

**EVALUASI KOORDINASI RELE JARAK PADA
GARDU INDUK SEMANU SETELAH DIBANGUNNYA
GARDU INDUK PIYUNGAN**

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

SUHARTI HAJAR

NIM. 115060301111002 - 63

KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2015

LEMBAR PERSETUJUAN

EVALUASI KOORDINASI RELE JARAK PADA
GARDU INDUK SEMANU SETELAH DIBANGUNNYA
GARDU INDUK PIYUNGAN

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

SUHARTI HAJAR

NIM. 115060301111002 - 63

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Drs. Ir. Moch. Dhofir, M.T.
NIP. 19600701 199002 1 001

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

LEMBAR PENGESAHAN

**EVALUASI KOORDINASI RELE JARAK PADA
GARDU INDUK SEMANU SETELAH DIBANGUNNYA
GARDU INDUK PIYUNGAN**

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh :

SUHARTI HAJAR

NIM. 115060301111002 - 63

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
Tanggal 10 Juli 2015

Majelis Penguji :

Ir. Wijono, M.T. Ph.D.
NIP. 19621111 198003 1 003

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

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

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Elektro

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

PENGANTAR

Alhamdulillah robbil ‘aalamiin, skripsi dengan judul “**Evaluasi Koordinasi Rele Jarak Pada Gardu Induk Semanu Setelah Dibangunnya Gardu Induk Piyungan**” dapat diselesaikan. Skripsi ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Elektro Konsentrasi Teknik Energi Elektrik Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.

Tidak banyak yang bisa disampaikan kecuali ungkapan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah memberikan bimbingan, arahan dan dukungan sehingga penulisan skripsi ini dapat terselesaikan. Dengan rasa hormat, disampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak M. Azis Muslim, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Jurusan, Bapak Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D. selaku Sekretaris Jurusan, dan Bapak Ali Mustofa, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.
2. Ibu Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc. selaku Ketua Kelompok Dosen Keahlian Teknik Energi Elektrik Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.
3. Bapak Drs. Ir. Moch. Dhofir, M.T. dan Bapak Ir. Hery Purnomo, M.T. selaku dosen pembimbing akademik dan dosen pembimbing skripsi yang telah banyak memberikan pengarahan dan bimbingan dalam penyelesaian skripsi ini serta atas segala bentuk bantuan dan saran yang membangun.
4. Bapak Ir. Hery Purnomo, M.T. selaku dosen pembimbing skripsi yang telah banyak memberikan pengarahan dan bimbingan dalam penyelesaian skripsi ini serta atas segala bentuk bantuan dan saran yang membangun.
5. Bapak/Ibu dosen serta karyawan Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.
6. Kedua orang tua tercinta, Bunda dan Bapak yang telah mendidik, memberi kasih sayang, perhatian, motivasi dan selalu memanjatkan do’a yang tidak pernah terputus.
7. Mbak Titie, Mbak Santi, dan Kak Sultan tercinta, terima kasih atas kasih sayang, do’a, dan selalu memberikan semangat serta dukungan.

8. Seluruh staf PT. PLN (Persero) Area Pelaksana Distribusi DI Yogyakarta dan Area Pelaksana Distribusi Jawa Tengah dan DI Yogyakarta yang telah banyak memberi bantuan pada penyusunan skripsi ini.
9. Teman-teman Radar Icon, teman-teman Angkatan 2011 (INVERTER '11), teman-teman Konsentrasi Teknik Energi Elektrik, teman-teman Laboratorium Mesin Elektrik dan teman-teman Himpunan Mahasiswa Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang. Terima kasih atas semua bantuan dan pertolongannya, do'a, canda tawa, selalu memberikan semangat dan semua bantuannya dalam penyusunan skripsi ini, tanpa kalian skripsi ini tidak dapat terselesaikan.
10. Semua pihak yang telah memberikan bantuan serta dukungan, baik yang tidak dapat disebutkan satu persatu secara langsung maupun tidak langsung atas penyusunan skripsi ini.

Disadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini banyak kekurangan dan kelemahan karena keterbatasan ilmu dan kendala-kendala lain yang terjadi selama pengerjaan skripsi ini, oleh karena itu diperlukan saran dan kritik dari semua pihak untuk perbaikan dan kesempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat memberi manfaat dan dapat digunakan untuk pengembangan lebih lanjut.

Malang, Juli 2015

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR PERSETUJUAN	i
PENGANTAR	ii
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR LAMPIRAN	x
RINGKASAN	xi
SUMMARY	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Manfaat.....	3
1.6 Sistematika Pembahasan Hasil Skripsi	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Saluran Transmisi.....	5
2.2 Sistem Proteksi Tenaga Listrik	6
2.3 Rele Pengaman	7
2.4 Syarat-Syarat Rele Pengaman	8
2.4.1 Kecepatan Bereaksi.....	9
2.4.2 Kepekaan	9
2.4.3 Selektivitas.....	9
2.4.4 Keandalan	10
2.4.5 Ekonomis	10
2.5 Rele Jarak	10
2.6 Prinsip Rele Jarak.....	10
2.7 Perhitungan Impedansi	13
2.7.1 Sistem Per Unit (pu)	13
2.7.2 Impedansi Transformator.....	14
2.7.3 Impedansi Urutan Komponen.....	14
2.7.3.1 Impedansi Urutan Transformator Daya.....	15
2.7.3.2 Impedansi Urutan Saluran Transmisi.....	15
2.8 Zona Proteksi.....	16



2.8.1	Setelan Zona 1	16
2.8.2	Setelan Zona 2	17
2.8.3	Setelan Zona 3	18
2.8.4	Faktor Pengali	19
2.9	Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat	20
2.9.1	Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa	20
2.9.2	Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah.....	21

BAB III METODE PENELITIAN 24

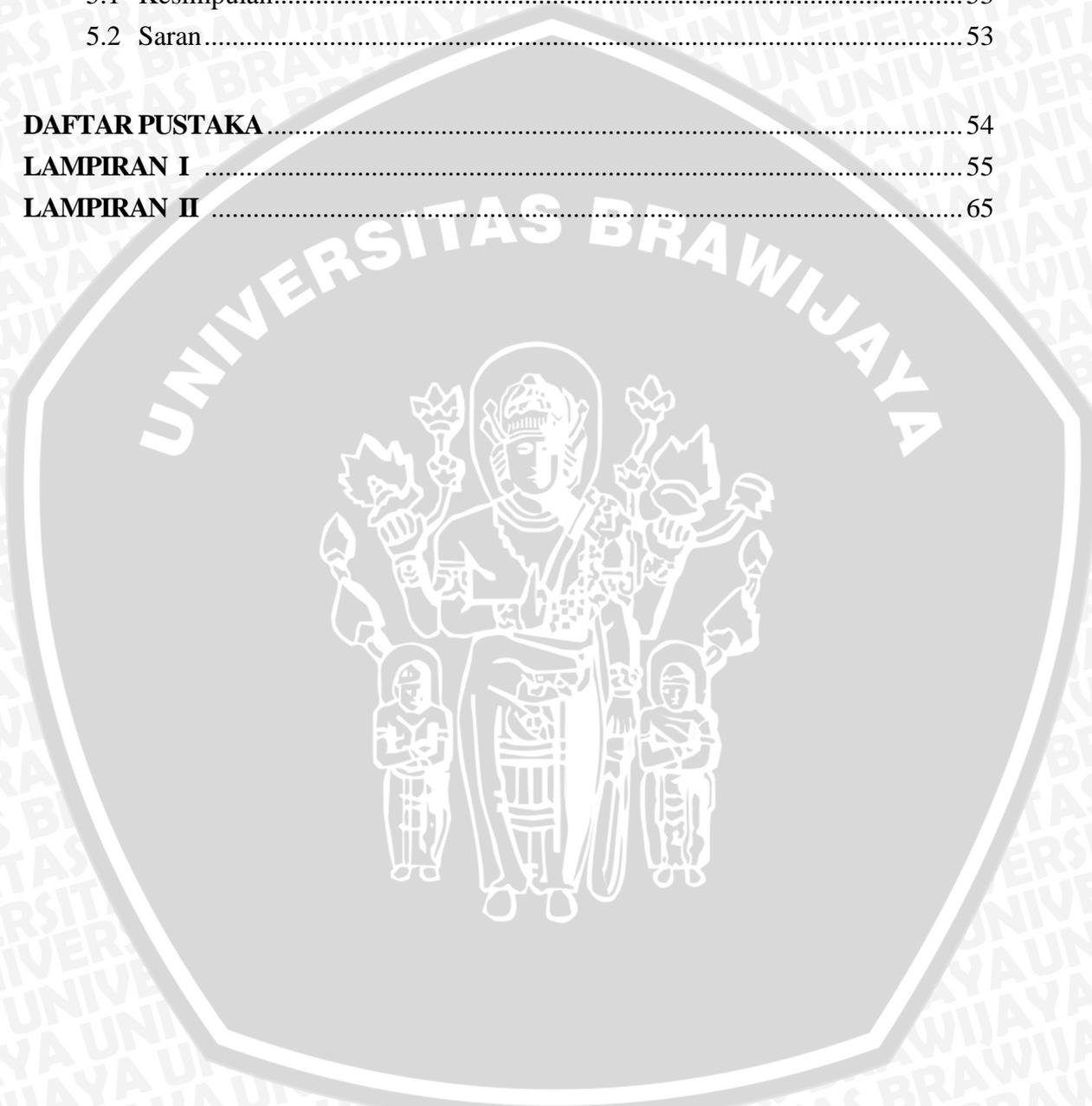
3.1	Pengambilan Data	25
3.2	Data Sekunder	25
3.3	Prosedur Perhitungan	25
3.4	Penutup.....	27

