$, $Z_{L6(2)}$ dan $Z_{L6(0)}$.

Analisis arus gangguan ke tanah pada setiap titik gangguan untuk diagram garis Gambar 2.10 akan dilakukan dengan dua kondisi, yaitu :

- 1) Titik netral sistem baru (Trafo T_6) ditanahkan langsung. Untuk sistem besar seperti Sistem Gardu Induk Grati maka Trafo menggunakan hubungan $\Delta - Y$ dengan titik netral sisi tegangan tinggi (Y) ditanahkan langsung (Hutauruk, 1999).
- 2) Titik netral sistem baru (Trafo T_6) ditanahkan melalui tahanan. Trafo T_6 menggunakan hubungan $\Delta - Y$, dimana sisi tegangan tinggi (Y) ditanahkan melalui suatu tahanan.

Pentanahan titik netral Sistem Gardu Induk (Trafo daya atau Pembangkit) di Indonesia menggunakan tiga jenis pentanahan berdasarkan SPLN 2 : 1978 dan SPLN 26 : 1980, antara lain :

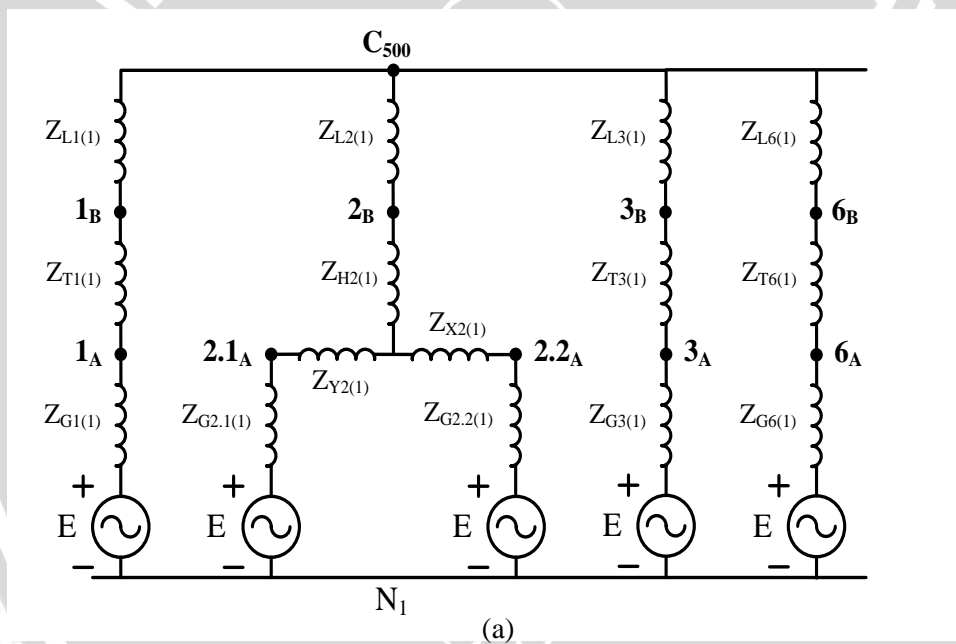
- 1) Pentanahan langsung.
- 2) Pentanahan melalui tahanan rendah dengan nilai sebesar 12 ohm atau 40 ohm.
- 3) Pentanahan melalui tahanan tinggi dengan nilai sebesar 500 ohm.

Pentanahan titik netral Sistem 500 kV di Pulau Jawa dilakukan tanpa tahanan / pentanahan langsung (Hutauruk, 1999 : 34), termasuk Sistem Gardu Induk Grati. Untuk kondisi kedua, tahanan yang digunakan adalah tahanan tinggi 500 ohm. Kondisi ini dimaksudkan agar nilai arus gangguan ke tanah yang terjadi bisa lebih kecil. Berdasarkan persamaan arus gangguan ke tanah bahwa impedansi berbanding terbalik dengan arus gangguan ke tanah ($I_f \sim \frac{1}{Z}$), maka semakin besar nilai tahanan pentanahan titik netral sistem, nilai arus gangguan ke tanah yang terjadi akan semakin kecil.

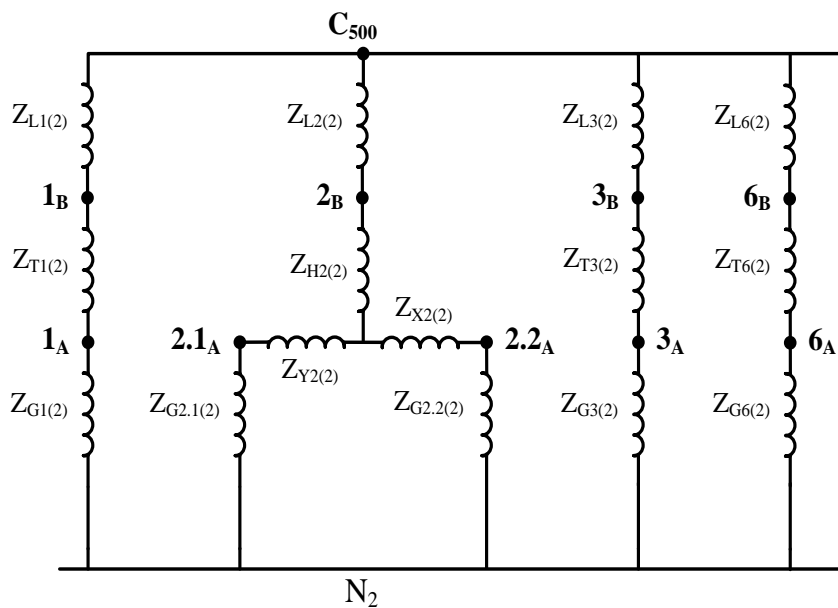
2.3.1 Impedansi Urutan dengan Titik Netral Sub-Sistem Baru Ditanahkan Langsung

Diagram garis Gambar 2.9 menunjukkan adanya penambahan Sub-Sistem yang baru, yaitu sistem VI. Dengan adanya penambahan ini, maka titik gangguan Sistem Gardu Induk bertambah, yaitu titik gangguan pada terminal keluaran Pembangkit VI (titik 6_A).

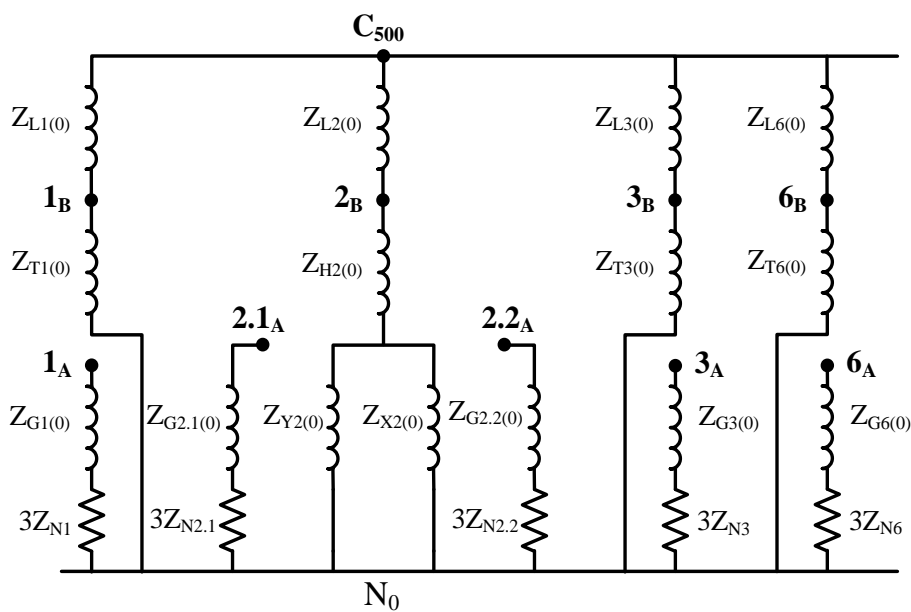
Penambahan Sub-Sistem juga diikuti dengan penambahan komponen impedansi urutan Sistem Gardu Induk sehingga rangkaian impedansi urutannya juga berubah. Analisis untuk kondisi yang pertama yaitu analisis dimana titik netral sistem yang baru (titik netral Trafo Daya VI) ditanahkan langsung. Penambahan komponen impedansi urutan terjadi pada rangkaian impedansi urutan sistem 500 kV. Rangkaian impedansi urutannya ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 (a) Rangkaian Impedansi Urutan Positif Sistem 500 kV Sesudah Penambahan Pembangkit.
Sumber : Sulasno, 1993 : 177.



(b)



(c)

Gambar 2.11 Rangkaian Impedansi Urutan Sistem 500 kV Sesudah Penambahan Pembangkit : (b) Urutan Negatif dan (c) Urutan Nol.

Sumber : Sulasno, 1993 : 179 – 181.

Penyederhanaan rangkaian impedansi urutan di setiap titik gangguan untuk Gambar 2.11 sama dengan penyederhanaan sebelum adanya penambahan pembangkit. Perhitungannya dapat dilihat pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 Perhitungan Impedansi Urutan Z_1 , Z_2 , Z_0 di Setiap Titik Gangguan Pada Sistem Gardu Induk Grati Sesudah Penambahan Pembangkit.

No	Titik Gangguan	Impedansi Urutan (Z_1 , Z_2 , Z_0)
1	1 _A	$Z_{S1} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)}$; $Z_{S2} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)}$; $Z_{S3} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)}$; $Z_{S4} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)}$; $Z_{S5} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)}$; $Z_{S6} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)}$; $Z_{SN} = Z_{G6(1)} + Z_{T6(1)} + Z_{L6(1)}$; $Z_{P1} = Z_{S1} // Z_{S2}$; $Z_{P2} = Z_{S4} // Z_{S5}$; $Z_{S7} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)}$; $Z_{S8} = Z_{P2} + Z_{H4(1)} + Z_{L4(1)}$ $Z_{P3} = Z_{S7} // Z_{S3} // Z_{SN}$; $Z_{P4} = Z_{S8} // Z_{S6}$; $Z_{S9} = Z_{TIB(1)} + Z_{P4}$; $Z_{P5} = Z_{P3} // Z_{S9}$; $Z_{S10} = Z_{T1(1)} + Z_{P5} + Z_{L1(1)}$ Sehingga : $Z_1 = Z_{G1(1)} // Z_{S10}$
		$Z_2 = Z_1$
		$Z_0 = 3Z_{N1} + Z_{G1(0)}$
2	2.1 _A	$Z_{S1} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)}$; $Z_{S2} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)}$; $Z_{S3} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)}$; $Z_{S4} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)}$; $Z_{S5} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)}$; $Z_{S6} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)}$; $Z_{SN} = Z_{G6(1)} + Z_{T6(1)} + Z_{L6(1)}$; $Z_{P1} = Z_{S1} // Z_{S3} // Z_{S9} // Z_{SN}$; $Z_{P2} = Z_{S4} // Z_{S5}$; $Z_{S7} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)}$; $Z_{S8} = Z_{P2} + Z_{H4(1)} + Z_{L4(1)}$ $Z_{P3} = Z_{S7} // Z_{S2}$; $Z_{P4} = Z_{S8} // Z_{S6}$; $Z_{S9} = Z_{TIB(1)} + Z_{P4}$; $Z_{S10} = Z_{Y2(1)} + Z_{P3}$ Sehingga : $Z_1 = Z_{G2.1(1)} // Z_{S10}$
		$Z_2 = Z_1$
		$Z_0 = 3Z_{N2.1} + Z_{G2.1(0)}$
3	2.2 _A	$Z_{S1} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)}$; $Z_{S2} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)}$; $Z_{S3} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)}$; $Z_{S4} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)}$; $Z_{S5} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)}$; $Z_{S6} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)}$; $Z_{SN} = Z_{G6(1)} + Z_{T6(1)} + Z_{L6(1)}$; $Z_{P1} = Z_{S1} // Z_{S3} // Z_{S9} // Z_{SN}$; $Z_{P2} = Z_{S4} // Z_{S5}$; $Z_{S7} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)}$; $Z_{S8} = Z_{P2} + Z_{H4(1)} + Z_{L4(1)}$ $Z_{P3} = Z_{S7} // Z_{S2}$; $Z_{P4} = Z_{S8} // Z_{S6}$; $Z_{S9} = Z_{TIB(1)} + Z_{P4}$; $Z_{S10} = Z_{X2(1)} + Z_{P3}$ Sehingga : $Z_1 = Z_{G2.2(1)} // Z_{S10}$
		$Z_2 = Z_1$
		$Z_0 = 3Z_{N2.2} + Z_{G2.2(0)}$

Lanjutan Tabel 2.2.

No	Titik Gangguan	Impedansi Urutan (Z_1, Z_2, Z_0)
4	3 _A	$Z_{S1} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)}; Z_{S2} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)};$ $Z_{S3} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)}; Z_{S4} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)};$ $Z_{S5} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)}; Z_{S6} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)};$ $Z_{SN} = Z_{G6(1)} + Z_{T6(1)} + Z_{L6(1)};$ $Z_{P1} = Z_{S2} // Z_{S3}; Z_{P2} = Z_{S4} // Z_{S5};$ $Z_{S7} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)}; Z_{S8} = Z_{P2} + Z_{H4(1)} + Z_{L4(1)}$ $Z_{P3} = Z_{S7} // Z_{S1} // Z_{SN}; Z_{P4} = Z_{S8} // Z_{S6}; Z_{P5} = Z_{P3} // Z_{S9};$ $Z_{S9} = Z_{TIB(1)} + Z_{P4}; Z_{S10} = Z_{T3(1)} + Z_{P5} + Z_{L3(1)}$ Sehingga : $Z_1 = Z_{G3(1)} // Z_{S10}$
		$Z_2 = Z_1$
		$Z_0 = 3Z_{N3} + Z_{G3(0)}$
5	4.1 _A	$Z_{S1} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)}; Z_{S2} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)};$ $Z_{S3} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)}; Z_{S4} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)};$ $Z_{S5} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)}; Z_{S6} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)};$ $Z_{SN} = Z_{G6(1)} + Z_{T6(1)} + Z_{L6(1)};$ $Z_{P1} = Z_{S2} // Z_{S3}; Z_{P2} = Z_{S1} // Z_{S4} // Z_{S7} // Z_{SN}$ $Z_{S7} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)}; Z_{S8} = Z_{TIB(1)} + Z_{P2};$ $Z_{P3} = Z_{S8} // Z_{S6}; Z_{P4} = Z_{S9} // Z_{S5};$ $Z_{S9} = Z_{H4(1)} + Z_{P3} + Z_{L4(1)}; Z_{S10} = Z_{Y4(1)} + Z_{P4}$ Sehingga : $Z_1 = Z_{G4.1(1)} // Z_{S10}$
		$Z_2 = Z_1$
		$Z_0 = 3Z_{N4.1} + Z_{G4.1(0)}$
6	4.2 _A	$Z_{S1} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)}; Z_{S2} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)};$ $Z_{S3} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)}; Z_{S4} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)};$ $Z_{S5} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)}; Z_{S6} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)};$ $Z_{SN} = Z_{G6(1)} + Z_{T6(1)} + Z_{L6(1)};$ $Z_{P1} = Z_{S2} // Z_{S3}; Z_{P2} = Z_{S1} // Z_{S4} // Z_{S7} // Z_{SN}$ $Z_{S7} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)}; Z_{S8} = Z_{TIB(1)} + Z_{P2};$ $Z_{P3} = Z_{S8} // Z_{S6}; Z_{P4} = Z_{S9} // Z_{S5};$ $Z_{S9} = Z_{H4(1)} + Z_{P3} + Z_{L4(1)}; Z_{S10} = Z_{X4(1)} + Z_{P4}$ Sehingga : $Z_1 = Z_{G4.2(1)} // Z_{S10}$
		$Z_2 = Z_1$
		$Z_0 = 3Z_{N4.2} + Z_{G4.2(0)}$



Lanjutan Tabel 2.2.

No	Titik Gangguan	Impedansi Urutan (Z_1, Z_2, Z_0)
7	5 _A	$Z_{S1} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)}; Z_{S2} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)};$ $Z_{S3} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)}; Z_{S4} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)};$ $Z_{S5} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)}; Z_{S6} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)};$ $Z_{SN} = Z_{G6(1)} + Z_{T6(1)} + Z_{L6(1)}; Z_{P1} = Z_{S2} // Z_{S3};$ $Z_{P2} = Z_{S1} // Z_{S4} // Z_{S7} // Z_{SN}; Z_{S7} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)};$ $Z_{S8} = Z_{TIB(1)} + Z_{P2}; Z_{P3} = Z_{S5} // Z_{S6}; Z_{P4} = Z_{S9} // Z_{S8};$ $Z_{S9} = Z_{H4(1)} + Z_{P3} + Z_{L4(1)}; Z_{S10} = Z_{T5(1)} + Z_{P4} + Z_{L5(1)}$ Sehingga : $Z_1 = Z_{G5(1)} // Z_{S10}$
		$Z_2 = Z_1$
		$Z_0 = 3Z_{N5} + Z_{G5(0)}$
8	6 _A	$Z_{S1} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)}; Z_{S2} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)};$ $Z_{S3} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)}; Z_{S4} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)};$ $Z_{S5} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)}; Z_{S6} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)};$ $Z_{SN} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)};$ $Z_{P1} = Z_{S2} // Z_{S3}; Z_{P2} = Z_{S4} // Z_{S5};$ $Z_{S7} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)}; Z_{S8} = Z_{P2} + Z_{H4(1)} + Z_{L4(1)}$ $Z_{P3} = Z_{S7} // Z_{S1} // Z_{SN}; Z_{P4} = Z_{S8} // Z_{S6}; Z_{P5} = Z_{P3} // Z_{S9};$ $Z_{S9} = Z_{TIB(1)} + Z_{P4}; Z_{S10} = Z_{T6(1)} + Z_{P5} + Z_{L6(1)}$ Sehingga : $Z_1 = Z_{G6(1)} // Z_{S10}$
		$Z_2 = Z_1$
		$Z_0 = 3Z_{N6} + Z_{G6(0)}$
9	1 _B	$Z_{S1} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)}; Z_{S2} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)};$ $Z_{S3} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)}; Z_{S4} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)};$ $Z_{S5} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)}; Z_{S6} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)};$ $Z_{SN} = Z_{G6(1)} + Z_{T6(1)} + Z_{L6(1)};$ $Z_{P1} = Z_{S1} // Z_{S2}; Z_{P2} = Z_{S4} // Z_{S5};$ $Z_{S7} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)}; Z_{S8} = Z_{P2} + Z_{H4(1)} + Z_{L4(1)}$ $Z_{P3} = Z_{S7} // Z_{S3} // Z_{SN}; Z_{P4} = Z_{S8} // Z_{S6}; Z_{S9} = Z_{TIB(1)} + Z_{P4};$ $Z_{P5} = Z_{P3} // Z_{S9}; Z_{S10} = Z_{P5} + Z_{L1(1)}$ 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 : $Z_0 = Z_{S4} // Z_{T1(0)}$



Lanjutan Tabel 2.2.

No	Titik Gangguan	Impedansi Urutan (Z_1, Z_2, Z_0)
10	2 _B	$Z_{S1} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)}$; $Z_{S2} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)}$; $Z_{S3} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)}$; $Z_{S4} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)}$; $Z_{S5} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)}$; $Z_{S6} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)}$; $Z_{S7} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)}$; $Z_{SN} = Z_{G6(1)} + Z_{T6(1)} + Z_{L6(1)}$; $Z_{P1} = Z_{S2} // Z_{S3}$; $Z_{P2} = Z_{S5} // Z_{S6}$; $Z_{S8} = Z_{P1} + Z_{H2(1)}$; $Z_{S9} = Z_{P2} + Z_{H4(1)} + Z_{L4(1)}$ $Z_{P3} = Z_{S7} // Z_{S9}$; $Z_{S10} = Z_{P3} + Z_{TIB}$; $Z_{P4} = Z_{S1} // Z_{S4} // Z_{S10} // Z_{SN}$ 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 : $Z_0 = Z_{S4} // Z_{S1}$
11	3 _B	$Z_{S1} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)}$; $Z_{S2} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)}$; $Z_{S3} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)}$; $Z_{S4} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)}$; $Z_{S5} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)}$; $Z_{S6} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)}$ $Z_{SN} = Z_{G6(1)} + Z_{T6(1)} + Z_{L6(1)}$; $Z_{P1} = Z_{S1} // Z_{S2}$; $Z_{P2} = Z_{S4} // Z_{S5}$; $Z_{S7} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)}$; $Z_{S8} = Z_{P2} + Z_{H4(1)} + Z_{L4(1)}$ $Z_{P3} = Z_{S7} // Z_{S3} // Z_{SN}$; $Z_{P4} = Z_{S8} // Z_{S6}$; $Z_{S9} = Z_{TIB(1)} + Z_{P4}$; $Z_{P5} = Z_{P3} // Z_{S9}$; $Z_{S10} = Z_{P5} + Z_{L3(1)}$ Sehingga : $Z_1 = (Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)}) // Z_{S10}$
		$Z_2 = Z_1$
		$Z_{P1} = Z_{Y2(0)} // Z_{X2(0)}$; $Z_{P2} = Z_{Y4(0)} // Z_{X4(0)}$; $Z_{S1} = Z_{H2(0)} + Z_{P1} + Z_{L2(0)}$; $Z_{S2} = Z_{H4(0)} + Z_{P2} + Z_{L4(0)}$ $Z_{SN} = Z_{T6(0)} + Z_{L6(0)}$; $Z_{P3} = Z_{S1} // (Z_{T1(0)} + Z_{L1(0)}) // Z_{SN}$; $Z_{P4} = Z_{S2} // (Z_{T5(0)} + Z_{L5(0)})$; $Z_{S3} = Z_{TIB(0)} + Z_{P4}$; $Z_{P5} = Z_{S3} // Z_{P3}$; $Z_{S4} = Z_{L3(0)} + Z_{P5}$ Sehingga : $Z_0 = Z_{S4} // Z_{T3(0)}$



Lanjutan Tabel 2.2.

No	Titik Gangguan	Impedansi Urutan (Z_1, Z_2, Z_0)
12	4 _B	$Z_{S1} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)}$; $Z_{S2} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)}$; $Z_{S3} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)}$; $Z_{S4} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)}$; $Z_{S5} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)}$; $Z_{S6} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)}$; $Z_{S7} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)}$; $Z_{SN} = Z_{G6(1)} + Z_{T6(1)} + Z_{L6(1)}$; $Z_{P1} = Z_{S2} // Z_{S3}$; $Z_{P2} = Z_{S5} // Z_{S6}$; $Z_{S8} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)}$; $Z_{S9} = Z_{P2} + Z_{H4(1)}$ $Z_{P3} = Z_{S1} // Z_{S4} // Z_{S8} // Z_{SN}$; $Z_{S10} = Z_{P3} + Z_{TIB}$; $Z_{P4} = Z_{S7} // Z_{S10}$; Sehingga : $Z_1 = Z_{S9} // (Z_{P4} + Z_{L4(1)})$
		$Z_2 = Z_1$
		$Z_{P1} = Z_{Y2(0)} // Z_{X2(0)}$; $Z_{P2} = Z_{Y4(0)} // Z_{X4(0)}$; $Z_{SN} = Z_{T6(0)} + Z_{L6(0)}$; $Z_{S1} = Z_{H2(0)} + Z_{P1} + Z_{L2(0)}$; $Z_{S2} = Z_{H4(0)} + Z_{P2}$ $Z_{P3} = Z_{S1} // (Z_{T1(0)} + Z_{L1(0)}) // (Z_{T3(0)} + Z_{L3(0)}) // Z_{SN}$ $Z_{S3} = Z_{TIB(0)} + Z_{P3}$; $Z_{P4} = Z_{S3} // (Z_{T5(0)} + Z_{L5(0)})$; $Z_{S4} = Z_{L4(0)} + Z_{P4}$ Sehingga : $Z_0 = Z_{S4} // Z_{S2}$
13	5 _B	$Z_{S1} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)}$; $Z_{S2} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)}$; $Z_{S3} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)}$; $Z_{S4} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)}$; $Z_{S5} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)}$; $Z_{S6} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)}$ $Z_{SN} = Z_{G6(1)} + Z_{T6(1)} + Z_{L6(1)}$; $Z_{P1} = Z_{S1} // Z_{S2}$; $Z_{P2} = Z_{S4} // Z_{S5}$; $Z_{S7} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)}$; $Z_{S8} = Z_{P2} + Z_{H4(1)} + Z_{L4(1)}$ $Z_{P3} = Z_{S7} // Z_{S3} // Z_{S6} // Z_{SN}$; $Z_{S9} = Z_{TIB(1)} + Z_{P3}$; $Z_{P4} = Z_{S8} // Z_{S9}$; $Z_{S10} = Z_{P4} + Z_{L5(1)}$ Sehingga : $Z_1 = (Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)}) // Z_{S10}$
		$Z_2 = Z_1$
		$Z_{P1} = Z_{Y2(0)} // Z_{X2(0)}$; $Z_{P2} = Z_{Y4(0)} // Z_{X4(0)}$; $Z_{SN} = Z_{T6(0)} + Z_{L6(0)}$; $Z_{S1} = Z_{H2(0)} + Z_{P1} + Z_{L2(0)}$; $Z_{S2} = Z_{H4(0)} + Z_{P2} + Z_{L4(0)}$ $Z_{P3} = Z_{S1} // (Z_{T1(0)} + Z_{L1(0)}) // (Z_{T3(0)} + Z_{L3(0)}) // Z_{SN}$; $Z_{S3} = Z_{TIB(0)} + Z_{P3}$; $Z_{P4} = Z_{S3} // Z_{S2}$; $Z_{S4} = Z_{L5(0)} + Z_{P4}$ Sehingga : $Z_0 = Z_{S4} // Z_{T5(0)}$

Lanjutan Tabel 2.2.

No	Titik Gangguan	Impedansi Urutan (Z_1, Z_2, Z_0)
14	6B	$Z_{S1} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)}; Z_{S2} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)};$ $Z_{S3} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)}; Z_{S4} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)};$ $Z_{S5} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)}; Z_{S6} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)}$ $Z_{SN} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)};$ $Z_{P1} = Z_{S1} // Z_{S2}; Z_{P2} = Z_{S4} // Z_{S5};$ $Z_{S7} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)}; Z_{S8} = Z_{P2} + Z_{H4(1)} + Z_{L4(1)}$ $Z_{P3} = Z_{S7} // Z_{S3} // Z_{SN}; Z_{P4} = Z_{S8} // Z_{S6}; Z_{S9} = Z_{TIB(1)} + Z_{P4};$ $Z_{P5} = Z_{P3} // Z_{S9}; Z_{S10} = Z_{P5} + Z_{L6(1)}$ Sehingga : $Z_1 = (Z_{G6(1)} + Z_{T6(1)}) // Z_{S10}$
		$Z_2 = Z_1$
		$Z_{P1} = Z_{Y2(0)} // Z_{X2(0)}; Z_{P2} = Z_{Y4(0)} // Z_{X4(0)};$ $Z_{S1} = Z_{H2(0)} + Z_{P1} + Z_{L2(0)}; Z_{S2} = Z_{H4(0)} + Z_{P2} + Z_{L4(0)}$ $Z_{SN} = Z_{T3(0)} + Z_{L3(0)};$ $Z_{P3} = Z_{S1} // (Z_{T1(0)} + Z_{L1(0)}) // Z_{SN};$ $Z_{P4} = Z_{S2} // (Z_{T5(0)} + Z_{L5(0)}); Z_{S3} = Z_{TIB(0)} + Z_{P4};$ $Z_{P5} = Z_{S3} // Z_{P3}; Z_{S4} = Z_{L6(0)} + Z_{P5}$ Sehingga : $Z_0 = Z_{S4} // Z_{T6(0)}$
15	C ₅₀₀	$Z_{S1} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)}; Z_{S2} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)};$ $Z_{S3} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)}; Z_{S4} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)};$ $Z_{S5} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)}; Z_{S6} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)};$ $Z_{S7} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)}; Z_{SN} = Z_{G6(1)} + Z_{T6(1)} + Z_{L6(1)};$ $Z_{P1} = Z_{S2} // Z_{S3}; Z_{P2} = Z_{S1} // Z_{S4} // Z_{S8} // Z_{SN}$ $Z_{S8} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)}; Z_{S9} = Z_{H4(1)} + Z_{P3} + Z_{L4(1)}$ $Z_{P3} = Z_{S5} // Z_{S6}; Z_{P4} = Z_{S9} // Z_{S7};$ $Z_{S10} = Z_{TIB(1)} + Z_{P4};$ Sehingga : $Z_1 = Z_{S9} // Z_{P2}$
		$Z_2 = Z_1$
		$Z_{P1} = Z_{Y2(0)} // Z_{X2(0)}; Z_{P2} = Z_{Y4(0)} // Z_{X4(0)};$ $Z_{SN} = Z_{T6(0)} + Z_{L6(0)};$ $Z_{S1} = Z_{H2(0)} + Z_{P1} + Z_{L2(0)}; Z_{S2} = Z_{H4(0)} + Z_{P2} + Z_{L4(0)};$ $Z_{P3} = (Z_{T1(0)} + Z_{L1(0)}) // Z_{S1} // (Z_{T3(0)} + Z_{L3(0)}) // Z_{SN};$ $Z_{P4} = Z_{S2} // (Z_{T5(0)} + Z_{L5(0)}); Z_{S3} = Z_{TIB(0)} + Z_{P4};$ Sehingga : $Z_0 = Z_{S3} // Z_{P3}$

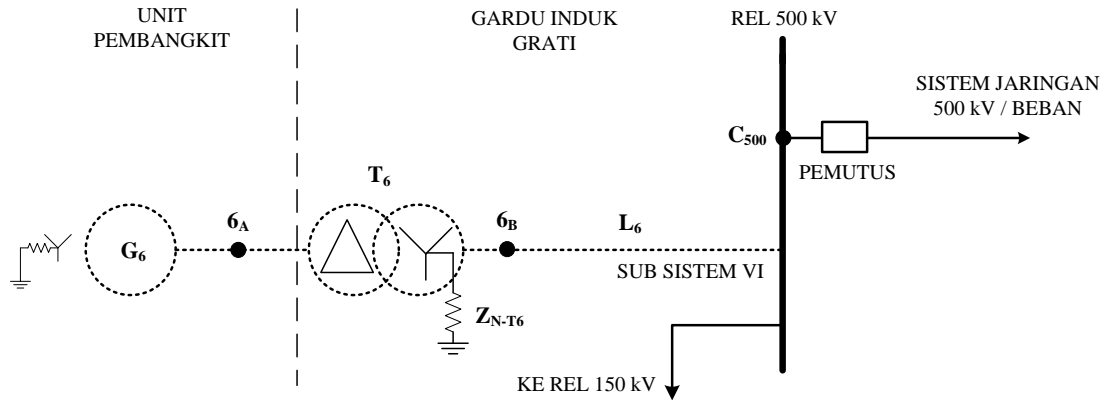


Lanjutan Tabel 2.2.

No	Titik Gangguan	Impedansi Urutan (Z_1, Z_2, Z_0)
16	C ₁₅₀	$Z_{S1} = Z_{G1(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{L1(1)}; Z_{S2} = Z_{G2.1(1)} + Z_{Y2(1)};$ $Z_{S3} = Z_{G2.2(1)} + Z_{X2(1)}; Z_{S4} = Z_{G3(1)} + Z_{T3(1)} + Z_{L3(1)};$ $Z_{S5} = Z_{G4.1(1)} + Z_{Y4(1)}; Z_{S6} = Z_{G4.2(1)} + Z_{X4(1)};$ $Z_{S7} = Z_{G5(1)} + Z_{T5(1)} + Z_{L5(1)}; Z_{SN} = Z_{G6(1)} + Z_{T6(1)} + Z_{L6(1)};$ $Z_{P1} = Z_{S2} // Z_{S3}; Z_{P2} = Z_{S1} // Z_{S4} // Z_{S8} // Z_{SN}$ $Z_{S8} = Z_{P1} + Z_{H2(1)} + Z_{L2(1)}; Z_{S9} = Z_{H4(1)} + Z_{P3} + Z_{L4(1)};$ $Z_{P3} = Z_{S5} // Z_{S6}; Z_{P4} = Z_{S9} // Z_{S7};$ $Z_{S10} = Z_{TIB(1)} + Z_{P2};$ Sehingga : $Z_1 = Z_{S10} // Z_{P4}$
		$Z_2 = Z_1$
		$Z_{P1} = Z_{Y2(0)} // Z_{X2(0)}; Z_{P2} = Z_{Y4(0)} // Z_{X4(0)};$ $Z_{SN} = Z_{T6(0)} + Z_{L6(0)};$ $Z_{S1} = Z_{H2(0)} + Z_{P1} + Z_{L2(0)}; Z_{S2} = Z_{H4(0)} + Z_{P2} + Z_{L4(0)};$ $Z_{P3} = (Z_{T1(0)} + Z_{L1(0)}) // Z_{S1} // (Z_{T3(0)} + Z_{L3(0)}) // Z_{SN}$ $Z_{P4} = Z_{S2} // (Z_{T5(0)} + Z_{L5(0)}); Z_{S3} = Z_{TIB(0)} + Z_{P3};$ Sehingga : $Z_0 = Z_{S3} // Z_{P4}$

Sumber : Hasil Perhitungan.

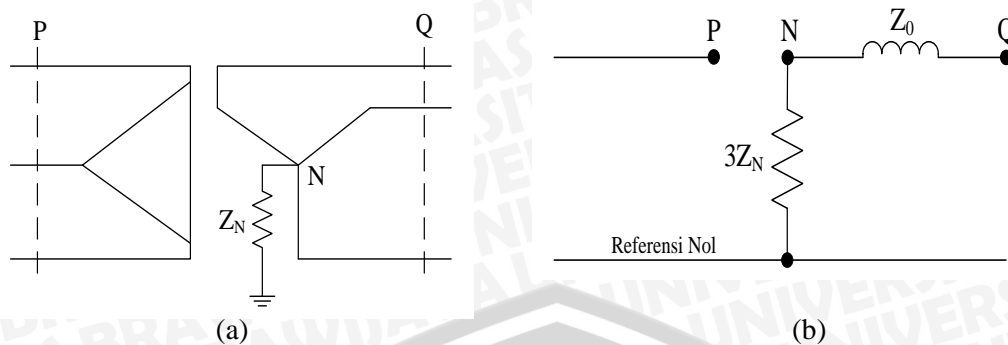
2.3.2 Impedansi Urutan dengan Titik Netral Sub-Sistem Baru Ditanahkan Melalui Tahanan



Gambar 2.12 Diagram Garis Tunggal Sub-Sistem Baru dengan Titik Netral Ditanahkan melalui Tahanan.

Sumber : PLN Pusat Pelayanan Enjiniring.