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 28

4.1	Kondisi Sebelum Dibangunnya Gardu Induk Piyungan	28
4.2	Gardu Induk Semanu.....	30
4.3	Perhitungan Penyetelan Rele Jarak Sebelum Gardu Induk Piyungan	31
4.3.1	Perhitungan Impedansi Transformator Daya.....	31
4.3.2	Perhitungan Impedansi Saluran Transmisi	32
4.3.3	Perhitungan Penyetelan Rele Jarak.....	33
4.3.3.1	Faktor Pengali	33
4.3.3.2	Penyetelan Zona 1	33
4.3.3.3	Penyetelan Zona 2	34
4.3.3.4	Penyetelan Zona 3	35
4.3.4	Perhitungan Gangguan Hubung Singkat.....	36
4.3.4.1	Menghitung Arus Dasar	36
4.3.4.2	Menghitung Impedansi Dasar	37
4.3.4.3	Menghitung Impedansi Saluran	37
4.3.4.4	Menghitung Impedansi Total	37
4.3.4.5	Menghitung Arus Gangguan Hubung Singkat	37
4.3.4.6	Menghitung Impedansi Gangguan Yang Terbaca Rele	39
4.4	Perhitungan Penyetelan Rele Jarak Setelah Gardu Induk Piyungan	43
4.4.1	Perhitungan Impedansi Transformator Daya.....	43
4.4.2	Perhitungan Impedansi Saluran Transmisi	44
4.4.3	Perhitungan Penyetelan Rele Jarak.....	44
4.4.2.1	Penyetelan Zona 1	45
4.4.2.2	Penyetelan Zona 2	45

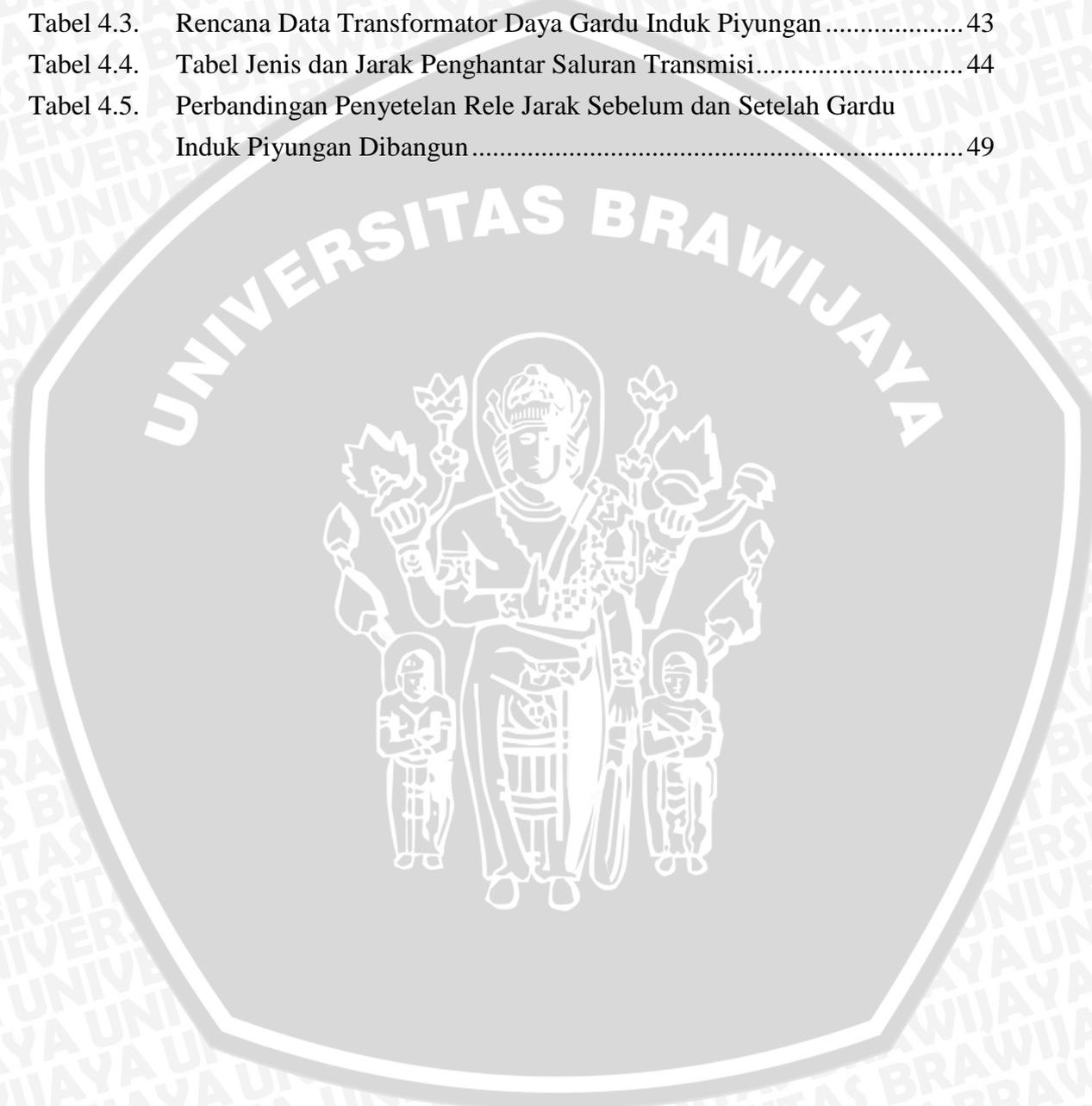


4.4.2.3 Penyetelan Zona 3	46
4.4.4 Perhitungan Gangguan Hubung Singkat.....	47
4.5 Evaluasi Koordinasi Rele Jarak Sebelum dan Setelah Dibangunnya.....	49
BAB V PENUTUP	53
5.1 Kesimpulan.....	53
5.2 Saran.....	53
DAFTAR PUSTAKA	54
LAMPIRAN I	55
LAMPIRAN II	65



DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 4.1	Data Transformator Daya Gardu Induk Bantul	31
Tabel 4.2.	Tabel Jenis dan Jarak Penghantar Saluran Transmisi.....	32
Tabel 4.3.	Rencana Data Transformator Daya Gardu Induk Piyungan	43
Tabel 4.4.	Tabel Jenis dan Jarak Penghantar Saluran Transmisi.....	44
Tabel 4.5.	Perbandingan Penyetelan Rele Jarak Sebelum dan Setelah Gardu Induk Piyungan Dibangun	49



DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Prinsip Kerja Rele Jarak	11
Gambar 2.2	Konstruksi Sederhana Rele Jarak	11
Gambar 2.3	Prinsip Kerja Rele Jarak Ketika Terjadi Gangguan.....	12
Gambar 2.4	Zona Proteksi Rele Jarak	16
Gambar 2.5	Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa	20
Gambar 2.6	Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa	21
Gambar 3.1.	Diagram Alir Penelitian.....	24
Gambar 4.1	Konfigurasi Jaringan Sub Sistem Wilayah Kerja DCC Yogyakarta	28
Gambar 4.2	Konfigurasi Jaringan Gardu Induk Semanu arah Bantul.....	29
Gambar 4.3	Konfigurasi Jaringan Gardu Induk Semanu Setelah Gardu Induk Piyungan Dibangun	30
Gambar 4.4	Diagram Satu Garis Saluran Transmisi Semanu – Bantul Dengan Berbagai Titik Lokasi Gangguan.....	36
Gambar 4.5	Grafik Perbandingan Arus Gangguan Terhadap Lokasi Gangguan Sebelum GI Piyungan Dibangun	39
Gambar 4.6	Grafik Perbandingan Impedansi Gangguan Terhadap Lokasi Gangguan Sebelum GI Piyungan Dibangun.....	41
Gambar 4.7	Koordinasi Rele Jarak Gardu Induk Semanu – Gardu Induk Bantul	42
Gambar 4.8	Grafik Perbandingan Arus Gangguan Terhadap Lokasi Gangguan Setelah GI Piyungan Dibangun	47
Gambar 4.9	Grafik Perbandingan Impedansi Gangguan Terhadap Lokasi Gangguan Setelah GI Piyungan Dibangun.....	48
Gambar 4.10	Koordinasi Rele Jarak Gardu Induk Semanu-Gardu Induk Piyungan	49
Gambar 4.11	Grafik Diagram Waktu Kerja Rele Sebelum Dibangunnya Gardu Induk Piyungan.....	51
Gambar 4.12 Grafik Diagram Waktu Kerja Rele Setelah Dibangunnya Gardu Induk Piyungan.....	51

DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul	Halaman
Lampiran I.1	Penyederhanaan Rangkaian Ekuivalen Urutan	56
Lampiran I.2	Tabel Hasil Perhitungan Impedansi Saluran Transmisi Urutan Positif, Negatif dan Nol Sebelum Gardu Induk Piyungan Dibangun	58
Lampiran I.3	Tabel Hasil Perhitungan Impedansi Total Urutan Positif, Negatif dan Nol Sebelum Gardu Induk Piyungan Dibangun	58
Lampiran I.4	Tabel Hasil Perhitungan Konstanta Urutan Positif, Negatif dan Nol Sebelum Gardu Induk Piyungan Dibangun	59
Lampiran I.5	Tabel Hasil Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat Sebelum Gardu Induk Piyungan Dibangun	60
Lampiran I.6	Tabel Hasil Perhitungan Arus, Tegangan dan Impedansi Gangguan Hubung Singkat Yang Terdeteksi Oleh Rele Jarak Sebelum Gardu Induk Piyungan Dibangun	60
Lampiran I.7	Tabel Hasil Perhitungan Impedansi Saluran Transmisi Urutan Positif, Negatif dan Nol Setelah Gardu Induk Piyungan Dibangun	61
Lampiran I.8	Tabel Hasil Perhitungan Impedansi Total Urutan Positif, Negatif dan Nol Setelah Gardu Induk Piyungan Dibangun	61
Lampiran I.8	Tabel Hasil Perhitungan Konstanta Urutan Positif, Negatif dan Nol Setelah Gardu Induk Piyungan Dibangun	62
Lampiran I.9	Tabel Hasil Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat Setelah Gardu Induk Piyungan Dibangun	63
Lampiran I.10	Tabel Hasil Perhitungan Arus, Tegangan dan Impedansi Gangguan Hubung Singkat Yang Terdeteksi Oleh Rele Jarak Setelah Gardu Induk Piyungan Dibangun	63
Lampiran I.11	Tabel Hasil Perhitungan Setelah Impedansi Rele Jarak Berdasarkan Saluran Yang Diamankan.....	64
Lampiran II.1	Impedansi Sumber Gardu Induk Region Jawa Tengah & D.I. Yogyakarta 2015	66
Lampiran II.2	Data Kawat Penghantar Gardu Induk Region Jawa Tengah & D.I. Yogyakarta 2015	67
Lampiran II.3	Data Transformator Gardu Induk Region Jawa Tengah & D.I. Yogyakarta 2015	67
Lampiran II.4	Data CT & PT Gardu Induk Bantul & Semanu 2014.....	67
Lampiran II.5	Data Rencana Pembangunan Gardu Induk Piyungan.....	68

RINGKASAN

Suharti Hajar, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juli 2015, *Evaluasi Koordinasi Rele Jarak Pada Gardu Induk Semanu Setelah Dibangunnya Gardu Induk Piyungan*, Dosen Pembimbing: Drs. Ir. Moch. Dhofir, M.T. dan Ir. Hery Purnomo, M.T.

Pembangunan gardu induk baru direncanakan di wilayah Sendangsari, Kabupaten Bantul. Pembangunan gardu induk ini sudah pasti mempengaruhi sistem tenaga listrik terkait. Untuk menjaga kontinuitas penyaluran energi listrik menuju konsumen, diperlukan sistem proteksi seperti rele jarak yang berfungsi sebagai pengaman sistem saluran transmisi 150 kV. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dan menganalisis penyetulan serta koordinasi rele jarak pada Gardu Induk Semanu setelah dibangun gardu induk baru yaitu, Gardu Induk Piyungan. Pada penelitian ini, dilakukan analisis gangguan hubung singkat tiga fasa dan satu fasa ke tanah pada beberapa titik tertentu saluran transmisi untuk mengetahui nilai impedansi yang terdeteksi oleh rele saat terjadi gangguan. Sebelum melakukan analisis gangguan hubung singkat, terlebih dahulu perlu dihitung setelan impedansi rele jarak. Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh hasil yaitu, nilai impedansi gangguan hubung singkat yang terdeteksi oleh rele pada 80% saluran yaitu sebesar 3,4946 Ω . Nilai impedansi gangguan lebih kecil dibandingkan impedansi setelan pada Zona 1 yaitu 3,4946 Ω yang menunjukkan rele bekerja dengan selektif. Setelah gardu induk piyungan dibangun, nilai setelan impedansi Zona 1 berubah menjadi 1,7043 Ω dan setelan waktu kerja rele menjadi lebih cepat. Nilai impedansi gangguan hubung singkat yang terdeteksi oleh rele juga lebih kecil dibandingkan impedansi setelan, menandakan rele tetap dapat bekerja dengan selektif dan cepat setelah pembangunan Gardu Induk Piyungan dengan setelan lama maupun baru.

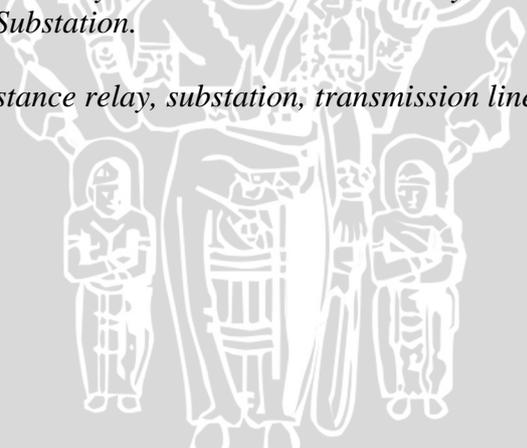
Kata kunci—evaluasi, rele jarak, gardu induk, saluran transmisi.

SUMMARY

Suharti Hajar, Departement of Electrical Engineering, Faculty of Engineering University of Brawijaya, Juli 2015, *Evaluation of Distance Relay Coordination at Semanu Substation After Construction of Piyungan Substation*, Academic Supervisor: Drs. Ir. Moch. Dhofir, M.T. and Ir. Hery Purnomo, M.T.

Planned construction of a new substasion is in the area Sendangsari, Bantul, this substation construction is affecting the related electrical power systems. To maintain continuity of distribution of electrical energy towards the consumer, protection system such as distance relay is required to protect the 150kV transmission line. This research aims to evaluate and analyze the setting and coordination of distance relay at Semanu substation after the construction of the new substation that is Piyungan substation. In this research, compute analysis of three phase short circuit and single phase to ground at certain point of the transmission line to determine the impedance value detected by the relay when fault occurs. Prior to analyze short circuit, previously calculated the impedance setting of distance relay. Based on the calculation, short circuit impedance detected by the relay at 80% of transmission line is equal to 3,4946 Ω . This fault impedance value is smaller than the setting impedance Zone 1 that is 3,4946 Ω , showing relay works selectively. After the construction of Piyungan substation, the value of setting impedance Zone 1 turned into 1,7043 Ω and setting of relay working time becamose faster. Short circuit impedance value detected by the relay is also smaller than the impedance setting, indicate relay can still work selectively and fast even after the construction of Piyungan Substation.

Keywords—evaluation, distance relay, substation, transmission line.



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik merupakan salah satu unsur utama pendukung kehidupan sehari-hari manusia. Hampir seluruh aktivitas manusia membutuhkan energi listrik, ditambah perkembangan zaman yang pesat dimana hampir seluruh peralatan membutuhkan suplai listrik. Populasi penduduk yang semakin tahun terus bertambah mengakibatkan kebutuhan akan energi listrik juga bertambah. Tidak hanya penduduk, permintaan dari industri juga terus meningkat tiap tahunnya. Oleh karena itu dibutuhkan pengembangan sistem tenaga listrik termasuk penyediaan sumber tenaga listrik, maupun sistem distribusinya.

Gardu induk merupakan salah satu komponen sistem tenaga listrik yang memerlukan pengembangan. Gardu induk sendiri merupakan sistem yang menyalurkan energi listrik langsung ke konsumen melalui saluran transmisi serta penyulang (*feeder*). Semakin bertambahnya permintaan konsumen listrik maka semakin besar pula beban listrik yang harus ditanggung oleh gardu induk. Beban listrik yang ditanggung oleh gardu induk tidak boleh melebihi kapasitasnya, jika tidak maka gardu induk akan mengalami kelebihan beban atau biasa disebut *overload*. Apabila hal ini terjadi, besar kemungkinan suplai listrik menuju konsumen dapat terhenti. Untuk mencegah kemungkinan terjadinya hal tersebut, maka perlu dilakukan penambahan gardu induk baru.