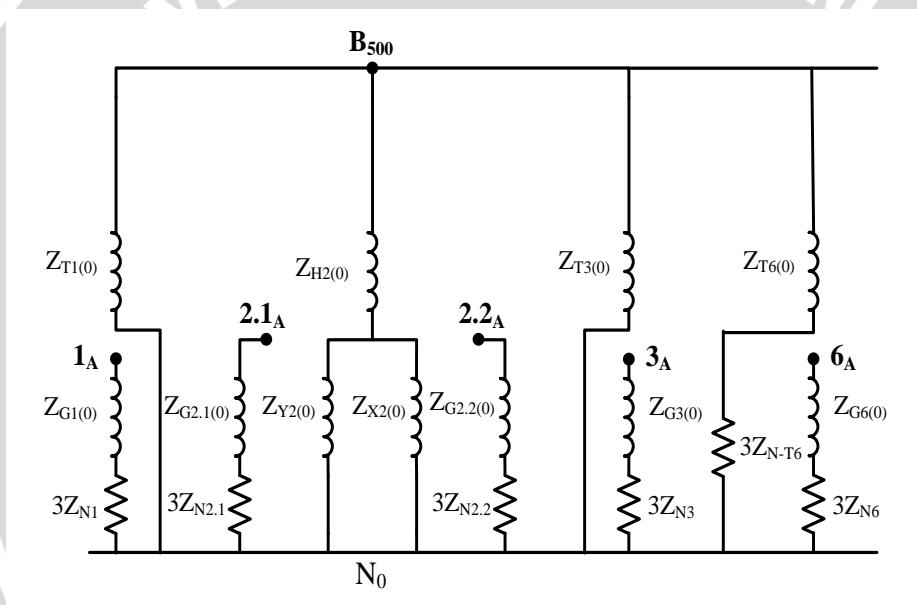
Analisis gangguan untuk kondisi yang kedua adalah analisis dimana Sub-Sistem yang ditambahkan ditanahkan melalui suatu tahanan. Gambar 2.12 menunjukkan diagram garis tunggal dimana Sub-Sistem baru (Sub-Sistem VI) menggunakan Trafo T_6 hubungan Δ - Y dengan titik netral hubungan Y ditanahkan melalui tahanan, yaitu Z_{N-T6} . Ketika gangguan terjadi pada titik-titik gangguan maka rangkaian impedansi urutan Z_1 dan Z_2 sama dengan rangkaian impedansi urutan dimana titik netral sistem ditanahkan langsung (sub-bab 2.3.1), sehingga nilai Z_1 dan Z_2 adalah sama. Sedangkan rangkaian impedansi urutan nol (Z_0) berubah karena penambahan impedansi Z_{N-T6} pada rangkaian tersebut sehingga nilai Z_0 berbeda. Penambahan pada rangkaian impedansi urutan nol ini ditunjukkan pada Gambar 2.13. Gambar 2.13 menjelaskan bahwa Trafo hubungan Δ - Y yang titik netralnya (titik N) ditanahkan melalui impedansi Z_N akan memiliki nilai $3Z_N$ pada rangkaian impedansi urutan nol nya (Z_0).



Gambar 2.13 (a) Trafo Hubungan Δ - Y dengan Titik Netral Ditanahkan melalui Impedansi Z_N dan (b) Rangkaian Ekuivalen Impedansi Urutan Nol nya.

Sumber : Paul M. Anderson, 1995 : 245.

Sehingga perubahan rangkaian impedansi urutan untuk kondisi kedua ini ditunjukkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2.14 Rangkaian Impedansi Z_0 Sistem 500 kV Sesudah Penambahan Pembangkit dengan Titik Netral Sub-Sistem VI Ditanahkan melalui Z_{N-T6} .

Sumber : Sulasno, 1993 : 177.

Gambar 2.14 menunjukkan adanya penambahan komponen impedansi urutan nol Sub-Sistem VI pada rangkaian impedansi urutan nol sistem 500 kV. Dengan adanya rangkaian impedansi urutan nol yang baru, maka nilai impedansi ekuivalen urutan nol untuk setiap titik gangguan secara umum berbeda. Langkah penentuan impedansi ekuivalen urutan nol untuk kondisi kedua ini sama dengan

penyederhanaan sebelum adanya penambahan pembangkit. Perhitungannya dapat dilihat pada tabel 2.3.

Tabel 2.3 Perhitungan Impedansi Z_0 di Setiap Titik Gangguan Pada Sistem Gardu Induk Grati dengan Titik Netral Sub-Sistem VI Ditanahkan melalui Z_{N-T6} .

No	Titik Gangguan	Impedansi Urutan Nol (Z_0)
1	1 _A	$Z_0 = 3Z_{N1} + Z_{G1(0)}$
2	2.1 _A	$Z_0 = 3Z_{N2.1} + Z_{G2.1(0)}$
3	2.2 _A	$Z_0 = 3Z_{N2.2} + Z_{G2.2(0)}$
4	3 _A	$Z_0 = 3Z_{N3} + Z_{G3(0)}$
5	4.1 _A	$Z_0 = 3Z_{N4.1} + Z_{G4.1(0)}$
6	4.2 _A	$Z_0 = 3Z_{N4.2} + Z_{G4.2(0)}$
7	5 _A	$Z_0 = 3Z_{N5} + Z_{G5(0)}$
8	6 _A	$Z_0 = 3Z_{N6} + Z_{G6(0)}$
9	1 _B	$Z_{P1} = Z_{Y2(0)} // Z_{X2(0)}; Z_{P2} = Z_{Y4(0)} // Z_{X4(0)};$ $Z_{S1} = Z_{H2(0)} + Z_{P1} + Z_{L2(0)}; Z_{S2} = Z_{H4(0)} + Z_{P2} + Z_{L4(0)}$ $Z_{SN} = Z_{T6(0)} + Z_{L6(0)} + 3Z_{N-T6}$ $Z_{P3} = Z_{S1} // (Z_{T3(0)} + Z_{L3(0)}) // Z_{SN};$ $Z_{P4} = Z_{S2} // (Z_{T5(0)} + Z_{L5(0)}); Z_{S3} = Z_{TIB(0)} + Z_{P4};$ $Z_{P5} = Z_{S3} // Z_{P3}; Z_{S4} = Z_{L1(0)} + Z_{P5}$ Sehingga : $Z_0 = Z_{S4} // Z_{T1(0)}$
10	2 _B	$Z_{P1} = Z_{Y2(0)} // Z_{X2(0)}; Z_{P2} = Z_{Y4(0)} // Z_{X4(0)};$ $Z_{S1} = Z_{H2(0)} + Z_{P1}; Z_{S2} = Z_{H4(0)} + Z_{P2} + Z_{L4(0)}$ $Z_{SN} = Z_{T6(0)} + Z_{L6(0)} + 3Z_{N-T6}$ $Z_{P3} = Z_{S2} // (Z_{T5(0)} + Z_{L5(0)}); Z_{S3} = Z_{TIB(0)} + Z_{P3};$ $Z_{P4} = Z_{S3} // (Z_{T1(0)} + Z_{L1(0)}) // (Z_{T3(0)} + Z_{L3(0)}) // Z_{SN}$ $Z_{S4} = Z_{L2(0)} + Z_{P4}$ Sehingga : $Z_0 = Z_{S4} // Z_{S1}$
11	3 _B	$Z_{P1} = Z_{Y2(0)} // Z_{X2(0)}; Z_{P2} = Z_{Y4(0)} // Z_{X4(0)};$ $Z_{S1} = Z_{H2(0)} + Z_{P1} + Z_{L2(0)}; Z_{S2} = Z_{H4(0)} + Z_{P2} + Z_{L4(0)}$ $Z_{SN} = Z_{T6(0)} + Z_{L6(0)} + 3Z_{N-T6}$ $Z_{P3} = Z_{S1} // (Z_{T1(0)} + Z_{L1(0)}) // Z_{SN};$ $Z_{P4} = Z_{S2} // (Z_{T5(0)} + Z_{L5(0)}); Z_{S3} = Z_{TIB(0)} + Z_{P4};$ $Z_{P5} = Z_{S3} // Z_{P3}; Z_{S4} = Z_{L3(0)} + Z_{P5}$ Sehingga : $Z_0 = Z_{S4} // Z_{T3(0)}$

Lanjutan Tabel 2.3.

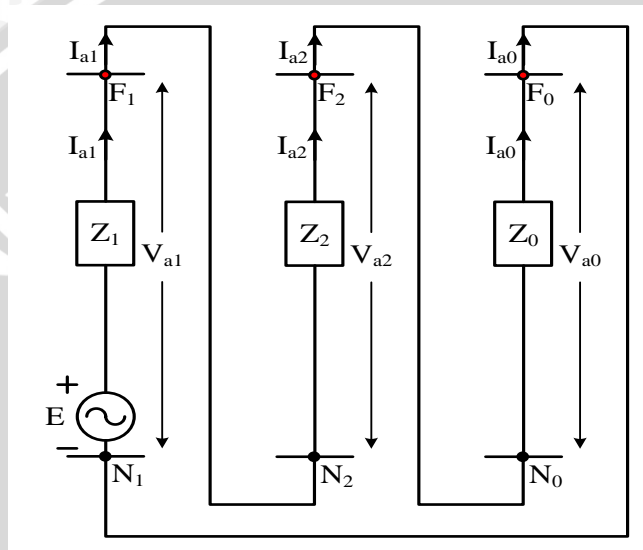
No	Titik Gangguan	Impedansi Urutan Nol (Z_0)
12	4 _B	$Z_{P1} = Z_{Y2(0)} // Z_{X2(0)}; Z_{P2} = Z_{Y4(0)} // Z_{X4(0)};$ $Z_{SN} = Z_{T6(0)} + Z_{L6(0)} + 3Z_{N-T6}$ $Z_{S1} = Z_{H2(0)} + Z_{P1} + Z_{L2(0)}; Z_{S2} = Z_{H4(0)} + Z_{P2}$ $Z_{P3} = Z_{S1} // (Z_{T1(0)} + Z_{L1(0)}) // (Z_{T3(0)} + Z_{L3(0)}) // Z_{SN}$ $Z_{S3} = Z_{TIB(0)} + Z_{P3}; Z_{P4} = Z_{S3} // (Z_{T5(0)} + Z_{L5(0)});$ $Z_{S4} = Z_{L4(0)} + Z_{P4}$ Sehingga : $Z_0 = Z_{S4} // Z_{S2}$
13	5 _B	$Z_{P1} = Z_{Y2(0)} // Z_{X2(0)}; Z_{P2} = Z_{Y4(0)} // Z_{X4(0)};$ $Z_{SN} = Z_{T6(0)} + Z_{L6(0)} + 3Z_{N-T6}$ $Z_{S1} = Z_{H2(0)} + Z_{P1} + Z_{L2(0)}; Z_{S2} = Z_{H4(0)} + Z_{P2} + Z_{L4(0)}$ $Z_{P3} = Z_{S1} // (Z_{T1(0)} + Z_{L1(0)}) // (Z_{T3(0)} + Z_{L3(0)}) // Z_{SN};$ $Z_{S3} = Z_{TIB(0)} + Z_{P3}; Z_{P4} = Z_{S3} // Z_{S2}; Z_{S4} = Z_{L5(0)} + Z_{P4}$ Sehingga : $Z_0 = Z_{S4} // Z_{T5(0)}$
14	6 _B	$Z_{P1} = Z_{Y2(0)} // Z_{X2(0)}; Z_{P2} = Z_{Y4(0)} // Z_{X4(0)};$ $Z_{S1} = Z_{H2(0)} + Z_{P1} + Z_{L2(0)}; Z_{S2} = Z_{H4(0)} + Z_{P2} + Z_{L4(0)}$ $Z_{SN} = Z_{T3(0)} + Z_{L3(0)};$ $Z_{P3} = Z_{S1} // (Z_{T1(0)} + Z_{L1(0)}) // Z_{SN};$ $Z_{P4} = Z_{S2} // (Z_{T5(0)} + Z_{L5(0)}); Z_{S3} = Z_{TIB(0)} + Z_{P4};$ $Z_{P5} = Z_{S3} // Z_{P3}; Z_{S4} = Z_{L6(0)} + Z_{P5}$ Sehingga : $Z_0 = Z_{S4} // (Z_{T6(0)} + 3Z_{N-T6})$
15	B ₅₀₀	$Z_{P1} = Z_{Y2(0)} // Z_{X2(0)}; Z_{P2} = Z_{Y4(0)} // Z_{X4(0)};$ $Z_{S1} = Z_{H2(0)} + Z_{P1} + Z_{L2(0)}; Z_{S2} = Z_{H4(0)} + Z_{P2} + Z_{L4(0)}$ $Z_{S4} = Z_{T6(0)} + Z_{L6(0)} + 3Z_{N-T6}$ $Z_{P3} = (Z_{T1(0)} + Z_{L1(0)}) // Z_{S1} // (Z_{T3(0)} + Z_{L3(0)}) // Z_{S4};$ $Z_{P4} = Z_{S2} // (Z_{T5(0)} + Z_{L5(0)}); Z_{S3} = Z_{TIB(0)} + Z_{P4};$ Sehingga : $Z_0 = Z_{S3} // Z_{P3}$
16	B ₁₅₀	$Z_{P1} = Z_{Y2(0)} // Z_{X2(0)}; Z_{P2} = Z_{Y4(0)} // Z_{X4(0)};$ $Z_{S1} = Z_{H2(0)} + Z_{P1} + Z_{L2(0)}; Z_{S2} = Z_{H4(0)} + Z_{P2} + Z_{L4(0)}$ $Z_{S4} = Z_{T6(0)} + Z_{L6(0)} + 3Z_{N-T6}$ $Z_{P3} = (Z_{T1(0)} + Z_{L1(0)}) // Z_{S1} // (Z_{T3(0)} + Z_{L3(0)}) // Z_{S4};$ $Z_{P4} = Z_{S2} // (Z_{T5(0)} + Z_{L5(0)}); Z_{S3} = Z_{TIB(0)} + Z_{P4};$ Sehingga : $Z_0 = Z_{S3} // Z_{P3}$

Sumber : Hasil Perhitungan.

2.4 Persamaan Arus Gangguan ke Tanah

Setelah semua nilai impedansi urutan Z_1 , Z_2 , Z_0 diperoleh maka perhitungan nilai arus gangguan ke tanah dapat dicari. Perhitungan nilai arus gangguan ke tanah untuk semua gangguan, baik gangguan sebelum adanya penambahan Pembangkit maupun sesudah penambahan Pembangkit baru menggunakan rumus yang sama berdasarkan jenis gangguan yang terjadi, yaitu :

2.4.1 Gangguan Satu Fasa ke Tanah



Gambar 2.15 Hubungan Jaringan Urutan Gangguan Satu Fasa ke Tanah.
Sumber : Sulasno, 1993 : 184.

Gambar 2.15 menunjukkan hubungan jaringan urutan untuk gangguan satu fasa ke tanah. Gangguan satu fasa ke tanah merupakan gangguan yang paling sering terjadi pada suatu sistem daya listrik (IEEE Std. 80, 2000). Persamaan - persamaan saat gangguan ke tanah terjadi pada salah satu fasa, contoh pada fasa a (Sulasno, 1993 : 183) adalah :

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{E_a}{(Z_1 + Z_2 + Z_0)} \quad (2.4)$$

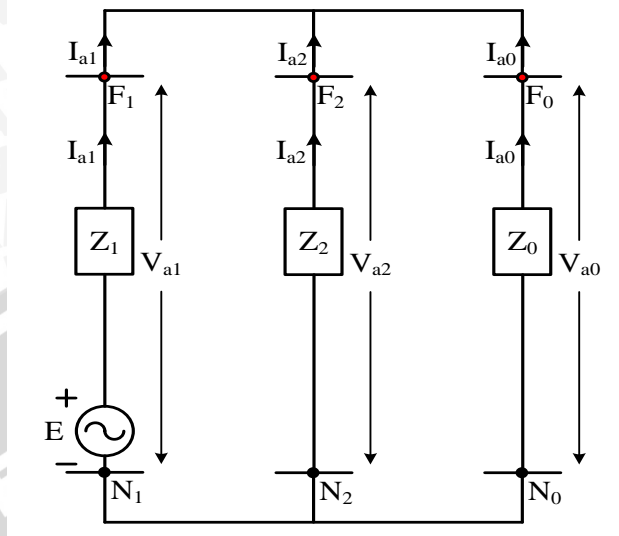
Karena :

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0}, \text{ sehingga } I_a = 3 I_{a1} \quad (2.5)$$

Maka besar arus gangguan ke tanahnya :

$$I_f = I_a = \frac{3E}{(Z_1 + Z_2 + Z_0)} \quad (2.6)$$

2.4.2 Gangguan Dua Fasa ke Tanah



Gambar 2.16 Hubungan Jaringan Urutan Gangguan Dua Fasa ke Tanah.
 Sumber : Sulasno, 1993 : 195.

Gambar 2.16 menunjukkan hubungan jaringan urutan untuk gangguan dua fasa ke tanah. Persamaan-persamaan saat gangguan tanah terjadi pada dua fasa, contoh fasa b dan c (Sulasno, 1993 : 196) adalah :

$$I_{a1} = E_a / (Z_1 + (Z_2 // Z_0)) \quad (2.7)$$

$$I_{a2} = - \left(\frac{Z_0}{Z_2 + Z_0} \right) \times I_{a1} \quad (2.8)$$

$$I_{a0} = - \left(\frac{Z_2}{Z_2 + Z_0} \right) \times I_{a1} \quad (2.9)$$

Karena :

$$I_a = 0 \quad (2.10)$$

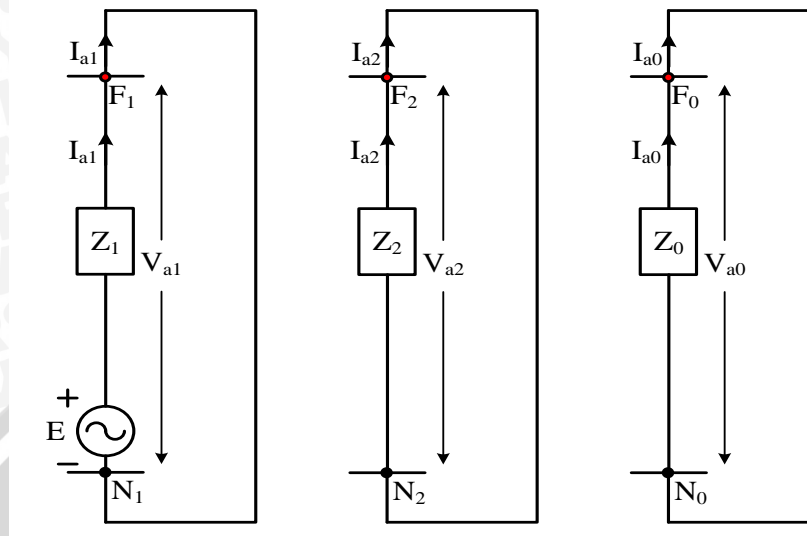
$$I_b = I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2} \quad (2.11)$$

$$I_c = I_{a0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2} \quad (2.12)$$

Maka besar arus gangguan ke tanah nya :

$$I_f = I_b + I_c \text{ atau } I_f = 3I_{a0} \quad (2.13)$$

2.4.3 Gangguan Tiga Fasa ke Tanah



Gambar 2.17 Hubungan Jaringan Urutan Gangguan Tiga Fasa ke Tanah.

Sumber : Paul M. Anderson, 1995 : 51.