Pembangunan gardu induk baru direncanakan di wilayah Desa Sendangsari, Kecamatan Pajangan, Kabupaten Bantul, Jawa Tengah. Kebutuhan listrik yang semakin meningkat menyebabkan penyulang gardu induk sekitar menanggung beban yang cukup tinggi. Oleh karena itu dibutuhkan pembangunan gardu induk baru yang nantinya juga dapat mensuplai listrik Kecamatan Piyungan (Kabupaten Bantul) yang saat ini sedang dikembangkan menjadi kawasan industri dan pusat perkampungan. Rencana pembangunan gardu induk ini akan memotong saluran transmisi *double phi* dari Gardu Induk Bantul menuju Gardu Induk Semanu.

Kawasan Sendangsari sendiri saat ini masih mendapat suplai listrik oleh Gardu Induk Bantul penyulang BNL11, Gardu Induk Godean penyulang GDN02, serta Gardu

Induk Wates penyulang WT02. Tegangan ujung saat beban puncak pada penyulang-penyulang tersebut bervariasi antara 18-19kV, sedangkan tegangan sekunder dari gardu distribusi saat beban puncak berkisar antara 180-190 Volt pada posisi tap terendah. Hal ini disebabkan karena penyulang yang melayani wilayah Sendangsari memiliki panjang sekitar 50-75 kms termasuk percabangannya.

Dengan adanya pembangunan gardu induk ini sudah pasti mempengaruhi sistem tenaga listrik pada gardu induk di sekitarnya. Salah satunya adalah sistem proteksi yang merupakan pengaman sistem tenaga listrik termasuk peralatan-peralatan listrik. Rele yang merupakan bagian dari sistem proteksi berfungsi menjaga kontinuitas distribusi tenaga listrik menuju konsumen. Salah satu rele yang berfungsi untuk mengamankan saluran transmisi adalah rele jarak. Untuk menjamin saluran transmisi telah diamankan oleh rele maka diperlukan analisis perhitungan dan koordinasi antar rele yang tepat dan akurat. Hal ini juga untuk mengatasi gangguan yang terjadi pada daerah yang diamankan oleh rele tersebut.

Dengan demikian penelitian ini akan membahas mengenai perbedaan koordinasi sistem proteksi utamanya rele jarak pada saat sebelum dan setelah Gardu Induk Borobudur dibangun. Dengan harapan bahwa dengan mengetahui perbedaan koordinasi tersebut dapat dilakukan evaluasi terhadap sistemnya. Oleh karena itu penulis mengambil judul “Evaluasi Koordinasi Rele Jarak Pada Gardu Induk Semanu Setelah Dibangunnya Gardu Induk Piyungan”.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan masalah yang telah dijelaskan pada latar belakang, maka dapat diambil rumusan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana koordinasi rele jarak pada Gardu Induk Semanu setelah pembangunan Gardu Induk Piyungan.

1.3 Batasan Masalah

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

1. Analisis dilakukan pada rele jarak pada saluran transmisi Gardu Induk Semanu arah Gardu Induk Bantul.

2. Tidak membahas pengaruh aliran daya serta tambahan daya pada Gardu Induk Piyungan.
3. Sistem yang dianalisis dianggap mendekati seimbang.

1.4 Tujuan

Tujuan penelitian adalah untuk mengevaluasi koordinasi rele jarak pada Gardu Induk Semanu pada saat sebelum dan setelah dibangunnya Gardu Induk Piyungan.

1.5 Manfaat

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah diharapkan dapat memberikan manfaat bagi PT. PLN (Persero) dapat mengetahui pengaruh pembangunan Gardu Induk Piyungan terhadap koordinasi rele jarak pada Gardu Induk Semanu.

1.6 Sistematika Pembahasan Hasil Skripsi

Sistematika pembahasan 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

Berisi tinjauan pustaka atau dasar teori yang digunakan sebagai dasar penelitian yang dilakukan dan sebagai penunjang permasalahan yang diungkapkan.

BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Memberikan penjelasan mengenai metode yang digunakan dalam penulisan skripsi ini, meliputi metode pengambilan data, pengolahan data, dan analisis data.

BAB IV : PEMBAHASAN

Berisi mengenai pengolahan data, perhitungan, analisis terhadap hasil perhitungan koordinasi rele jarak, serta evaluasi penyetelan rele jarak sebelum dan setelah dibangunnya Gardu Induk.

BAB V : PENUTUP

Berisi kesimpulan dan saran berdasarkan hasil analisis.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Saluran Transmisi

Saluran transmisi tenaga listrik merupakan salah satu dari bagian tenaga listrik yang memiliki peranan penting dalam menyalurkan daya listrik dari pembangkit atau gardu induk menuju pusat-pusat beban, baik langsung maupun melalui saluran penyulang.

Berdasarkan posisi penghantar yang digunakan dalam menyalurkan tenaga listrik maka terdapat dua kategori penyaluran yaitu saluran udara dan saluran bawah tanah. Saluran udara merupakan saluran transmisi yang menyalurkan tenaga listrik melalui kawat yang tergantung pada menara atau tiang transmisi dengan perantara isolator. Sedangkan saluran kabel tanah merupakan saluran yang menyalurkan energi listrik melalui kabel yang dipendam atau ditanam di dalam tanah.

Saluran transmisi untuk keperluan analisis dibagi dalam tiga kelas yaitu saluran transmisi jarak pendek, menengah dan panjang. Pembagian kategori ini berdasarkan panjang saluran transmisi tersebut. Untuk saluran transmisi jarak pendek panjang penghantarnya kurang dari 80 km. Sedangkan untuk transmisi jarak menengah memiliki panjang penghantar antara 80-240 km. Dan untuk transmisi jarak panjang penghantarnya lebih dari 240 km.

Saluran transmisi juga dapat dibedakan berdasarkan klasifikasi tegangannya. Standar tegangan tinggi yang berlaku di Indonesia adalah 30kV, 70kV dan 150kV. Berikut pembagian transmisi berdasarkan tegangannya :

a. Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 200kV-500kV

Pada umumnya saluran transmisi ini di Indonesia digunakan pada pembangkit dengan kapasitas 500kV. Dengan tujuan untuk meminimalisir drop tegangan dari penampang kawat.

b. Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 30kV-150kV

Saluran ini memiliki memiliki jarak terjauh transmisi ini adalah 100 km, jika lebih maka tegangan jatuh semakin besar.

c. Saluran Kabel Tegangan Tinggi (SKTT) 30kV-150kV

Saluran transmisi ini yaitu kabel tenaga listrik berada di dalam tanah, namun sudah sangat jarang di Indonesia.

2.2 Sistem Proteksi Tenaga Listrik

Sistem proteksi adalah susunan perangkat proteksi secara lengkap yang terdiri dari perangkat utama dan perangkat-perangkat lain yang dibutuhkan untuk melakukan fungsi proteksi terhadap kondisi-kondisi abnormal (Pandjaitan, B., 2012). Kondisi abnormal tersebut biasa disebabkan oleh gangguan yang dapat mengakibatkan terganggunya kontinuitas pelayanan tenaga listrik. Berdasarkan ANSI/IEEE Std. 100-1992, gangguan didefinisikan sebagai suatu kondisi fisis yang disebabkan kegagalan suatu perangkat, komponen atau suatu elemen untuk bekerja sesuai dengan fungsinya.

Bila ditinjau dari segi lamanya waktu gangguan, maka dapat dikelompokkan menjadi (Gonen, T., 1988) :

1. Gangguan yang bersifat temporer (sementara), yaitu gangguan yang dapat hilang dengan sendirinya atau dengan memutuskan sesaat bagian yang terganggu dari sumber tegangannya. Gangguan yang bersifat temporer jika tidak dapat hilang dengan segera, baik hilang dengan sendirinya maupun karena bekerjanya alat pengaman, maka akan dapat berubah menjadi gangguan permanen dan menyebabkan pemutusan tetap.
2. Gangguan yang bersifat permanen, yaitu gangguan yang untuk membebaskan diperlukan tindakan perbaikan untuk menyingkirkan penyebab gangguan tersebut.

Gangguan pada saluran transmisi dapat berupa gangguan hubung singkat atau konduktor putus yang berakibat terbukanya rangkaian. Dari kedua jenis gangguan tersebut, gangguan hubung singkat lebih sering terjadi. Gangguan hubung singkat sendiri dibedakan menjadi (Ravindranath, 1987) :

1. Gangguan hubung singkat 3 fasa dengan prosentase kejadian 2%.
2. Gangguan hubung singkat antar fasa dengan prosentase kejadian 5%.
3. Gangguan hubung singkat 2 fasa ke tanah dengan prosentasi kejadian 8%.
4. Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah dengan prosentasi kejadian 85%.

Dari jenis gangguan hubung singkat diatas dapat digolongkan menjadi dua kelompok yaitu (Ontoseno penangsang, 2005) :

1. Hubung singkat simetri
2. Hubung singkat tak simetri (asimetri)

Gangguan hubung singkat yang termasuk ke dalam gangguan tak simetri (asimetri) adalah hubung singkat satu fasa dan dua fasa, sedangkan gangguan simetri adalah hubung singkat tiga fasa (NFPA 70E, 2008). Hampir semua gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik merupakan gangguan tidak simetri. Gangguan dapat diperkecil

dengan cara pemeliharaannya. Bila gangguan hubung singkat dibiarkan berlangsung dengan lama pada suatu sistem daya, banyak pengaruh – pengaruh yang tidak diinginkan yang dapat terjadi (Stevenson, 1994) :

- a. Berkurangnya batas – batas kestabilan untuk sistem daya.
- b. Rusaknya perlengkapan yang berada dekat dengan gangguan yang disebabkan oleh arus tak seimbang, atau tegangan rendah yang ditimbulkan oleh hubung singkat.
- c. Ledakan – ledakan yang mungkin terjadi pada peralatan yang mengandung minyak isolasi sewaktu terjadinya suatu hubung singkat, dan yang mungkin menimbulkan kebakaran sehingga dapat membahayakan orang yang menanganinya dan merusak peralatan – peralatan yang lain.
- d. Terpecah – pecahnya keseluruhan daerah pelayanan sistem daya itu oleh suatu rentetan tindakan pengamanan yang diambil oleh sistem – sistem pengamanan yang berbeda – beda, kejadian ini di kenal sebagai *cascading*.

Dengan tingginya jumlah gangguan maka hal ini merupakan salah satu faktor yang dapat menghambat tercapainya kestabilan dan kontinuitas penyaluran daya dalam sistem pembangkitan dan penyaluran tenaga listrik, sehingga dituntut agar setiap jenis gangguan yang terjadi dapat dihilangkan atau paling tidak diisolasi agar gangguan tersebut tidak menjalar ke peralatan lain atau saluran transmisi lain yang tidak terkena gangguan (kondisi sehat atau normal). Dengan demikian sangat dibutuhkan peralatan pengaman yang memenuhi syarat-syarat yang telah ditentukan.

Fungsi utama dari sistem proteksi adalah (Hutauruk, 1991) :

1. Menghindari atau mengurangi kerusakan peralatan listrik. Semakin cepat sistem proteksi bekerja maka pengaruh gangguan akan semakin kecil.
2. Mempercepat melokalisir daerah yang terganggu, sehingga daerah yang terganggu menjadi sekecil mungkin.
3. Memberikan pelayanan listrik dengan keandalan yang tinggi.
4. Mengamankan manusia dari bahaya listrik

2.3 Rele Pengaman

Rele adalah suatu peralatan yang digunakan untuk mengontrol suatu rangkaian listrik secara tidak langsung dengan memakai perubahan yang terjadi pada rangkaian tersebut atau rangkaian yang lain.

Rele pengaman adalah suatu rele yang dipakai untuk memperoleh penghubungan dan/atau pemutusan secara otomatis suatu peralatan atau bagian sistem listrik dari sumber daya pada suatu kondisi tertentu yang dapat menyebabkan kerusakan atau bahaya pada peralatan atau sistem tersebut (B.S. 142, 1966).

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

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

Terdapat beberapa keadaan operasi sebuah rele, yaitu:

- *Operate*, kondisi dimana relai tersebut memerintahkan peralatan proteksi untuk bekerja atau beroperasi.
- *Pick-up*, kondisi ketika relai mulai mendeteksi adanya kenaikan arus atau tegangan pada sistem tenaga listrik.
- *Drop-out*, kondisi saat relai tidak mendeteksi adanya gangguan lagi dan relai membuka *normally open contact*.
- *Reset*, kondisi dimana relai disetting kembali ke keadaan semula, saat ini relai menutup kontak dari *closed contact*.
- *Trip*, keadaan saat relai memberi perintah memutuskan daya kepada *circuit breaker* (CB).

2.4 Syarat-Syarat Rele Pengaman

Karena rele pengaman merupakan kunci kelangsungan kerja dari sistem tenaga listrik maka untuk menjamin keandalan dari sistem tersebut diperlukan rele pengaman yang memenuhi syarat sebagai berikut (Hewitson, L.G., 2004) :

2.4.1 Kecepatan Bereaksi

Kecepatan kerja suatu rele pengaman adalah kemampuan rele untuk bekerja sesuai dengan waktu yang dibutuhkan. Kemampuan sistem proteksi untuk memisahkan gangguan secepat mungkin dari sistem akan mengurangi akibat yang ditimbulkan oleh gangguan tersebut. Maka kecepatan kerja rele pengaman merupakan faktor yang sangat penting. Persamaan waktu kerja total rele (Gonen, T., 1987) :

$$t_{op} = t_p + t_{ob} \quad (2-1)$$

dengan :

t_{op} : Waktu total yang digunakan untuk memutuskan hubungan (s)

t_p : Waktu bereaksi dari rele unit (s)

t_{ob} : Waktu yang digunakan untuk pelepasan CB (s)

Pada umumnya untuk t_{op} sekitar 0,1 detik kerja peralatan proteksi sudah dianggap bekerja cukup baik.

2.4.2 Kepekaan

Kepekaan rele diartikan sebagai kemampuan merespon bila kondisi kerja cenderung menyimpang dari kondisi normal. Bila suatu kondisi kerja normal tiba-tiba mengalami gangguan, maka sistem pengaman harus cepat tanggap (peka) (Sunil, S. Rao, 1980).

$$K_s = \frac{I_{sc \min}}{I_{pp}} \quad (2-2)$$

dengan :

$I_{sc \min}$: Arus hubung singkat minimum (A)

I_{pp} : Arus *pick up* (arus kerja) primer dari pengaman (A)

K_s : Faktor sensitif rele

Dari beberapa referensi buku proteksi diperoleh nilai konstanta K_s adalah 0,8 (Prévé, C., 2006).

2.4.3 Selektivitas

Pengaman harus dapat memisahkan bagian sistem yang terganggu sekecil mungkin yaitu hanya sesi yang terganggu saja yang menjadi pengamanan yang selektif. Jadi rele harus dapat membedakan apakah gangguan terletak di kawasan pengamanan utamanya dimana ia harus bekerja cepat atau bekerja dengan waktu tunda atau harus tidak

bekerja sama sekali karena gangguannya di luar daerah pengamanannya atau sama sekali tidak ada gangguan.

2.4.4 Keandalan

Keandalan adalah kemampuan rele untuk dapat bekerja dengan baik setiap saat dan kemampuan untuk menghindari operasi yang tidak diperlukan atau salah kerja. Salah kerja bisa mengakibatkan kerusakan yang lebih luas. Keandalan rele dihitung dengan jumlah rele yang bekerja di daerahnya terhadap jumlah gangguan yang terjadi. Keandalan rele dikatakan cukup baik bila mempunyai harga sekitar 90-99% (Gonen, T., 1987).

2.4.5 Ekonomis

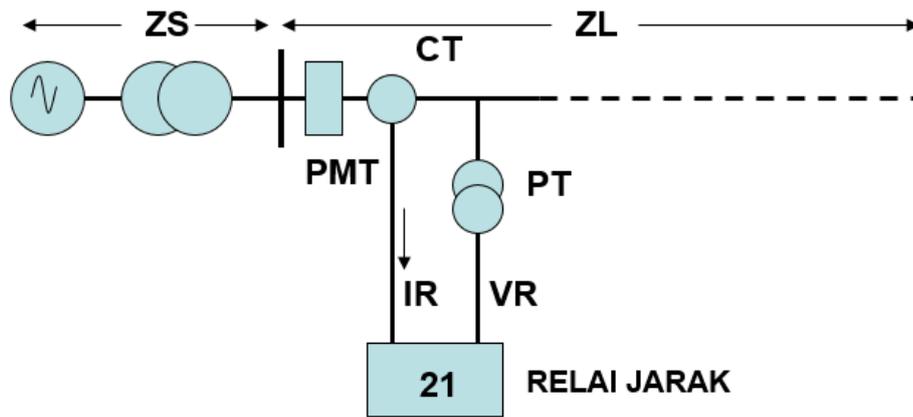
Sistem pengaman peralatan juga harus mempertimbangkan sisi ekonomis dari pemasangan peralatan tersebut. Karena itu tidak semua peralatan harus dilengkapi dengan pengaman yang lengkap karena harga peralatan pengaman juga harus diperhitungkan tanpa menghilangkan efektivitas penyaluran daya listrik. Sisi ekonomis perlu dipertimbangkan setelah aspek teknis telah terpenuhi untuk kelayakan operasi peralatan.

2.5 Rele Jarak

Rele jarak dapat berfungsi sebagai pengaman utama pada suatu sistem transmisi maupun sebagai pengaman cadangan. Rele jarak bekerja dengan mengukur besaran impedansi (Z) yang berbanding lurus dengan jaraknya sehingga memungkinkan untuk pengukuran impedansi berdasarkan panjang saluran. Pada rele ini terdapat beberapa daerah cakupan pengaman atau zona proteksi yaitu Zona-1, Zona-2, dan Zona-3.