Gambar 2.17 menunjukkan hubungan jaringan urutan untuk gangguan tiga fasa ke tanah. Persamaan-persamaan saat gangguan tanah terjadi pada ketiga fasa, contoh fasa a, b dan c (Sulasno, 1993 : 201) adalah :

$$I_f = I_a = I_b = I_c = E/Z_1 \quad (2.14)$$

Persamaan 2.14 menunjukkan bahwa arus pada keadaan gangguan tiga fasa ke tanah tidak mengandung unsur arus urutan nol maupun impedansi netral, sehingga sistem pentanahan netral pada gangguan tersebut tidak ada pengaruhnya. Gangguan tiga fasa ke tanah ini merupakan gangguan yang paling jarang terjadi pada sistem daya listrik, namun nilai arus gangguannya paling besar di antara gangguan ke tanah lainnya (IEEE Std. 80, 2000).

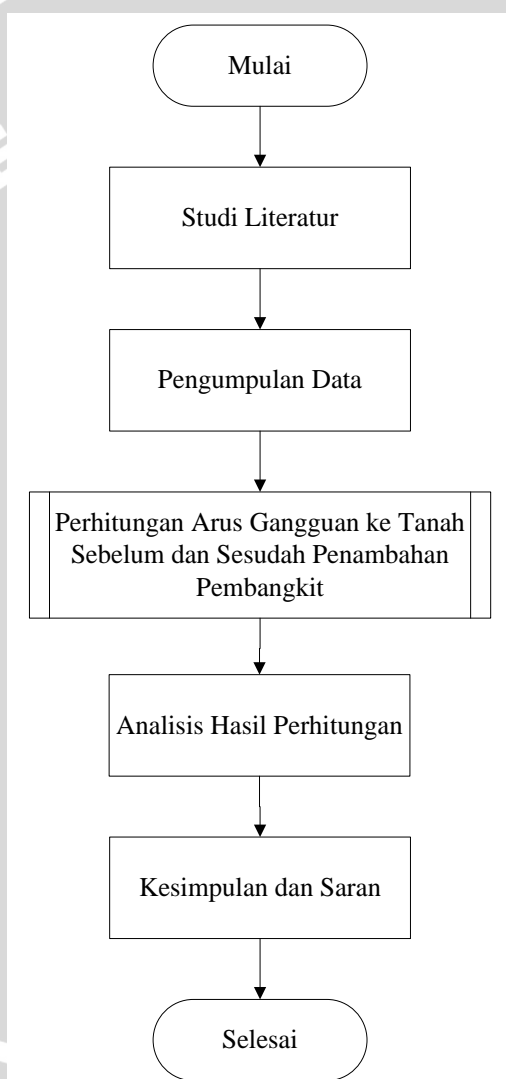
Dari hasil perhitungan, nilai arus gangguan ke tanah yang dibutuhkan dalam analisis nantinya adalah nilai maksimum. Nilai ini akan digunakan sebagai acuan dalam perencanaan sistem pentanahan peralatan dan proteksi pada Gardu Induk. Nilai maksimum digunakan sebagai acuan rating bekerjanya pemutus / Rele gangguan tanah (Hutauruk, 1993 : 29). Berdasarkan Standar Perusahaan Listrik Negara (SPLN) Bagian IV Bab 3E halaman 216, besar arus gangguan

maksimum yang diijinkan pada suatu Sistem Gardu Induk atau Pembangkit adalah 40,000 A (PLN Pusat Pelayanan Enjiniring : Bab 6.13, Hal. 14).



BAB III METODOLOGI

Kajian yang dilakukan dalam penelitian ini adalah mengenai perhitungan arus gangguan ke tanah pada Sistem Gardu Induk Grati sebelum dan sesudah penambahan Pembangkit baru. Adapun metodologi yang digunakan dalam penyelesaian skripsi ini ditunjukkan pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi.
Sumber : Chandra Irawan, 2006.

3.1 Studi Literatur

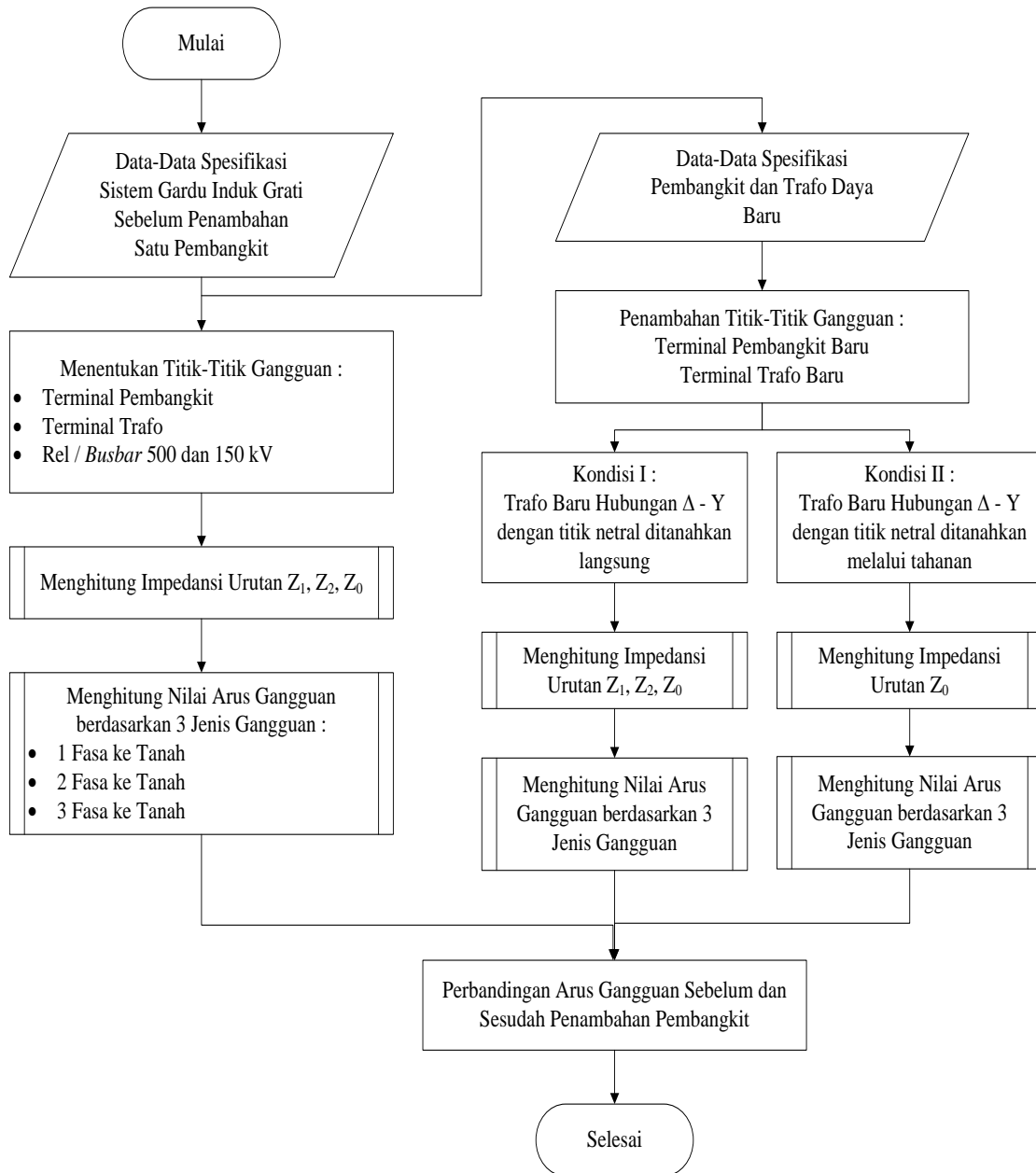
Melakukan kajian pustaka yang dapat membantu dalam penelitian yang berhubungan dengan gangguan ke tanah pada Sistem Gardu Induk, serta analisis gangguan sebelum dan sesudah penambahan Pembangkit pada Sistem Gardu Induk Grati.

3.2 Pengumpulan Data

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 adanya 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 Daya 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 Daya dan Saluran baru, meliputi :
 - a) Rating daya dan tegangan.
 - b) Impedansi urutan urutan positif, negatif dan nol (Z_1, Z_2, Z_0).
- 5) Diagram garis tunggal Sistem Gardu Induk Grati.

3.3 Perhitungan Arus Gangguan pada Sistem Gardu Induk Grati



Gambar 3.2 Diagram Alir Perhitungan Arus Gangguan Sebelum dan Sesudah Penambahan Satu Pembangkit Pada Sistem Gardu Induk Grati.
Sumber : Chandra Irawan, 2006.

Gambar 3.2 menunjukkan langkah-langkah perhitungan arus gangguan ke tanah pada Sistem Gardu Induk Grati sebelum dan sesudah penambahan satu Unit Pembangkit. Kedua hasil perhitungan tersebut selanjutnya akan dibandingkan dan dianalisis.

3.3.1 Data-Data Spesifikasi Sistem Sebelum Penambahan Pembangkit

Data-Data Spesifikasi Sistem Gardu Induk Grati sebelum adanya penambahan satu Unit Pembangkit antara lain :

- 1) Rating Pembangkit, Trafo dan Saluran.
- 2) Komponen impedansi Pembangkit :
 - a) Impedansi urutan (Z_1 , Z_2 , dan Z_0).
 - b) Impedansi pentanahan.
- 3) Impedansi urutan Trafo (Z_1 , Z_2 , dan Z_0).
- 4) Impedansi urutan Saluran (Z_1 , Z_2 , dan Z_0).
- 5) Hubungan Trafo.
- 6) Hubungan terminal keluaran Pembangkit.

3.3.2 Penentuan Letak Titik Gangguan

Ada 14 titik gangguan yang akan dicari nilai arus gangguannya pada Sistem Gardu Induk Grati sebelum adanya penambahan satu Unit Pembangkit (Gambar 2.1 dan Gambar 2.2), antara lain :

- 1) Tujuh Terminal keluaran dari tujuh Unit Pembangkit.
- 2) Lima Terminal keluaran dari lima Unit Trafo.
- 3) Dua Rel / *Busbar*, yaitu Rel 500 kV dan Rel 150 kV.

3.3.3 Perhitungan Impedansi Urutan

Setelah menentukan letak titik gangguan, maka langkah selanjutnya adalah menghitung besarnya impedansi urutan Z_1 , Z_2 , Z_0 pada setiap titik gangguan. Perhitungan diperoleh dengan menyusun rangkaian impedansi urutan Z_1 , Z_2 , Z_0 dan menyederhanakan rangkaian impedansi tersebut sampai mendapatkan nilai penggantinya. Besarnya impedansi urutan tiap titik gangguan berbeda-beda karena rangkaian ekuivalen urutannya akan berubah sesuai dengan titik dimana gangguan terjadi.

3.3.4 Perhitungan Nilai Arus Gangguan Berdasarkan Jenis Gangguan

Setelah impedansi urutan Z_1 , Z_2 , Z_0 pada setiap titik gangguan diperoleh, maka dapat dicari nilai arus gangguan berdasarkan tiga jenis gangguan yang terjadi, antara lain :

- 1) Gangguan Satu Fasa ke Tanah.
- 2) Gangguan Dua Fasa ke Tanah.
- 3) Gangguan Tiga Fasa ke Tanah.

Perhitungan tiap jenis gangguan berbeda-beda sesuai dengan persamaan-persamaan arus gangguan pada sub-bab 2.4. Dengan demikian tiap titik gangguan terdapat tiga jenis gangguan yang harus dicari nilai arusnya.

3.3.5 Data-Data Spesifikasi Sub-Sistem Baru

Data-data spesifikasi Sub-Sistem baru antara lain :

- 1) Rating satu unit Pembangkit dan Trafo Daya baru (Tegangan dan Daya).
- 2) Komponen impedansi Pembangkit dan Trafo baru.
- 3) Hubungan Trafo baru.
- 4) Hubungan terminal keluaran Pembangkit baru.

3.3.6 Perhitungan Arus Gangguan Sesudah Penambahan Pembangkit

Setelah ada penambahan satu Unit Pembangkit maka letak titik gangguan bertambah, yaitu terminal keluaran Pembangkit Baru dan terminal keluaran Trafo baru. Dengan demikian, Sistem Gardu Induk Grati memiliki 16 titik gangguan sesudah adanya penambahan Pembangkit. Titik-titik gangguan tersebut dicari rangkaian impedansi urutannya berdasarkan dua kondisi pentanahan titik netral sistem, antara lain :

- 1) Titik netral sistem dimana Trafo T_6 menggunakan hubungan $\Delta - Y$ dengan titik netral Y ditanahkan langsung.
- 2) Titik netral sistem dimana Trafo T_6 menggunakan hubungan $\Delta - Y$ dengan titik netral Y ditanahkan melalui impedansi Z_{N-T6} .

Tentunya tiap titik gangguan untuk dua kondisi tersebut memiliki impedansi urutan Z_1 , Z_2 , Z_0 yang berbeda-beda. Setelah nilai impedansi urutan diperoleh maka nilai arus gangguan dicari berdasarkan tiga jenis gangguan, yaitu Gangguan Satu Fasa ke Tanah, Gangguan Dua Fasa ke Tanah dan Tiga Fasa ke Tanah.

3.4 Analisis Hasil Perhitungan

Hasil perhitungan yang telah didapatkan, dianalisis dengan mencari nilai terbesarnya (maksimum). Nilai maksimum antara arus gangguan ke tanah sebelum dengan sesudah penambahan Pembangkit dimana titik netral sub-sistem baru ditanahkan langsung dibandingkan untuk mengetahui apakah meningkat atau menurun. Demikian pula kondisi pentanahan titik netral pada sub-sistem baru ditanahkan melalui tahanan, nilai maksimumnya dibandingkan dengan kondisi titik netral langsung untuk mengetahui manakah kondisi yang menghasilkan arus gangguan ke tanah yang lebih kecil seiring adanya perubahan arus gangguan ke tanah akibat penambahan Pembangkit.

3.5 Pengambilan Kesimpulan dan Saran

Pengambilan kesimpulan ditulis berdasarkan hasil perhitungan dan analisis yang dilakukan. Pada bagian ini dijelaskan secara singkat tentang hasil yang telah diperoleh beserta saran untuk pengembangan selanjutnya.

BAB IV PERHITUNGAN DAN ANALISIS

4.1 Spesifikasi Komponen Sistem Gardu Induk Grati

Pembangkit Listrik Tenaga Gas–Uap (PLTGU) Grati merupakan Pembangkit listrik yang dekat dengan Gardu Induk, yaitu Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi (GITET) Grati. PLTGU ini memiliki dua blok Pembangkit yang masing-masing terhubung ke Gardu Induk yang berbeda. Blok I dihubungkan ke GITET Grati 500 kV, sedangkan Blok II dihubungkan ke GITET Grati 150 kV. Masing-masing GITET ini dihubungkan melalui suatu Trafo Penghubung antar Rel atau *Inter Bus Power Transformer*. Unit-unit Pembangkit dan Gardu Induk Grati membentuk suatu Sistem yang terdiri dari Unit-Unit Pembangkit, Trafo Daya dan Saluran.

4.1.1 Unit Pembangkit

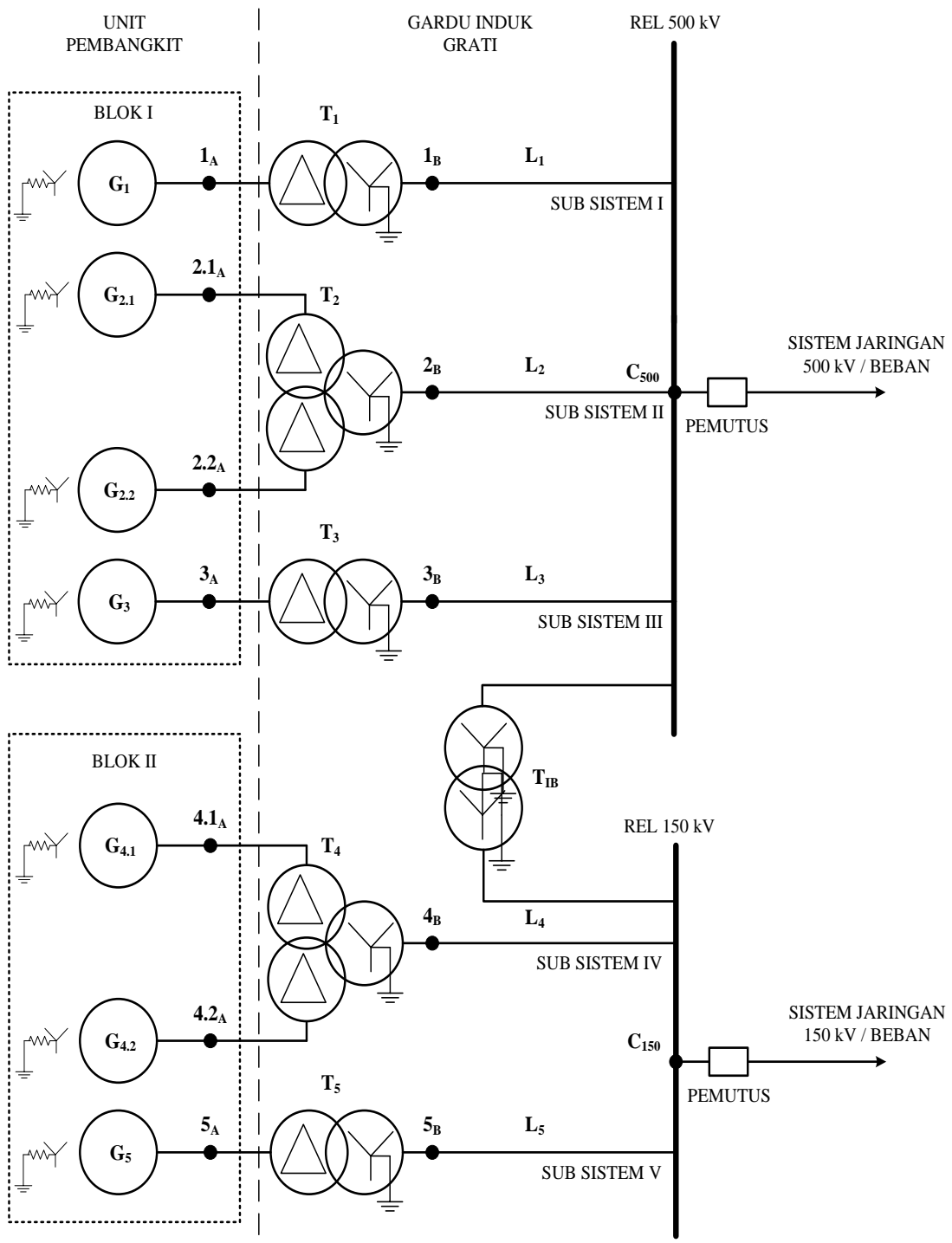
PLTGU Grati memiliki dua jenis Pembangkit, yaitu Pembangkit Tenaga Uap (*Steam Turbin Generator / STG*) dan Pembangkit Tenaga Gas (*Gas Turbin Generator / GTG*). Gambar 4.1 menunjukkan adanya dua Blok Pembangkit pada Sistem Gardu Induk Grati. Diagram Garis Sistem Gardu Induk Grati selengkapnya diberikan pada Lampiran 1. Blok I terdiri dari Pembangkit I yang merupakan Pembangkit Tenaga Uap; Pembangkit II dan Pembangkit III merupakan Pembangkit Tenaga Gas. Blok II terdiri dari Pembangkit IV dan V yang merupakan Pembangkit Tenaga Gas. Data spesifikasi jenis Pembangkit pada PLTGU Grati ditunjukkan pada tabel 4.1. Spesifikasi Unit Pembangkit selengkapnya diberikan pada Lampiran 2.