2.6 Prinsip Rele Jarak

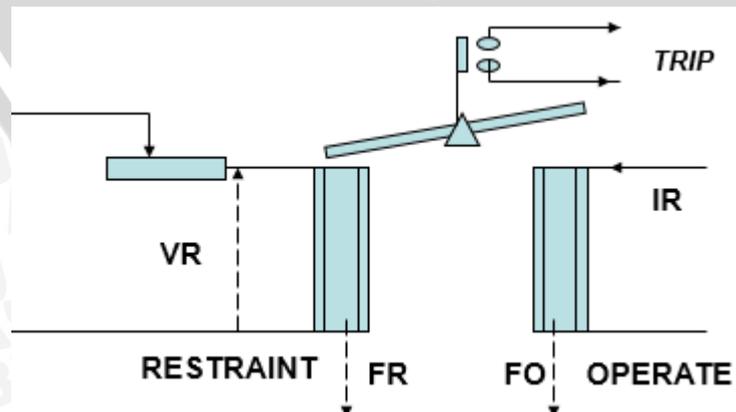
Karena impedansi saluran transmisi sebanding dengan panjangnya, untuk pengukuran jarak digunakan rele yang dapat mengukur impedansi suatu saluran dari titik yang telah ditentukan (hingga titik akhir). Rele ini dirancang untuk beroperasi hanya pada gangguan antara lokasi rele dan titik akhir yang ditentukan, sehingga dapat membedakan untuk gangguan yang mungkin terjadi pada saluran lainnya atau di luar zona yang diamankan. Prinsip kerja rele dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Prinsip Kerja Rele Jarak
 Sumber: PT. PLN P3B, 2006

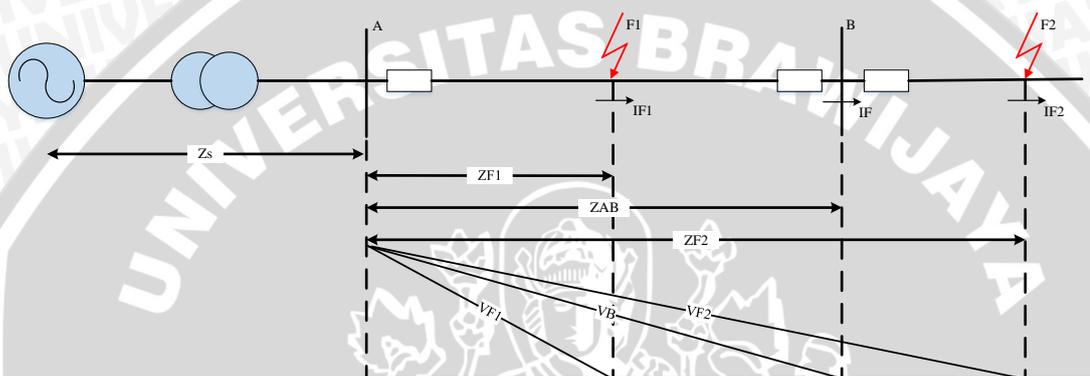
Rele jarak dapat disimbolkan dengan angka 21 sesuai dengan ANSI/IEEE Standard C37.2. Prinsip dasar rele jarak adalah pembagian nilai tegangan pada titik rele (V_R) dengan arus yang terukur oleh rele (I_R). Arus yang terukur oleh rele ketika terjadi gangguan dapat diperoleh dengan pembagian nilai tegangan (V_R) dan penjumlahan dari impedansi sumber (Z_S) serta impedansi saluran (Z_L). Hasil hitungan impedansi ini akan dibandingkan dengan impedansi setelan. Jika impedansi yang terukur lebih kecil dari impedansi setelan, dapat diasumsikan bahwa gangguan terjadi diantara rele dan titik akhir saluran. Titik akhir rele merupakan titik tempat dimana impedansi saluran berpotongan dengan batas karakteristik dari rele.

Rele jarak pada umumnya telah dilengkapi elemen *directional* untuk menentukan arah atau lokasi gangguan. Pada Gambar 2.2. diilustrasikan prinsip kerja rele jarak elektromekanis yang mana desain *operating torque* (torsi operasi) sebanding dengan nilai arus yang terukur dan *restraint torque* (torsi penahan) sebanding dengan nilai tegangan yang terukur.



Gambar 2.2 Konstruksi Sederhana Rele Jarak
 Sumber: PT. PLN P3B, 2006

Tegangan (V_R) dari transformator tegangan menghasilkan gaya yang akan menahan (*restrain*) kontak untuk tetap terbuka. Sedangkan arus (I_R) dari transformator akan menghasilkan gaya yang akan menarik (*operate*) kontak untuk tertutup. Ketika lokasi gangguan di luar daerah jangkauan rele: nilai arus (I_R) relatif kecil, nilai tegangan (V_R) relatif besar atau dominan sehingga koil akan menyentuh *restraint* maka rele tidak akan *trip*/bekerja. Sedangkan jika lokasi gangguan berada di dalam daerah jangkauan rele: nilai arus (I_R) relatif besar atau dominan, nilai tegangan (V_R) relatif kecil sehingga koil akan menyentuh *operate* maka rele akan bekerja (*trip*). Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Prinsip Kerja Rele Jarak Ketika Terjadi Gangguan
Sumber: PT. PLN P3B, 2006

Daerah pengamanan rele pada bus A adalah sampai bus B, yaitu sepanjang Z_{AB} . Pada rele diatur nilai setelan impedansi Z_{AB} dengan cara pembagian nilai tegangan pada rele (V_B) dan nilai arus yang mengalir pada rele (I_F). Ketika terjadi gangguan di dalam daerah pengaman ($F1$), maka tegangan yang terukur pada rele adalah V_1 .

$$V_1 = I_{F1} \times Z_{F1} \quad (2-3)$$

Dengan :

I_{F1} : arus gangguan pada titik gangguan $F1$ yang terdeteksi oleh rele

Z_{F1} : impedansi antara titik rele hingga titik gangguan $F1$

Rele jarak yang berprinsip membandingkan nilai tegangan serta nilai arus pada saat terjadi gangguan, maka perbandingan antara tegangan dan arus pada rele adalah :

$$\frac{V_1}{I_{F1}} = \frac{I_{F1} \times Z_{F1}}{I_{F1}} = Z_{F1} \quad (2-4)$$

Pada kondisi ini nilai $V_1 < V_B$ dan $I_{F1} > I_F$ sehingga nilai $Z_{F1} < Z_B$ maka rele jarak harus bekerja. Ketika gangguan berada pada di luar daerah pengaman maka tegangan yang terukur pada rele adalah V_2

$$V_2 = I_{F2} \times Z_{F2} \quad (2-5)$$

Dengan :

I_{F2} : arus gangguan pada titik gangguan F2 yang terdeteksi oleh rele

Z_{F2} : impedansi antara titik rele hingga titik gangguan F2

Rele jarak yang berprinsip membandingkan nilai tegangan serta nilai arus pada saat terjadi gangguan, maka perbandingan antara tegangan dan arus pada rele adalah :

$$\frac{V_2}{I_{F2}} = \frac{I_{F2} \times Z_{F2}}{I_{F2}} = Z_{F2} \quad (2-6)$$

Pada kondisi ini nilai $V_2 > V_B$ dan $I_{F2} < I_F$ sehingga nilai $Z_{F2} > Z_B$ maka rele jarak tidak akan bekerja.

2.7 Perhitungan Impedansi

Untuk beroperasi dengan benar, rele jarak harus dapat mengukur jarak gangguan dengan akurat. Rele jarak sebagai pengaman utama harus dapat mendeteksi semua jenis gangguan dan kemudian memisahkan sistem yang terganggu dengan sistem yang sehat.

2.7.1 Sistem Per Unit (pu)

Definisi dari nilai per unit untuk suatu kuantitas ialah perbandingan dari kuantitas tersebut terhadap nilai dasarnya yang dinyatakan dalam desimal. Perbandingan (ratio) dalam persentase adalah 100 kali nilai dalam per unit. Kedua metode perhitungan tersebut, baik dengan persentase maupun dengan per unit adalah lebih sederhana daripada menggunakan langsung nilai-nilai ampere, ohm, dan volt yang sebenarnya. Metode per unit mempunyai sedikit kelebihan dari metode persentase, karena hasil perkalian dari dua kuantitas yang dinyatakan dalam per unit sudah langsung diperoleh dalam per unit juga, sedangkan hasil perkalian dari dua kuantitas yang dinyatakan dalam persentase masih harus dibagi dengan 100 untuk mendapatkan hasil dalam persentase.

Tegangan, arus, kilovoltampere dan impedansi mempunyai hubungan sedemikian rupa sehingga pemilihan nilai-nilai dasar untuk dua saja dari kuantitas-kuantitas tersebut sudah dengan sendirinya menentukan nilai-nilai dasar untuk kedua kuantitas yang lainnya. Jika nilai-nilai dasar dari arus dan tegangan sudah dipilih, maka nilai-nilai dasar dari impedansi dan kilovoltampere dapat ditentukan. Impedansi dasar adalah impedansi yang akan menimbulkan jatuh tegangan (*voltage drop*) padanya sendiri sebesar tegangan dasar jika arus yang mengalirinya sama dengan arus dasar. Kilovoltampere dasar pada sistem-sistem berfasa tunggal adalah hasil perkalian dari tegangan dasar dalam kilovolt dan arus dasar dalam ampere.

Biasanya megavoltampere dasar dan tegangan dasar dalam kilovolt adalah kuantitas-kuantitas yang dipilih untuk menentukan dasar atau referensi. Jadi untuk sistem-sistem berfasa tunggal atau sistem-sistem tiga fasa di mana istilah arus berarti arus saluran, istilah tegangan berarti tegangan ke netral, dan istilah kilovoltampere berarti kilovoltampere per fasa, berlaku rumus-rumus berikut ini untuk hubungan bermacam-macam kuantitas (Stevenson, 1996:29) :

$$\text{Arus dasar} = \frac{kVA_{3\phi} \text{ dasar}}{\sqrt{3} \times \text{tegangan dasar, } kV_{L-L}} \quad (2-7)$$

$$\text{Impedansi dasar} = \frac{(\text{tegangan dasar, } kV_{L-L})^2}{MVA_{3\phi} \text{ dasar}} \quad (2-8)$$

Untuk mengubah dari impedansi per unit (pu) menurut suatu dasar yang lama menjadi impedansi per unit (pu) menurut dasar yang baru dipakai persamaan berikut (Stevenson, 1996:29) :

$$Z_{\text{baru}}(\text{pu}) = Z_{\text{lama}}(\text{pu}) \times \left(\frac{kV_{\text{lama}} \text{ dasar}}{kV_{\text{baru}} \text{ dasar}} \right)^2 \times \left(\frac{kVA_{\text{baru}} \text{ dasar}}{kVA_{\text{lama}} \text{ dasar}} \right) \quad (2-9)$$

2.7.2 Impedansi Transformator

Untuk mengetahui impedansi transformator, maka harus diketahui nilai reaktansi transformator (X_{trafo}) dan daya yang mampu dihasilkan transformator. Nilai ini biasanya sudah tertera pada plat transformator atau pada *data sheet* transformator. Berikut merupakan persamaan untuk memperoleh impedansi transformator :

$$Z_{trafo}(\Omega) = \frac{(kV_{L-L})^2}{MVA_{trafo}} \times X_{trafo} \quad (2-10)$$

2.7.3 Impedansi Urutan Komponen

Impedansi urutan komponen terdiri dari (Stevenson, 1996:274) :

1. Impedansi Urutan Positif (Z_1).

Impedansi urutan positif adalah rangkaian impedansi tiga fasa simetris yang didapat dengan memberikan tegangan urutan positif dan hanya mengalir arus urutan positif saja.

2. Impedansi Urutan Negatif (Z_2).

Impedansi urutan negatif adalah rangkaian impedansi tiga fasa simetris yang didapat dengan memberikan tegangan urutan positif, tetapi arus yang mengalir adalah arus urutan negatif.

3. Impedansi Urutan Nol (Z_0).

Impedansi urutan nol adalah rangkaian impedansi tiga fasa simetris yang didapat dengan memberikan tegangan urutan positif tetapi arus yang mengalir adalah arus urutan nol.

Pada sistem jaringan distribusi impedansi urutan komponen-komponen tersebut dapat terlihat pada :

2.7.3.1 Impedansi Urutan Transformator Daya

a. Impedansi Urutan Positif dan Negatif (Z_{1T} dan Z_{2T}).

Impedansi urutan positif transformator daya sama dengan impedansi urutan negatifnya, didapatkan dari papan nama transformator daya yang dinyatakan dalam satuan persen (%) atau per unit (pu), dimana $Z_{1T} = Z_{2T}$ (2-11)

b. Impedansi Urutan Nol (Z_{0T}).

Impedansi urutan nol, diperoleh dari data transformator daya yang digunakan, yaitu melihat adanya belitan delta sebagai belitan ketiga dalam transformator daya tersebut (Sarimun W., 2012) :

1) Untuk transformator daya dengan hubungan belitan ΔY dimana kapasitas belitan delta sama besar dengan kapasitas belitan Y, maka $Z_{0T} = Z_{1T}$ (2-12)

2) Untuk transformator daya dengan hubungan belitan ΔY dimana kapasitas belitan delta (d) biasanya adalah sepertiga dari kapasitas belitan Y (belitan yang dipakai untuk menyalurkan daya, sedangkan belitan delta tetap ada di dalam tetapi tidak dikeluarkan kecuali satu terminal delta untuk ditanahkan), maka $Z_{0T} = 3 \times Z_{1T}$ (2-13)

3) Untuk transformator daya dengan hubungan belitan YY dan tidak mempunyai belitan delta di dalamnya, maka nilai Z_{0T} berkisar antara 9 sampai dengan $14 \times Z_{1T}$ (2-14)

2.7.3.2 Impedansi Urutan Saluran Transmisi

Untuk perhitungan impedansi saluran transmisi, perhitungannya tergantung dari besarnya impedansi per km (Ω/km) dari saluran yang akan dihitung, dimana nilainya ditentukan dari jenis penghantar, luas penampang dan panjang jaringan SUTM atau jaringan SKTM. Dalam perhitungan disini diambil dengan $Z = (R + jX) \Omega/\text{km}$ (Sarimun, W., 2012). Sehingga untuk impedansi saluran dapat ditentukan dengan menggunakan rumus :

$$Z_{1\ sal} = Z_{2\ sal} = R_1 + jX_1 (\Omega/km) \times L (km) \quad (2-15)$$

$$Z_{0\ sal} = R_0 + jX_0 (\Omega/km) \times L (km) \quad (2-16)$$

dengan :

$Z_{1\ sal}$: Impedansi penyulang urutan positif (Ω)

$Z_{s\ sal}$: Impedansi penyulang urutan negatif (Ω)

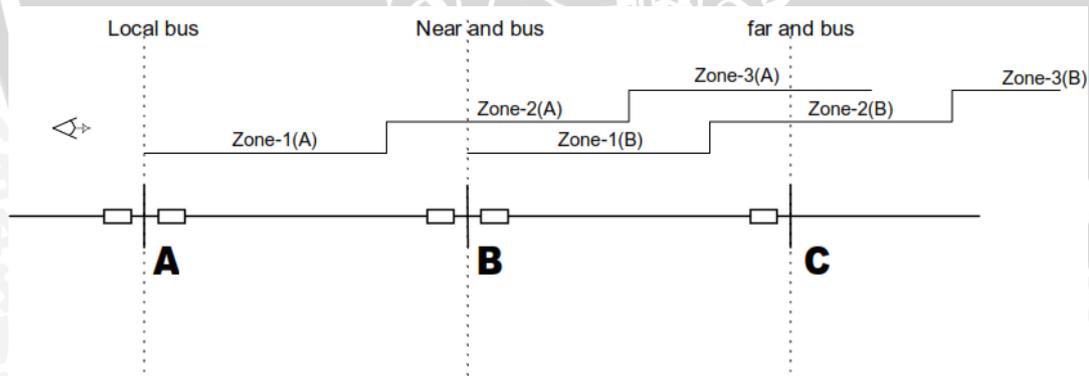
$Z_{0\ sal}$: Impedansi penyulang urutan nol (Ω)

L : Panjang saluran (km).

2.8 Zona Proteksi

Rele jarak yang pada dasarnya mengukur nilai impedansi saluran (Z_L), jika impedansi yang terukur lebih kecil dari impedansi setelan (Z_n) akibat gangguan ($Z_F < Z_n$), maka rele akan beroperasi. Pemilihan yang teliti akan setelan impedansi dan waktu *tripping* untuk berbagai macam zona pengukuran memungkinkan koordinasi yang benar antara rele jarak pada sistem tenaga listrik.

Prinsip ini sesuai dengan syarat selektivitas, yaitu mengatur hubungan jarak atau jangkauan impedansi dan waktu kerja rele. Jangkauan dan setelan waktu untuk ketiga zona proteksi rele jarak dapat terlihat pada Gambar 2.4. Pada rele jarak digital/numerik bisa memiliki hingga 5-6 zona, beberapa diatur untuk mengukur dalam arah sebaliknya. Pada penelitian ini rele yang dibahas memiliki 3 zona proteksi.



Gambar 2.4 Zona Proteksi Rele Jarak

Sumber: PT. PLN (Persero) P3B, 2006

2.8.1 Setelan Zona 1

Penyetelan untuk Zona 1 harus menutupi seluruh segmen penghantar yang diamankan dengan memperhitungkan kesalahan-kesalahan sebagai berikut :

- *Error* transformator arus (CT) = Ect
- *Error* transformator tenaga (PT) = Ept

- $Error\ rele = E_r$
- $Error\ data\ saluran = E_{dt}$

Asumsi total kesalahan (*error*) $E = E_{ct} + E_{pt} + E_r + E_{dt} = 20\%$. Oleh karena itu penyetelan tidak boleh lebih besar dari impedansi saluran tersebut agar tidak terjadi *overlap* dengan pengaman pada sesi di depannya. Dengan pertimbangan di atas, maka berikut adalah prinsip setelan untuk Zona 1: (B. Ravindranath, M.Chander, 1997: 97)

$$Z_1 = 0,8 \times Z_{L1} \quad (2-17)$$

Dengan :

Z_{L1} : impedansi saluran yang diamankan (Ω)

Untuk penyetelan waktu (t_1) adalah seketika (*instantaneous*), yang berarti waktu kerja rele disetel sama dengan nol atau tanpa waktu ($t_1 = 0$). Jadi waktu kerja rele hanya dipengaruhi oleh kecepatan perasa gangguan rele, rele pembantu dan pengukurnya.