Tabel 4.1 Data Spesifikasi Pembangkit pada Sistem Gardu Induk Grati Sebelum Penambahan Pembangkit.

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 : Bab 5.1.1, Hal. 10; Bab 5.1.2, Hal. 10.

Tabel 4.1 menunjukkan bahwa reaktansi urutan X_1 dan X_2 pada masing-masing jenis Pembangkit nilainya sama. Nilai ini diambil dari reaktansi sub peralihan (X_d'') dari masing-masing Pembangkit tersebut (Sulasno, 1993 : 173).



Gambar 4.1 Diagram Garis Tunggal Sistem Gardu Induk Grati Sebelum Penambahan Pembangkit.

Sumber : PT PLN (Persero) Grati CCPP : Bab 6.0, Hal. 7.

4.1.2 Trafo Daya

Trafo Daya pada gambar 4.1 terdiri dari 2 jenis, yaitu Trafo Daya dua belitan dan Trafo Daya tiga belitan. Data spesifikasi Trafo Daya untuk masing-masing Pembangkit ditunjukkan pada tabel 4.2. Tabel 4.2 menunjukkan bahwa Trafo II dan IV memiliki reaktansi antar belitan tegangan rendah (belitan X - belitan Y) dan reaktansi antara belitan tegangan rendah (belitan X atau belitan Y) dengan belitan tegangan tinggi (belitan H).

Tabel 4.2 Data Spesifikasi Trafo Daya pada Sistem Gardu Induk Grati Sebelum Penambahan Pembangkit.

No	Trafo Daya	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	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
4	T _{IB}	500	500/150	Y-to ground / Y-to-ground	13.5

Sumber : PLN Pusat Pelayanan Enjiniring : Bab 6.0, Hal. 7.

4.1.3 Saluran

Spesifikasi saluran yang terdapat pada Gambar 4.1 dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Data Spesifikasi Saluran pada Sistem Gardu Induk Grati.

No	Sub-Sistem	Rating Tegangan (kV)	Panjang Saluran (m)	Impedansi Urutan/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 : Bab 6.0, Hal. 7.

4.2 Perhitungan Arus Gangguan ke Tanah Sebelum Penambahan Pembangkit

Perhitungan arus gangguan ke tanah dilakukan dengan menggunakan besaran dasar, yaitu daya dasar dan tegangan dasar. Dengan adanya besaran dasar ini, semua nilai perhitungan dilakukan dalam per satuan atau per unit (p.u.) untuk memudahkan perhitungan. Daya dasar yang digunakan (S_{dasar}) adalah 100 MVA, sedangkan tegangan dasarnya (V_{dasar}) disesuaikan dengan letak dimana gangguan terjadi. Jika gangguan terjadi di sistem rel 500 kV maka V_{dasar} adalah 500 kV, sedangkan jika gangguan terjadi di sistem rel 150 kV maka V_{dasar} adalah 150 kV.

Langkah pertama adalah menghitung nilai impedansi urutan tiap komponen sistem menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$Z_{\text{dasar}}(\Omega) = \frac{(V_{\text{dasar}}(\text{kV}))^2}{S_{\text{dasar}}(\text{MVA})}$$
$$Z_{\text{dasar}}(\Omega) = \frac{(500)^2}{100} = \frac{250000}{100} = 2500 \Omega$$

Sebagai contoh, nilai impedansi pentanahan Pembangkit (dalam p.u.) yaitu :

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

Sedangkan penentuan nilai impedansi dengan bentuk p.u. yang ada ke dalam p.u. atau besaran dasar yang baru adalah (contoh impedansi urutan Pembangkit I) :

$$Z_{\text{baru}}(\text{p.u.}) = Z_{\text{lama}}(\text{p.u.}) \times \left(\frac{V_{\text{dasar lama}}(\text{kV})}{V_{\text{dasar baru}}(\text{kV})} \right)^2 \times \left(\frac{S_{\text{dasar baru}}(\text{MVA})}{S_{\text{dasar lama}}(\text{MVA})} \right)$$
$$X_1 = 0.221 \times \left(\frac{500}{500} \right)^2 \times \left(\frac{100}{251.75} \right) = 0.221 \times 1 \times 0.3972$$
$$= 0.0878 \text{ p.u.}$$

Sehingga :

$$Z_1 = R_1 + jX_1 = 0 + j0.0878 = j0.0878 \text{ p.u.}$$

$$Z_2 = Z_1 = j0.0878 \text{ p.u.}$$

$$X_0 = 0.111 \times \left(\frac{500}{500}\right)^2 \times \left(\frac{100}{251.75}\right) = 0.111 \times 1 \times 0.3972 = 0.044 \text{ p.u.}$$

Karena Pembangkit I memiliki impedansi pentanahan yang mempengaruhi impedansi urutan nolnya sesuai persamaan $Z_0 = 3Z_N + jX_0$, maka :

$$Z_0 = 3Z_N + jX_0$$

$$Z_0 = 3(0.2) + j0.044 = 0.6 + j0.044 \text{ p.u.}$$

Nilai impedansi urutan setiap komponen pada Sistem Gardu Induk Grati selengkapnya ditunjukkan dalam tabel 4.4.

Tabel 4.4 Nilai Impedansi Urutan Tiap Komponen Pada Sistem Gardu Induk Grati Sebelum Penambahan Pembangkit.

No	Komponen Sistem	Nilai Impedansi (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_{X2})	$j0.0911$	$j0.0911$	$j0.0911$
	Sisi Tegangan Rendah (Z_{Y2})	$j0.0911$	$j0.0911$	$j0.0911$
	Sisi Tegangan Tinggi (Z_{H2})	$-j0.013$	$-j0.013$	$-j0.013$
5	Trafo III, V	$j0.0767$	$j0.0767$	$j0.0767$
6	Trafo Penghubung Rel (T_{IB})	$j0.027$	$j0.027$	$j0.027$
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	$0.00000095 + j0.000021$	$0.00000095 + j0.000021$	$0.00000095 + j0.000021$
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 : Hasil Perhitungan.

Setelah impedansi urutan setiap komponen sistem diketahui, maka langkah selanjutnya adalah menentukan nilai impedansi urutan ekivalen dari rangkaian impedansi urutan sesuai dengan titik dimana gangguan terjadi. Sebagai contoh kasus, ketika gangguan terjadi di titik 1_A (terminal keluaran Pembangkit I), nilai impedansi urutan ekivalen nya berdasarkan perhitungan pada tabel 2.1 Bab II adalah :

$$Z_1 = 0.00000427 + j0.0455 \text{ p.u.}$$

$$Z_2 = Z_1 = 0.00000427 + j0.0455 \text{ p.u.}$$

$$Z_0 = 0.6 + j0.044 \text{ p.u.}$$

Impedansi urutan di atas dimasukkan ke dalam persamaan arus gangguan ke tanah yaitu (contoh gangguan satu fasa ke tanah) :

$$I_f = \frac{3E}{(Z_1 + Z_2 + Z_0)}$$

dengan E adalah tegangan sebesar $1 \angle 0^\circ$ karena dalam bentuk per satuan (p.u.), maka :

$$\begin{aligned} I_f &= \frac{3E}{(Z_1 + Z_2 + Z_0)} \\ &= \frac{3(1\angle 0^\circ)}{((2 \times (0.00000427 + j0.0455)) + 0.6 + j0.044)} \\ &= \frac{3\angle 0^\circ}{0.60000854 + j0.135} \\ &= 4.759 - j1.0705 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

dimana persamaan arus dasar :

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

$$I_{dasar} = \frac{100000}{\sqrt{3}(500)} = 115.47 \text{ A}$$

Sehingga arus gangguan satu fasa ke tanah saat gangguan terjadi di titik 1_A adalah:

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

$$I_f(A) = (4.759 - j1.0705) \times 115.47 = 549.53 - j123.612 A$$

$$= 563.268 A$$

Dengan demikian nilai arus gangguan ke tanah, yaitu arus gangguan satu fasa ke tanah (1 ϕ - G), arus gangguan dua fasa ke tanah (2 ϕ - G) dan arus gangguan tiga fasa ke tanah (3 ϕ - G) di setiap titik gangguan pada Sistem Gardu Induk Grati sebelum penambahan Pembangkit (Gambar 4.1) ditunjukkan pada tabel 4.5.

Tabel 4.5 Nilai Arus Gangguan ke Tanah pada Sistem Gardu Induk Grati Sebelum Penambahan Pembangkit.

Titik Gangguan	Arus Gangguan (A)		
	1 ϕ - G	2 ϕ - G	3 ϕ - G
1 _A	563.268	286.904	7616.343
2.1 _A	547.562	284.422	5388.217
2.2 _A	547.562	284.422	5388.217
3 _A	548.533	284.493	5541.630
4.1 _A	1821.529	947.806	17420.029
4.2 _A	1821.529	947.806	17420.029
5 _A	1825.184	948.071	17958.805
1 _B	4617.788	6211.637	11024.562
2 _B	4620.563	6216.936	11029.545
3 _B	4619.170	6214.166	11027.157
4 _B	13372.812	17608.544	32339.240
5 _B	13369.437	17602.034	32333.398
C ₅₀₀	4621.889	6219.027	11032.386
C ₁₅₀	13374.477	17610.509	32343.521

Sumber : Hasil Perhitungan.

Data arus gangguan dari PLTGU Grati ketika gangguan terjadi di Rel 150 dan 500 kV ditunjukkan pada Tabel 4.6. Arus gangguan pada Tabel 4.6 merupakan arus gangguan simetris atau arus gangguan tiga fasa. Nilai arus gangguan simetris sama dengan arus gangguan tiga fasa ke tanah walaupun terdapat tahanan / impedansi pentahanan pada sistem. Hal ini disebabkan karena

tahanan pentanahan hanya mempengaruhi impedansi urutan Nol (Z_0) sistem, sementara arus gangguan hanya muncul pada rangkaian urutan positif (Z_1) saja. Data Arus Gangguan selengkapnya diberikan pada Lampiran 3.

Tabel 4.6 Data Arus Gangguan PLTGU Grati pada Rel 150 dan 500 kV.

Faulting Point	Voltage (kV)	Impedance % (10 MVA Base)	Factor	Short Circuit Current kA (rms Sym)	Short Circuit Current kA (rms Asym.)
F1	500	0.0608	1.77	19.0	47.6
F2	150	0.1246	1.77	30.9	77.3

Sumber : PLN Pusat Pelayanan Enjiniring : “*Study of Short Circuit Current*”, Hal. 7.

F1 pada Tabel 4.6 adalah gangguan saat terjadi di Rel 500 kV sedangkan F2 adalah gangguan saat terjadi di Rel 150 kV. Batas arus gangguan maksimum yang diterapkan pada PLTGU Grati, khususnya pada sistem 500 kV dan 150 kV menggunakan batas arus gangguan yang diatur dalam SPLN, yaitu sebesar 40,000 A (PLN Pusat Pelayanan Enjiniring : Bab 6.13, Hal. 14).

4.3 Spesifikasi Sub-Sistem Baru

Pembangkit 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 Daya dan Saluran menuju Rel 500 kV. Data desain Pembangkit baru diberikan pada Lampiran 4.

4.3.1 Unit Pembangkit Baru

Unit Pembangkit yang ditambahkan merupakan jenis Pembangkit tenaga gas (GTG). Data-data Unit Pembangkit baru yang diketahui adalah rating daya dan tegangan. Sedangkan data-data lain yang belum diketahui mengacu pada data spesifikasi Pembangkit tenaga gas. Data-data tersebut antara lain :

Rating Daya : 350 MVA
 Rating Tegangan : 21 kV
 Reaktansi Urutan X_1 : 0.214 p.u.

- Reaktansi Urutan X_2 : 0.214 p.u.
- Reaktansi Urutan X_0 : 0.1107 p.u.
- Impedansi Pentanahan Z_N : 500 ohm

4.3.2 Trafo Daya Baru

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

- Rating Daya : 350 MVA
- Rasio Tegangan : 21/500 kV
- Reaktansi Trafo : 11 %

4.3.3 Saluran Baru

Data spesifikasi Saluran Baru mengacu pada data saluran pada Sub-Sistem II karena penempatan Unit Pembangkit baru ini berada di dekat Pembangkit II. Data-data tersebut antara lain :

- Panjang Saluran : 170 m
- Rasio Tegangan : $0.014 + j0.31$ ohm/km
- Reaktansi Trafo : $0.00238 + j0.0527$ ohm

4.4 Perhitungan Arus Gangguan ke Tanah Sesudah Penambahan Pembangkit

4.4.1 Kondisi Titik Netral Sub-Sistem yang Baru Ditanahkan Langsung

Perhitungan arus gangguan ke tanah untuk kondisi yang pertama adalah titik netral sistem yang baru yaitu titik netral Trafo Daya yang baru ditanahkan langsung. Impedansi urutan Sistem Pembangkit baru ditunjukkan pada tabel 4.7.

Tabel 4.7 Nilai Impedansi Urutan Komponen Sub-Sistem Baru.

No	Komponen Baru	Nilai Impedansi (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 : Hasil Perhitungan.

Dengan demikian, nilai arus gangguan ke tanah sesudah adanya penambahan satu Unit Pembangkit ditunjukkan pada tabel 4.8.

Tabel 4.8 Nilai Arus Gangguan ke Tanah Sesudah Penambahan Pembangkit dengan Titik Netral Sub-Sistem yang Baru Ditanahkan Langsung.

Titik Gangguan	Arus Gangguan (A)		
	1 ϕ – G	2 ϕ - G	3 ϕ – G
1 _A	564.468	286.984	8163.515
2.1 _A	549.562	284.568	5716.499
2.2 _A	549.562	284.568	5716.499
3 _A	550.303	284.623	5851.141
4.1 _A	1825.054	948.062	17937.691
4.2 _A	1825.054	948.062	17937.691
5 _A	1828.299	948.298	18450.405
6 _A	570.457	287.790	11183.860
1 _B	6215.903	8438.921	14759.653
2 _B	6221.278	8449.225	14769.353
3 _B	6219.416	8445.498	14766.155
4 _B	14919.760	19234.677	36558.180
5 _B	14915.873	19227.353	36551.442
6 _B	6221.548	8449.602	14769.986
C ₅₀₀	6224.901	8455.565	14776.509
C ₁₅₀	14922.453	19237.869	36565.117

Sumber : Hasil Perhitungan

4.4.2 Kondisi Titik Netral Sistem yang Baru Ditanahkan melalui Tahanan

Perhitungan arus gangguan ke tanah untuk kondisi yang kedua adalah ketika titik netral Sub-Sistem yang baru (titik netral Trafo) ditanahkan melalui tahanan. Tahanan yang digunakan adalah tahanan tinggi 500 ohm. Dengan demikian, besar arus gangguan ke tanah untuk kondisi yang kedua berdasarkan perhitungan ditunjukkan pada tabel 4.9.

Tabel 4.9 Nilai Arus Gangguan ke Tanah Sesudah Penambahan Pembangkit dengan Titik Netral Sub-Sistem yang Baru Ditanahkan melalui Tahanan.

Titik Gangguan	Arus Gangguan (A)		
	$1\phi - G$	$2\phi - G$	$3\phi - G$
1 _A	564.468	286.984	8163.515
2.1 _A	549.562	284.568	5716.499
2.2 _A	549.562	284.568	5716.499
3 _A	550.303	284.623	5851.141
4.1 _A	1825.054	948.062	17937.691
4.2 _A	1825.054	948.062	17937.691
5 _A	1828.299	948.298	18450.405
6 _A	570.457	287.790	11183.860
1 _B	5861.791	7249.513	14759.653
2 _B	5866.534	7257.011	14769.353
3 _B	5864.631	7253.502	14766.155
4 _B	14784.520	18791.449	36558.180
5 _B	14780.631	18784.224	36551.442
6 _B	5865.190	7252.436	14769.986
C ₅₀₀	5869.326	7260.369	14776.509
C ₁₅₀	14787.038	18794.085	36565.117

Sumber : Hasil Perhitungan

4.5 Analisis Hasil Perhitungan

Sebelum adanya penambahan Unit Pembangkit baru, arus gangguan satu fasa ke tanah, dua fasa ke tanah dan tiga fasa ke tanah terbesar (maksimum) yang terjadi pada terminal keluaran Pembangkit (Tabel 4.5), yaitu Pembangkit V (titik 5_A) berturut-turut adalah 1825.184 A, 948.071 A dan 17958.805 A. Arus gangguan satu fasa ke tanah, dua fasa ke tanah dan tiga fasa ke tanah maksimum yang terjadi pada Rel Gardu Induk, yaitu rel 150 kV (titik B₁₅₀) berturut-turut adalah 13374.477 A, 17610.509 A dan 32343.521 A. Dengan demikian, arus gangguan maksimum pada Sistem Gardu Induk Grati sebelum penambahan Unit Pembangkit baru adalah 32343.521 A (Rel 150 kV). Berdasarkan Data Arus Gangguan Simetris PLTGU Grati, nilai arus gangguan pada rel 150 kV adalah 30.9 kA atau 30900 A. Hal ini menunjukkan bahwa arus gangguan hasil perhitungan mendekati dengan keadaan yang sebenarnya.

Sesudah adanya penambahan satu Unit Pembangkit, nilai arus gangguan ke tanah secara umum meningkat Tabel 4.8 menunjukkan bahwa dengan adanya penambahan Unit Pembangkit baru dimana titik netral Sub-Sistem baru ditanahkan langsung, arus gangguan secara umum meningkat. Berdasarkan tabel 4.8, arus gangguan maksimum meningkat menjadi 36565.117 A.

Dengan adanya tahanan pentanahan pada titik netral sistem yang baru, arus gangguan maksimum tidak mengalami perbedaan. Arus gangguan maksimum yang merupakan gangguan tiga fasa ke tanah hanya dipengaruhi oleh impedansi urutan positif (Z_1), sementara Z_1 untuk dua kondisi nilainya sama dan yang berubah hanya nilai impedansi urutan nol nya (Z_0). Berdasarkan Tabel 4.9, arus gangguan maksimum untuk dua kondisi pentanahan titik netral Sub-Sistem yang baru nilainya tetap, yaitu 36565.117 A.

Nilai arus maksimum sangat berpengaruh terhadap rating kerja peralatan, khususnya peralatan pemutus yang berada di titik dimana arus gangguan maksimum terjadi. Arus gangguan maksimum setelah adanya penambahan Unit Pembangkit baru di Grati terjadi pada rel 150 kV dimana terdapat peralatan pemutus yaitu Pemutus Tenaga / PMT (*Circuit Breaker* / CB) dengan spesifikasi sebagai berikut :

Jenis PMT	: GCB
Jenis Gas	: SF ₆
Rating Tegangan	: 170 kV
Rating Arus	: 4000 A
<i>Breaking Current</i>	: 40 kA
Penempatan	: T/R Trafo IBT 500 / 150 kV

Arus pemutusan (*Breaking Current*) PMT pada Rel 150 kV dari data di atas menunjukkan bahwa PMT tersebut bekerja ketika terjadi arus gangguan sebesar 40 kA. Nilai ini didasarkan pada klasifikasi PMT berdasarkan media isolasinya. PMT yang digunakan pada Gardu Induk 150 kV ini merupakan jenis PMT tegangan tinggi dengan media isolasi gas SF₆ yang mempunyai kemampuan memutus arus sampai 40 kA dan digunakan pada range tegangan 35 s/d 245 kV. (berdasarkan SPLN 1.1995 – 3.5). Dari hasil perhitungan arus gangguan, nilai

arus maksimum yang dihasilkan karena adanya penambahan Unit baru, sebesar 36565.117 A, masih di bawah rating *breaking current* dari PMT tersebut. Artinya, bila dibandingkan dengan PMT isolasi minyak yang kemampuan memutus arusnya sampai 10 kA, PMT isolasi SF6 masih dapat menanggung nilai arus maksimum baik sebelum penambahan unit baru (32343.521 A) maupun sesudah penambahan unit baru (36565.117 A). Sehingga peralatan pemutus, dalam hal ini PMT pada Gardu Induk Grati masih dapat bekerja dengan baik.

Walaupun nilai arus gangguan maksimum (tiga fasa ke tanah) dengan menggunakan tahanan pada titik netral Sub-Sistem baru nilainya tetap, kondisi ini dapat menurunkan nilai arus gangguan yang lain, yaitu gangguan satu fasa ke tanah dan tiga fasa ke tanah. Gangguan satu fasa ke tanah dan dua fasa ke tanah merupakan jenis gangguan yang paling sering terjadi pada sistem tenaga. Jika ditinjau dari perbandingan arus gangguan satu fasa ke tanah dan dua fasa ke tanahnya, terjadi penurunan. Pada gangguan satu fasa ke tanah, nilai maksimumnya menurun dari 14922.453 A menjadi 14787.038 A. Sedangkan pada gangguan dua fasa ke tanah, nilai maksimumnya menurun dari 19237.869 A menjadi 18794.085 A. Selisih penurunan terbesar untuk arus gangguan maksimum terjadi pada gangguan dua fasa ke tanah, dengan besar penurunan dalam persen adalah sebagai berikut :

$$\text{Selisih Penurunan} = \frac{\text{Titik Netral Langsung} - \text{Titik Netral dengan Tahanan}}{\text{Titik Netral Langsung}} \times 100\%$$

$$\text{Selisih Penurunan} = \frac{19237.869 - 18794.085}{19237.869} \times 100\%$$

$$\text{Selisih Penurunan} = \frac{443.632}{19237.869} \times 100\% = 2.3\%$$

Jadi, selisih penurunan arus gangguan maksimum dengan menggunakan tahanan pada titik netral Sub-Sistem yang baru mencapai 2.3 %.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan serta analisis perbandingan arus gangguan ke tanah sebelum dan sesudah penambahan Pembangkit, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

- 1) a. Sebelum adanya penambahan Pembangkit, arus gangguan satu fasa ke tanah, dua fasa ke tanah dan tiga fasa ke tanah terbesar (maksimum) yang terjadi pada terminal keluaran Pembangkit, yaitu Pembangkit V berturut-turut adalah 1825.184 A, 948.071 A dan 17958.805 A. Sedangkan arus gangguan maksimum yang terjadi pada Rel Gardu Induk, yaitu rel 150 kV berturut-turut adalah 13374.477 A, 17610.509 A dan 32343.521 A. Dengan demikian, arus gangguan maksimum pada Sistem Gardu Induk Grati sebelum penambahan Unit Pembangkit baru adalah 32343.521 A (Rel 150 kV).
- b. Sesudah adanya penambahan Pembangkit dengan kondisi titik netral Sub-Sistem baru ditanahkan langsung, arus gangguan maksimum meningkat. Arus gangguan maksimum yang terjadi pada terminal keluaran Pembangkit V (titik 5_A) menjadi 1828.299 A (satu fasa ke tanah), 948.298 A (dua fasa ke tanah) dan 18450.405 A (tiga fasa ke tanah). Arus gangguan maksimum yang terjadi pada rel 150 kV (titik B₁₅₀) juga meningkat menjadi 14922.453 A (satu fasa ke tanah), 19237.869 A (dua fasa ke tanah) dan 36565.117 A (tiga fasa ke tanah). Sehingga arus maksimum setelah penambahan Pembangkit dengan titik netral sub-sistem baru ditanahkan langsung meningkat menjadi 36565.117 A.
- 2) Dengan adanya tahanan pentanahan 500 ohm pada titik netral sub-sistem baru, arus gangguan maksimum dibandingkan dengan kondisi titik netral sistem yang baru ditanahkan langsung nilainya tetap, yaitu 36565.117 A. Nilai arus maksimum ini masih di bawah nilai rating

kerja peralatan (PMT), yaitu di bawah 40 kA. Dalam hal ini, PMT masih dapat menanggung nilai arus maksimum sesudah adanya penambahan Unit baru. Walaupun nilai arus maksimum dengan menggunakan tahanan nilainya tetap, jika ditinjau dari perbandingan arus gangguan satu fasa ke tanah dan dua fasa ke tanahnya, terjadi penurunan. Selisih penurunan arus gangguan maksimumnya mencapai 2.3 %. Perbandingan ini lebih diperhitungkan karena gangguan satu fasa ke tanah dan dua fasa ke tanah lebih sering terjadi pada suatu sistem daya listrik.

5.2 Saran

Analisis arus gangguan ke tanah pada Gardu Induk Grati ini dapat dikembangkan dengan memperhitungkan sistem jaringan yang lebih luas (jaringan 150 kV, 500 kV dan Beban) dan menambahkan titik-titik gangguan pada sistem secara keseluruhan.



DAFTAR PUSTAKA

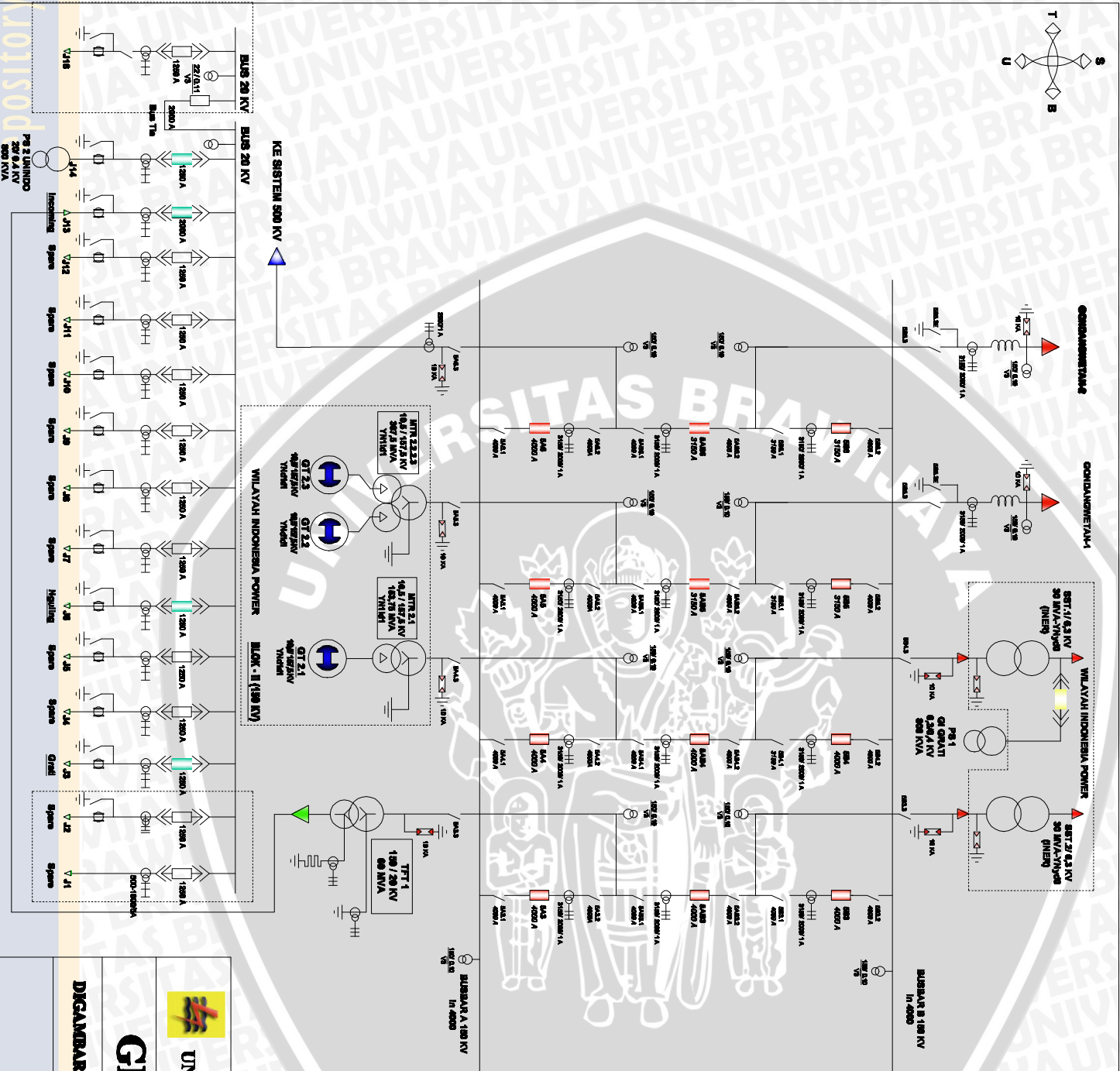
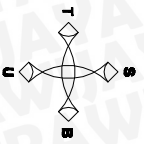
- Anderson, Paul M. 1995. *Analysis of Faulted Power Systems*. IEEE Inc., New York.
- Hidayatulloh, Rachmad. 2012. *Analisa Gangguan Hubung Singkat pada Jaringan SUTT 150 kV Jalur Kebasen – Balapulang – Bumiayu Menggunakan Program ETAP*. Tugas Akhir, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro, Semarang.
- Hutahuruk, T.S. 1999. *Pengetanahan Netral Sistem Tenaga dan Pengetanahan Peralatan*. Jakarta : Penerbit Erlangga.
- IEEE Std. 80. 2000. *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*. USA.
- Irawan, Chandra. 2006. *Studi Analisis Distribusi Arus Gangguan ke Tanah (Ground Fault) pada Sistem Pentanahan Tipe Grid dan Counterpoise di Gardu Induk Blimbing*. Skripsi, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang.
- Kelompok Kerja Standar Konstruksi Distribusi Jaringan Tenaga Listrik. 2010. *Kriteria Desain Enjinering Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik*. PT. PLN (Persero), Jakarta Selatan.
- PLN Pusat Pelayanan Enjinering. 1994. *Grati Combined Cycle Power Plant 1 X 500 MW + 3 X 100 MW Design Manual*. Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.
- Sombolinggi, Nura Dendang. 2008. *Simulasi dan Analisis Pengaruh Distributed Generation Terhadap Peningkatan Arus Hubung Singkat Pada Sistem Distribusi Radial 20 KV Studi Kasus : Penyulang Darmo Permai*. Skripsi, Fakultas Teknologi Industri Universitas Kristen Petra, Surabaya.
- Sulasno. 1993. *Analisa Sistem Tenaga Listrik*. Satya Wacana, Semarang.
- Stevenson, William D., Jr. 1993. Terjemahan : Ir. Kamal Idris. *Analisis Sistem Tenaga Listrik*. Edisi Keempat, Penerbit Erlangga. Jakarta.
- Suyono, Hadi. 2008. *Analisis Gangguan Pada Sistem Daya Elektrik*. Materi Kuliah, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

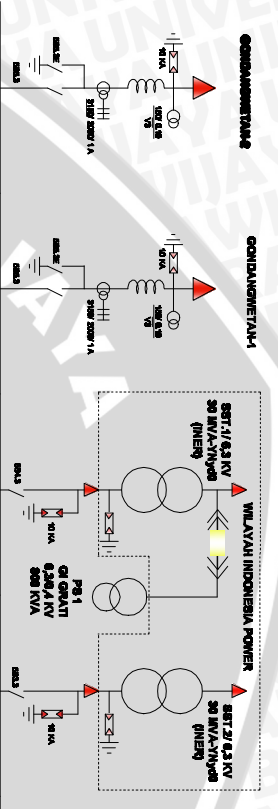
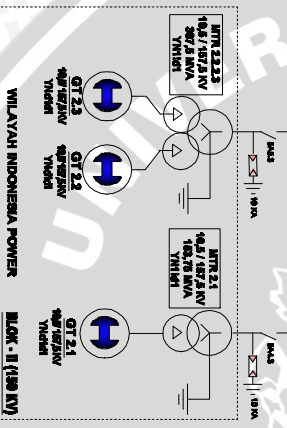
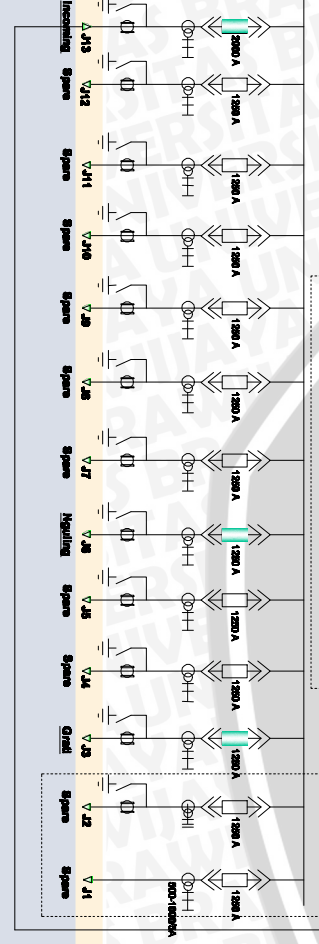
LAMPIRAN 1

DIAGRAM GARIS TUNGGAL GITET GRATI 150 kV DAN 500 kV





PE 2 LINDUNG
20/0.4 kV
800 kVA



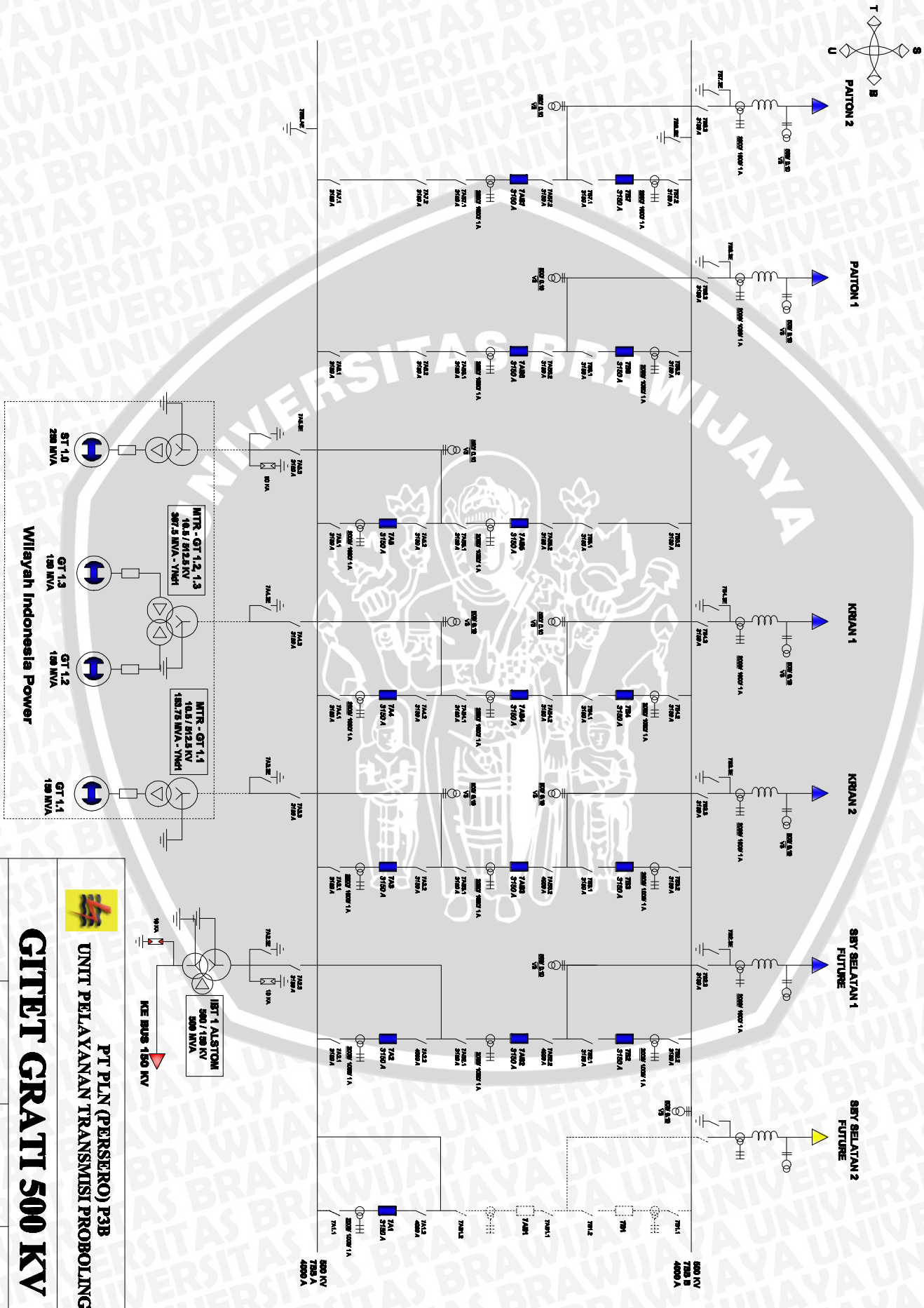


PT PLN (PERSERO) P3B
UNIT PELAYANAN TRANSMISI PROBOINGGO

GITET GRATI 150 KV

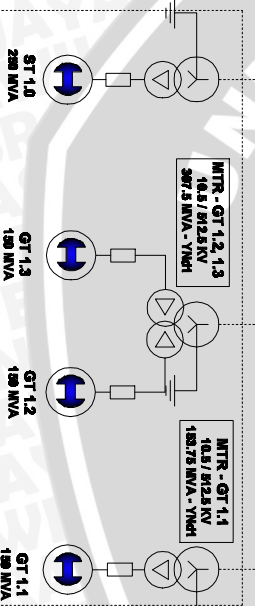
DIGAMBAR	DIPERIKSA	DISTUJUI	REVISI

01-03-2011



BLOK - I (500 KV)

Wilayah Indonesia Power



PT PLN (PERSERO) P3B
UNIT PELAYANAN TRANSMISI PROBOLINGGO

GITET GRATI 500 KV

DIGAMBAR	DIPERIKSA	DSEITUUI	REVISI
----------	-----------	----------	--------

01-03-2011

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



LAMPIRAN 2

SPEKIFIKASI UNIT PEMBANGKIT PLTGU GRATI

Grati CCPP

Gas Turbin Generator

Generator Technical Data

Generator Type	TLRI 108/36
Rating	153.75 MVA
Rated Voltage	10.5 kV
Voltage Variation	+/-5 %
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 %
Neutral Grounding Resistance R_N	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	98.7 %
3/4 Load	98.53 %
2/4 Load	98.08 %
1/4 Load	96.55 %

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 R_N	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 3

ANALISIS DAN DATA ARUS GANGGUAN PLTGU GRATI



1. General

The calculation will be used for checking circuit breaker ratings and cable sizing.

2. Calculation criteria

(1) Impedance

a. Power source impedance seen from station buses toward power system is assumed to be equivalent to followings.

13.4kA for 500kV system (Assumed)	11566MVA
4.8kA for 150kV system (Assumed)	1253MVA

b. The impedance values of transformers and generators are applied to be minimum impedance considering tolerance.

(2) Motor contribution

For interrupting duty and momentary duty calculation of 6.3kV and 380V system the motor contribution is considered.

a. 6.3kV system

The motor impedance values for motor contribution are assumed to be standard value of 15% ~ 19%.

2 poles motor	15%
4 ~ 6 poles motor	18%
4 ~ 12 poles motor	19%

b. 380V system

The motor impedance values for motor contribution are assumed to be standard value of 20%.



(3) System configuration

Followings are assumed in the calculation.

- a. 500kV and 150kV system

All generators in the station are parallel operation.

- b. 6.3kV and 380V system

Starting and unit transformers are operated independently.

3. Impedance data

(1) Equipment

Equipment	Capacity Rating (MVA)	Reactance (%)			Transformation Ratio (kV)	Min. XN of 10MVA base
		X	Max.	Min.		
<u>Transformer</u>						
Station	30	10	11	9	150/6.3	3.0
Gas Turbine GT (Block-I)	153.75	12	13.2	10.8	512.5/10.5	0.702
Gas Turbine GT (Block-II)	153.75	12	13.2	10.8	157.5/10.5	0.702
Steam Turbine GT	250	13.5	14.85	12.15	512.5/15.75	0.486
3 Winding GT for gas turbine (Block-I)	307.5	12 (A-B)	13.2	10.8	512.5/10.5	0.702
		28 (B-C)				
3 Winding GT for gas turbine (Block-II)	307.5	12 (A-B)	13.2	10.8	157.5/10.5	0.702
		28 (B-C)				
Interbus transf.	500	13.5	15	12.15	500/150	0.243
Stem Turbine Unit Transf.	7	7.5	8.25	6.75	15.75/6.3	9.643
Gas Turbine Unit Transf.	0.7	5	5.5	4.5	10.5/0.4	64.29
Station Service PDC	2	8	8.8	7.2	6.0/0.4	36.0
Steam Turbine PDC	2	8.0	8.8	7.2	6.0/0.4	36.0
<u>Generator</u>						
Gas Turbine Gen.	153.8	17.4	—	—	—	1.13
Steam Turbine Generator	251.8	18.0	—	—	—	0.715

Note : Impedance values in parenthesis are those of specified.
 Asterisks show those mentioned that contractor shall determine.
 Impedance map is attached.



- (2) The positive-sequence short-circuit impedances of GT three-winding transformer.

According to IEC 909 clause 8.3.2.2, the impedance is calculated by the following formula.

$$Z_A = \frac{1}{2} (Z_{AB} + Z_{AC} - Z_{BC})$$

$$Z_B = \frac{1}{2} (Z_{BC} + Z_{AB} - Z_{AC})$$

$$Z_C = \frac{1}{2} (Z_{AC} + Z_{BC} - Z_{AB})$$

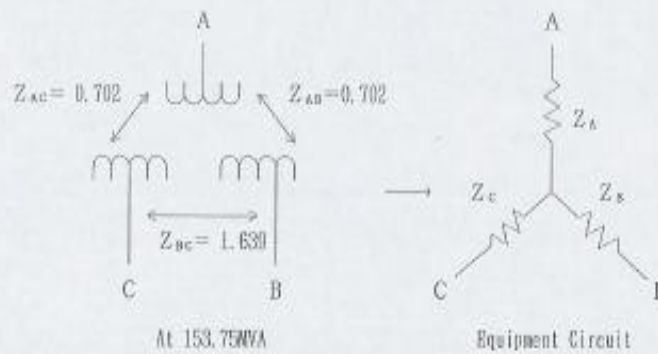
Where, $Z_{AB} = Z_{BA} = 0.702$ and $Z_{AC} = 1.639$ at 153.75MVA base.

Then

$$Z_A = \frac{1}{2} (0.702 + 0.702 - 1.639) = -0.118$$

$$Z_B = \frac{1}{2} (1.639 + 0.702 - 0.702) = 0.820$$

$$Z_C = \frac{1}{2} (0.702 + 1.639 - 0.702) = 0.820$$



(3) Power cables

Voltage	Cable		Impedance (Ω/km)	
	O/H	LINE		
500 kV			0.014	0.31
		DF 1 × 500sq	0.057	0.128
150 kV		CV 1 × 400sq	0.070	0.155
		CV 1 × 1400sq	0.028	0.127
6/10 kV	N2XSBBY	3 × 120sq	0.153	0.0924
	N2XSBBY	3 × 300sq	0.0601	0.0830
0.6/1kV	NYN	1 × 185sq	0.0901	0.070
	NYN	1 × 240sq	0.0754	0.068
	NYN	1 × 300sq	0.0601	0.067
	NYN	1 × 400sq	0.047	0.066
	NYN	1 × 500sq	0.0366	0.065
	NYN	2 × 4sq	5.880	0.119
	NYN	2 × 6sq	3.08	0.111
	NYN	2 × 10sq	1.83	0.092
	NYN	2 × 16sq	1.15	0.085
	NYN	2 × 25sq	0.727	0.082
	NYN	2 × 35sq	0.524	0.079
	NYN	2 × 50sq	0.387	0.076
	NYN	2 × 70sq	0.268	0.074
	NYN	2 × 95sq	0.193	0.072
	NYN	2 × 120sq	0.153	0.070
	NYN	2 × 150sq	0.124	0.070
	NYN	2 × 185sq	0.0901	0.070
	NYN	2 × 240sq	0.0754	0.068
	NYN	2 × 300sq	0.0601	0.067
	NYN	3 × 2.5sq	7.41	0.128
	NYN	3 × 4sq	4.61	0.119
	NYN	3 × 6sq	3.08	0.111
	NYN	3 × 10sq	1.83	0.092
	NYN	3 × 16sq	1.15	0.085
	NYN	3 × 25sq	0.727	0.082
	NYN	3 × 35sq	0.524	0.079
	NYN	3 × 50sq	0.387	0.076
	NYN	3 × 70sq	0.268	0.074
	NYN	3 × 95sq	0.193	0.072
	NYN	3 × 120sq	0.153	0.070
	NYN	3 × 150sq	0.124	0.070
	NYN	3 × 185sq	0.0901	0.070
NYN	3 × 240sq	0.075	0.068	
NYN	4 × 6sq	3.08	0.111	
NYN	4 × 10sq	1.83	0.092	
NYN	4 × 16sq	1.15	0.085	
NYN	4 × 25sq	0.727	0.082	
NYN	4 × 35sq	0.524	0.079	
NYN	4 × 50sq	0.387	0.076	
NYN	4 × 95sq	0.193	0.072	
NYN	4 × 120sq	0.153	0.070	
NYN	4 × 240sq	0.0754	0.068	

ΣZ of overhead line (O/H line) and underground line (U/G line) is as follows.

	CIRCUIT NAME	CABLE LENGTH(m)	CABLE SIZE(mm ²)	IMPEDANCE (Ω /km)		IMPEDANCE (Ω)		ΣZ	
				R	X	R	X	R	X
150kV U/G LINE	SST1	294	400	0.070	0.155	0.0206	0.0456	0.00092	0.00203
	SST2	512	400	0.070	0.155	0.0358	0.0794	0.00159	0.00353
	GT-4	269	400	0.070	0.155	0.0188	0.0417	0.00084	0.00185
	GT-5/6	309	1400	0.028	0.127	0.00865	0.0392	0.00038	0.00174
500kV U/G LINE	ST-1	783	500sq	0.057	0.128	0.0446	0.1002	1.784×10^{-4}	0.0004
500kV O/H LINE	GT-1	175		0.014	0.31	0.00245	0.0543	9.8×10^{-6}	0.0002
	GT-2/3	170		0.014	0.31	0.00238	0.0527	9.5×10^{-6}	0.0002

ΣZ is calculated by the following formula.

$$\Sigma Z = Z(\Omega) \times \frac{P(\text{KVA})}{10V^2(\text{KV})}$$

AT. 10MVA base for 150kV and 500kV

$$\Sigma Z = Z(\Omega) \times \frac{10 \times 1000}{10 \times (150)^2} \quad \text{for 150kV}$$

$$\Sigma Z = Z(\Omega) \times \frac{10 \times 1000}{10 \times (500)^2} \quad \text{for 500kV}$$

According to the above table, resistance portion of ΣZ of 500kV line is negligible comparing with reactance.

4. Results of calculation

SHORT CIRCUIT CURRENT

FAULTING POINT	VOLTAGE (kV)	IMPEDANCE % (10MVA BASE)	FACTOR	SHORT CIRCUIT CAPACITY (MVA)	SHORT CIRCUIT CURRENT kA (RMS SYM)	SHORT CIRCUIT CURRENT k (PEAK, ASY)
P1	500	0,0608	1,77	16454	19,0	47,6
P2	150	0,1246	1,77	8028	30,9	77,3
P3	6	7,776	1,60	128,8	12,4	28,1
P4	6	2,473	1,60	404,3	38,9	88,0
P5	6	2,473	1,60	404,3	38,9	88,0
P6	6	3,564	1,60	280,6	27,0	61,1
P7	0,38	58,65	1,25	17,05	25,9	45,8
P8	0,38	58,21	1,25	17,18	28,1	46,1
P9	0,38	58,89	1,25	16,98	25,8	45,6
P10	0,38	36,70	1,25	27,25	41,4	73,2
P11	0,38	58,65	1,25	17,05	25,9	45,8
P12	0,38	58,45	1,25	17,11	28,0	46,0
P13	0,38	58,89	1,25	16,98	25,8	45,6
P14	0,38	31,85	1,25	31,40	47,7	84,3
P15	0,38	50,47	1,25	19,81	30,1	53,2
P16	0,38	48,85	1,25	20,47	31,1	55,0
P17	0,38	48,85	1,25	20,47	31,1	55,0
P18	0,38	38,65	1,25	25,87	39,3	69,5
P19	0,38	33,18	1,25	30,14	45,8	81,0
P20	0,38	34,51	1,25	29,0	44,0	77,8
P21	0,38	34,51	1,25	29,0	44,0	77,8
P22	0,38	35,09	1,25	28,50	43,3	76,5
P23	0,38	50,48	1,25	19,81	30,1	53,2
P24	0,38	110,473	1,25	9,08	13,8	24,4

KETERANGAN :

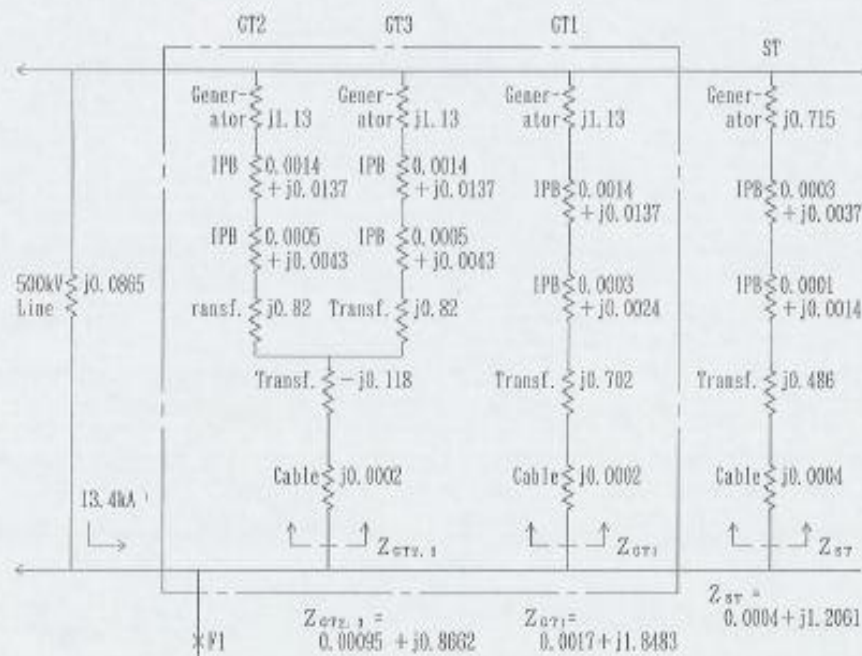
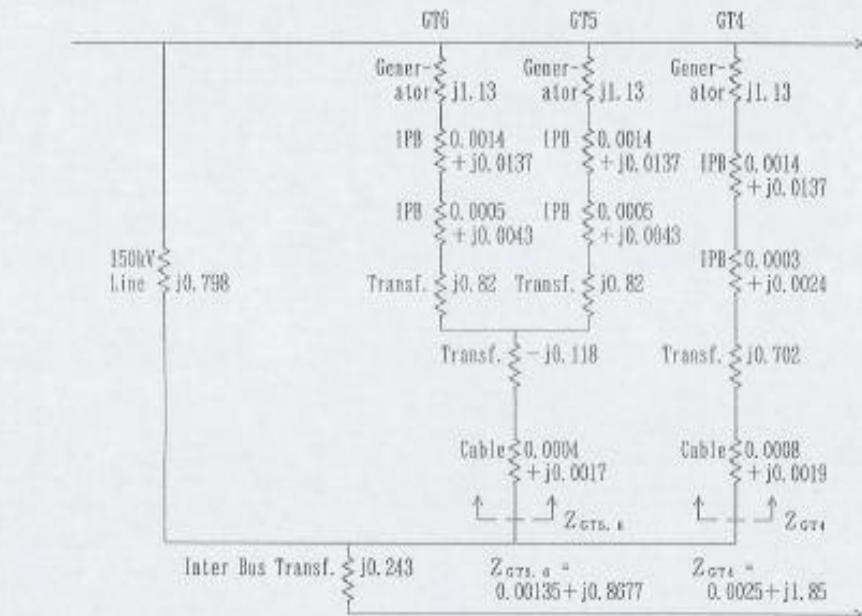


: Data Arus Gangguan yang Terjadi di Gardu Induk



5. Calculation

(1) Short circuit current at 500kV bus F1



N4-00297



(a) The initial symmetrical short circuit current I_k''

1. GT1

$$\frac{10\text{MVA}}{\sqrt{3} \times 500\text{kV} \times (j0.018483)} = 0.625\text{kA}$$

2. GT2 & GT3

$$\frac{10\text{MVA}}{\sqrt{3} \times 500\text{kV} \times (j0.008662)} = 1.333\text{kA}$$

3. ST1

$$\frac{10\text{MVA}}{\sqrt{3} \times 500\text{kV} \times (j0.012061)} = 0.957\text{kA}$$

4. 500kV Line

$$\frac{10\text{MVA}}{\sqrt{3} \times 500\text{kV} \times (j0.00865)} = 13.4\text{kA}$$

5. 150kV System

$$\begin{aligned} Z &= \frac{1}{\frac{1}{Z_{500\text{kV}}} + \frac{1}{Z_{500\text{kV}}} + \frac{1}{Z_{150\text{kV Line}}} } \\ &= \frac{1}{\frac{1}{j0.0185} + \frac{1}{j0.008677} + \frac{1}{j0.00798}} \\ &= j0.00339 \end{aligned}$$

$$\frac{10\text{MVA}}{\sqrt{3} \times 500\text{kV} \times (j0.00339 + j0.00243)} = 1.983\text{kA}$$

Therefore, the initial symmetrical short circuit current I_k'' is

$$\begin{aligned} I_k'' &= (0.625 + 1.333 + 0.957 + 13.4 + 1.983)\text{kA} \\ &= 18.3\text{kA} \end{aligned}$$

Interrupting duty is

$$\sqrt{3} \times 500\text{kV} \times 18.3\text{kA} = 15848\text{MVA}$$

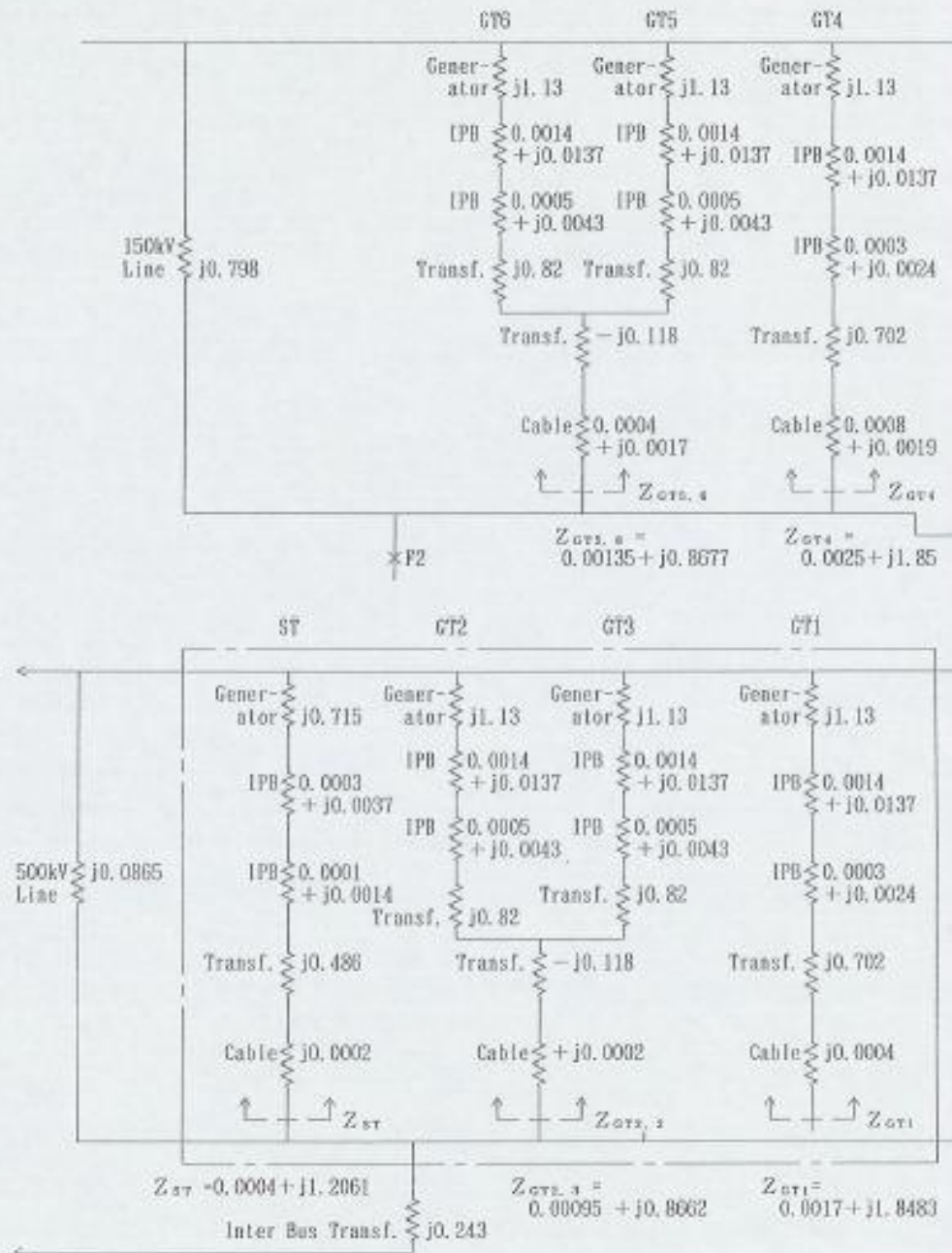
(b) The peak short-circuit current I_p is

$$I_p = I_k' \times 1.77 \times \sqrt{2}$$

$$= 18.3 \times 1.77 \times \sqrt{2}$$

$$= 45.8\text{kA}$$

(2) Short circuit current at 150kV bus F2



(a) The initial symmetrical short circuit current I_{sc}''

1. G14

$$\frac{10\text{MVA}}{\sqrt{3} \times 150 \times (j0.0185)} = 2.081\text{kA}$$

2. G15 & G16

$$\frac{10\text{MVA}}{\sqrt{3} \times 150 \times (j0.008877)} = 4.435\text{kA}$$

3. 150kV Line

$$\frac{10\text{MVA}}{\sqrt{3} \times 150 \times (j0.00798)} = 4.823\text{kA}$$

4. 500kV System

$$\begin{aligned} Z &= \frac{1}{\frac{1}{Z_{G1}} + \frac{1}{Z_{G1,2}} + \frac{1}{Z_{G1}} + \frac{1}{Z_{150kV \text{ LINE}}}} \\ &= \frac{1}{\frac{1}{j0.018481} + \frac{1}{j0.008862} + \frac{1}{j0.012061} + \frac{1}{j0.000805}} \\ &= j0.000738 \end{aligned}$$

$$\frac{10\text{MVA}}{\sqrt{3} \times 150 \times (j0.000738 + j0.00243)} = 19.258\text{kA}$$

Therefore, the initial symmetrical short circuit-current I_{sc}'' is

$$\begin{aligned} I_{sc}'' &= (2.081 + 4.435 + 4.823 + 19.258)\text{kA} \\ &= 30.9\text{kA} \end{aligned}$$



LAMPIRAN 4

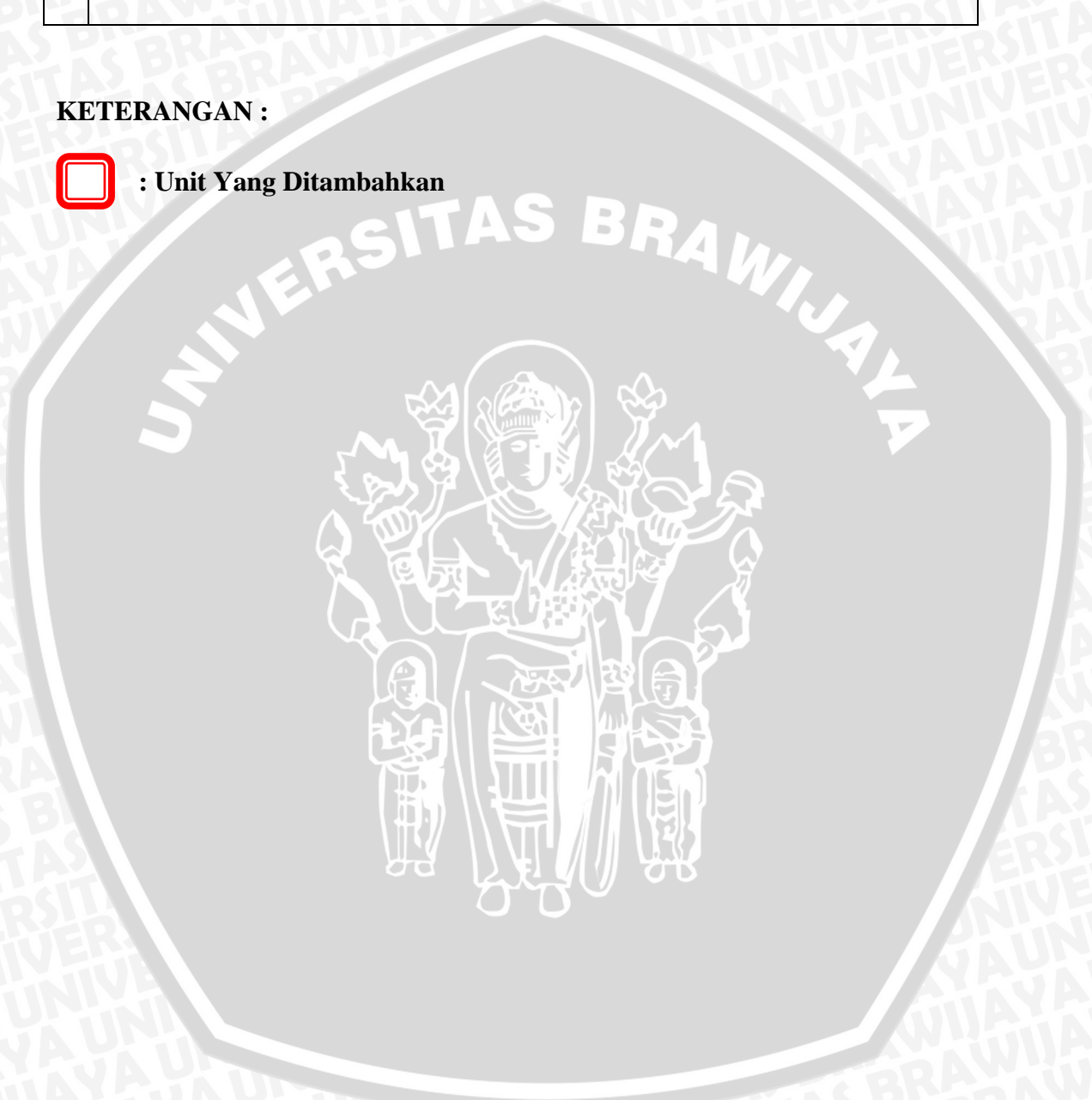
DATA DESAIN PEMBANGKIT BARU PLTGU GRATI

DATA DESAIN PEMBANGKIT

#PLTGU Grati (400 – 500MW)

1.	DATA PEMBANGKIT BARU
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 / 500 kV ; 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 = 12% (Gas Turbine) 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

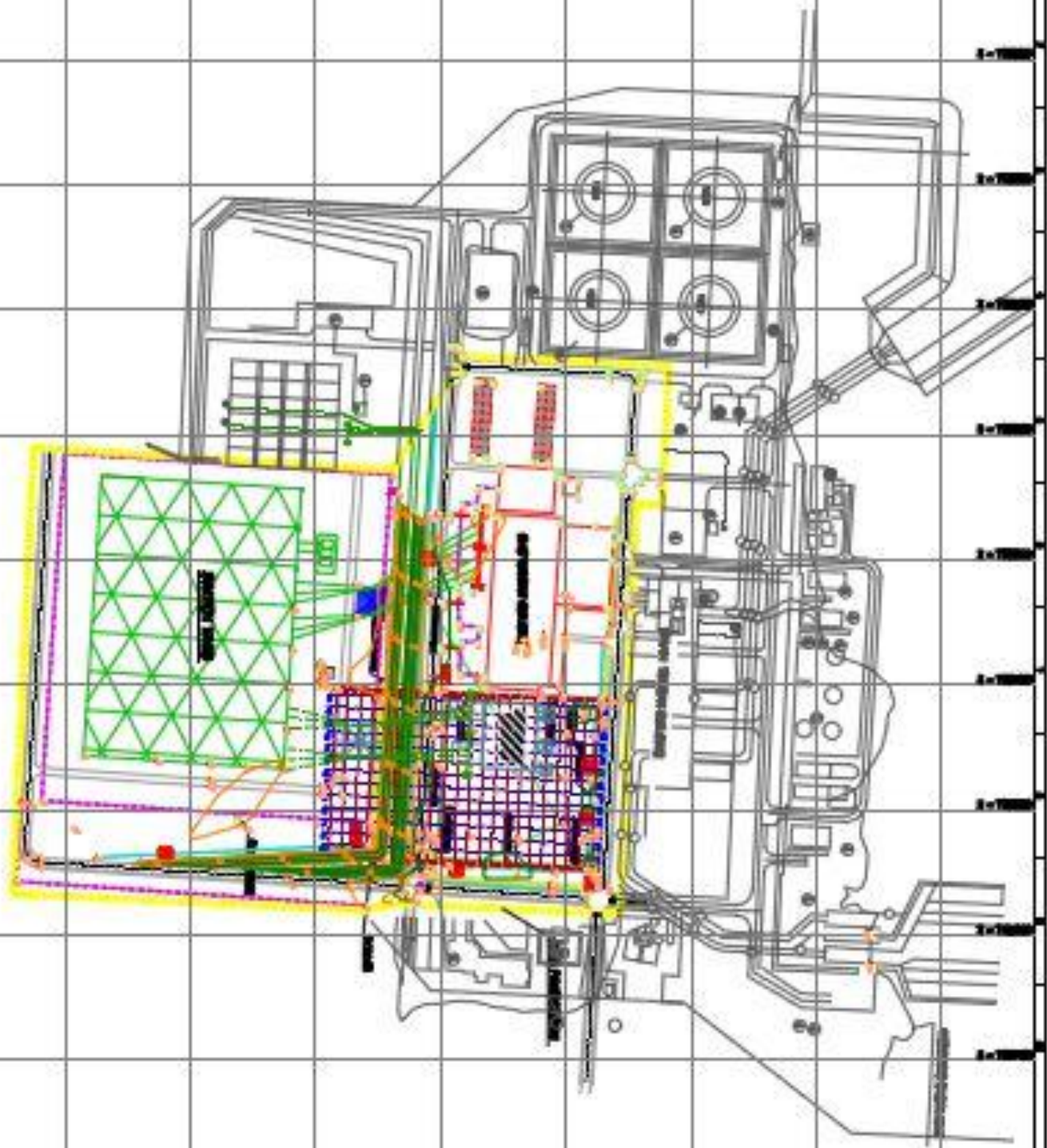
KETERANGAN :**: Unit Yang Ditambahkan**

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

LAMPIRAN 5

LAY OUT PENEMPATAN UNIT PEMBANGKIT BARU
DI PLTGU GRATI





<p>Project Name: [REDACTED]</p> <p>Client: [REDACTED]</p> <p>Scale: 1:100</p>			<p>Architect: [REDACTED]</p> <p>Structural Engineer: [REDACTED]</p> <p>Electrical Engineer: [REDACTED]</p> <p>Plumbing Engineer: [REDACTED]</p>	<p>Legend:</p> <ul style="list-style-type: none"> Red: [REDACTED] Green: [REDACTED] Blue: [REDACTED] Yellow: [REDACTED] Orange: [REDACTED] Purple: [REDACTED] Black: [REDACTED]
<p>Date: [REDACTED]</p> <p>Sheet No: [REDACTED]</p>				

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

LAMPIRAN 6

**DOKUMEN ADMINISTRASI PENGAMBILAN DATA
DI PT. INDONESIA POWER UB PERAK DAN GRATI**



UNIT BISNIS PEMBANGKITAN PERAK - GRATI

Jl. Raya Surabaya - Probolinggo Km.73 PO. Box 11, Grati 67184
Desa Wates, Kecamatan Lekok Kabupaten Pasuruan
Telepon : (0343) 413582, 413583
Facsimile : (0343) 413693, 413524, 425588
Bank : Bank Negara Indonesia 1946(Persero) Tanjung Perak



Nomor : **Db / 32 / UBPPGT / 2013**
Lampiran : -
Perihal : Pengambilan data Kuisioner
PT Indonesia Power UBP Perak
& Grati

Pasuruan, 02 September 2013

Kepada Yth :

Dekan
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Brawijaya
Jl. Mayjen Haryono no.167 Malang 65145

Menindaklanjuti surat Saudara,

Nomor : 1781 / UN10.6/AK/2013

Perihal : Pengambilan data Sistem Pembangkit untuk penyusunan skripsi

Dengan ini disampaikan bahwa pada prinsipnya kami menyetujui permohonan saudara untuk melaksanakan pengambilan data sistem pembangkit untuk penyusunan skripsi, dengan nama mahasiswa sbb :

REG	NAMA	JURUSAN	Lokasi Praktek
1	Ignatius Agung Pratama	Teknik Elektro	Pemeliharaan Listrik
2	Galuh Indra Permadi	Teknik Elektro	Pemeliharaan Listrik

Dengan ketentuan sebagai berikut :

- Jadwal praktek kerja tanggal : **10 & 17 September 2013**
- Perusahaan tidak memberikan fasilitas antar jemput / bantuan uang transport, penginapan, uang makan, uang saku maupun asuransi kecelakaan.
- Siswa datang langsung ke Bidang Humas Unit Bisnis Pembangkitan Perak & Grati dengan membawa copy surat ini yang telah dicap kampus / sekolah.

Siswa diwajibkan:

- 1 Melaksanakan praktek kerja sesuai dengan jadwal yang telah ditetapkan dan mentaati peraturan yang berlaku di perusahaan.
- 2 Membawa pakaian kerja lapangan, safety shoes, helm dan pakaian olah raga.
- 3 Menyerahkan foto berwarna ukuran 4x 6 sebanyak 2 (dua) lembar.
- 4 Membuat laporan praktek kerja lapangan.

Demikian disampaikan, atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

GENERAL MANAGER

Ir. MUHAMMAD MURSID



Pasuruan, 05 September 2013

Kepada :

Dekan Fakultas Teknik Elektro
Universitas Brawijaya
Jl. Mayjen Haryono No. 167
di
Malang 65145

DAFTAR PENGANTAR
No. : 475.DP/082/UBPPGT/2013

Bersama ini kami sampaikan surat - surat / dokumen sebagai berikut :

NO.	TANGGAL	NOMOR SURAT	PERIHAL	KET.
1	02/09/2013	56/32/UBPPGT/2013	Up. Dekan - Pengambilan Data Kuisiner PT Indonesia Power UBP Perak & Grati	



Diterima Tanggal

06 / 09 / 2013

Nama terang / cap dinas

Harap lembar **SALINAN** dikirim kembali / di-fac ke nomor : (0343) 413693 / 413524



Pelaksana Kesekretariatan

Erika Ardianti

ASLI