2.8.2 Setelan Zona 2

Jangkauan Zona 2 harus mencapai sisa saluran yang tidak diamankan pada Zona 1, dan tidak boleh *overlapping* atau melebihi jangkauan zona berikutnya. Zona ini diatur untuk dapat mengatasi gangguan pada sesi yang diamankan ditambah 20% sesi di depannya. Dengan pertimbangan adanya kesalahan seperti tersebut diatas, maka prinsip penyetelan untuk Zona 2 dapat dilihat pada rumusan berikut: (B. Ravindranath, M.Chander, 1997: 97)

$$Z_{2min} = 1,2 \times Z_{L1} \quad (2-18)$$

$$Z_{2maks} = 0,8 \times (Z_{L1} + 0,8 \times Z_{L2}) \quad (2-19)$$

Dengan :

Z_{L1} : impedansi saluran yang diamankan (Ω)

Z_{L2} : impedansi saluran sesi berikutnya yang terpendek (Ω)

Jika pada sesi berikutnya terdapat beberapa cabang, untuk mendapatkan selektifitas yang baik maka setelan Zona 2 diambil dengan nilai impedansi penghantar terkecil. Pada Zona 2 terdapat dua nilai impedansi setelan, yang nantinya untuk setelan rele diambil impedansi setelan terbesar namun tidak boleh melebihi nilai impedansi transformator pada bus/gardu induk di depannya.

Pemilihan nilai impedansi setelan ini ada dua yaitu (PT. PLN P3B, 2006):

- Untuk keadaan dimana nilai Z_{2maks} lebih besar dari nilai Z_{2min} ($Z_{2maks} > Z_{2min}$) maka setelan untuk Zona 2 diambil Z_{2maks} dengan waktu kerja waktu

tunda ($\Delta t = 0,4s$), sehingga waktu kerja pada Zona 2 adalah $t_2 = t_1 + \Delta t$. Kondisi ini terjadi ketika saluran sesi berikutnya lebih panjang dari saluran yang diamankan.

- Untuk keadaan dimana nilai Z_{2maks} lebih kecil dari nilai Z_{2min} ($Z_{2maks} < Z_{2min}$) maka setelan untuk Zona 2 diambil Z_{2min} dengan waktu tunda (Δt) rele ditingkatkan menjadi $\Delta t = 0,8s$, sehingga waktu tunda menjadi $t_2 = t_1 + \Delta t$. Kondisi ini terjadi saat saluran sesi berikutnya lebih pendek dari saluran yang diamankan.

Jika pada sesi berikutnya (gardu indu didepannya) terdapat transformator daya, maka jangkauan Zona 2 sebaiknya tidak melebihi impedansi transformator. Berikut merupakan persamaan untuk impedansi transformator :

$$Z_{2T} = 0,8 \times (Z_{L1} + k_t \times X_t) \quad (2-20)$$

Dengan :

Z_{L1} : impedansi saluran yang diamankan (Ω)

X_t : impedansi trafo daya pada sesi berikutnya (Ω)

k_t : bagian trafo yang diproteksi (direkomendasikan $k = 0,5$)

2.8.3 Setelan Zona 3

Rele jarak memiliki fungsi sebagai rele cadangan dari rele di depannya (*remote back-up*) dengan waktu tunda dari Zona 2. Untuk memenuhi hal tersebut maka setelan Zona 3 jangkauan ke depan (*forward*), diatur untuk dapat mengamankan setidaknya 120% impedansi setelan rele pada sesi ujung saluran kedua (saluran berikutnya yang terpanjang). Jangkauan Zona 3 diusahakan dapat mencakup seluruh saluran di depannya, bila terdapat beberapa saluran pada sesi di depannya, maka dipilih saluran terpanjang.

Prinsip penyetelan untuk Zona-3 adalah sebagai berikut:

$$Z_{3min} = 1,2 \times (Z_{L1} + 0,8 \times Z_{L3}) \quad (2-21)$$

$$Z_{3maks} = 0,8 \times (Z_{L1} + 0,8 \times (Z_{L3} + k \times Z_{L4})) \quad (2-22)$$

Dengan :

Z_{L1} : impedansi saluran yang diamankan (Ω)

Z_{L3} : impedansi saluran seksi berikutnya yang terpanjang (Ω)

Z_{L4} : impedansi saluran seksi berikutnya yang terpendek dari Z_{L3} (Ω)

k : faktor infeed

Jika pada sesi berikutnya atau gardu induk di depannya terdapat trafo daya, maka jangkauan Zona 3 sebaiknya tidak melebihi impedansi transformator. Berikut merupakan persamaan impedansi trafo :

$$Z_{3T} = 0,8 \times (Z_{L1} + k_t \times X_t) \quad (2-23)$$

Dengan :

Z_{L1} : impedansi saluran yang diamankan (Ω)

X_t : impedansi trafo daya pada sesi berikutnya (Ω)

k_t : bagian trafo yang diproteksi (direkomendasikan $k = 0,8$)

Jika pada sesi berikutnya terdapat beberapa cabang, untuk mendapatkan selektifitas yang baik maka setelan Zona 3 diambil dengan nilai impedansi penghantar terkecil. Pada Zona 3 terdapat dua nilai impedansi setelan sama seperti Zona 2, untuk setelan rele diambil impedansi setelan terbesar namun tidak boleh melebihi nilai impedansi transformator pada bus/gardu induk di depannya.

Pemilihan nilai impedansi setelan ini ada dua yaitu (PT. PLN P3B, 2006):

- Untuk keadaan dimana nilai Z_{3maks} lebih besar dari nilai Z_{3min} ($Z_{3maks} > Z_{3min}$) maka setelan untuk Zona 3 diambil Z_{3maks} dengan waktu kerja waktu tunda ($\Delta t = 0,4s$), sehingga waktu kerja pada Zona 3 adalah $t_3 = t_2 + \Delta t$. Kondisi ini terjadi ketika saluran sesi berikutnya lebih panjang dari saluran yang diamankan.
- Untuk keadaan dimana nilai Z_{3maks} lebih kecil dari nilai Z_{3min} ($Z_{3maks} < Z_{3min}$) maka setelan untuk Zona 2 diambil Z_{3min} dengan waktu tunda (Δt) rele ditingkatkan menjadi $\Delta t = 0,8s$, sehingga waktu tunda menjadi $t_3 = t_2 + \Delta t$. Kondisi ini terjadi saat saluran sesi berikutnya lebih pendek dari saluran yang diamankan.

2.8.4 Faktor Pengali

Faktor pengali merupakan faktor yang akan digunakan untuk menentukan nilai impedansi pada sisi sekunder. Faktor pengali ini dapat diperoleh dengan menggunakan perbandingan antara rasio CT (*Current Transformer*) dengan rasio PT (*Potential Transformer*). Faktor pengali dapat diperoleh dengan persamaan sebagai berikut :

$$n = \frac{\text{Rasio CT}}{\text{Rasio PT}} \quad (2-24)$$

Setelah memperoleh nilai impedansi masing-masing zona pada sisi primer (impedansi pada saluran transmisi), maka selanjutnya nilai ini perlu dikalikan dengan

faktor pengali untuk menentukan nilai setelan impedansi sisi sekunder (impedansi yang terbaca oleh rele). Berikut merupakan persamaan untuk masing-masing zona proteksi:

$$Z_{iS} = n * Z_{iP} \quad (2-25)$$

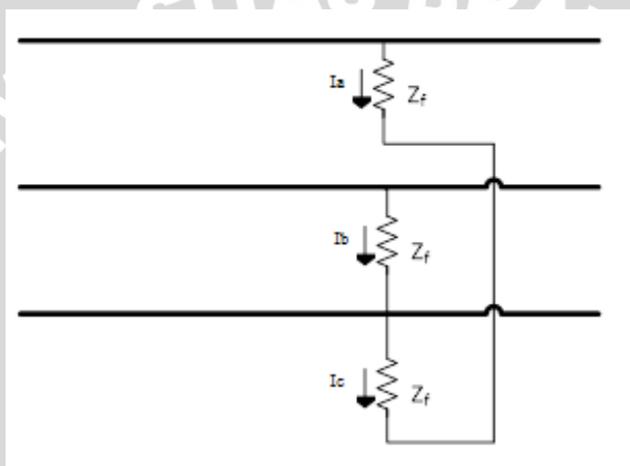
Dengan :

Z_{iP} : impedansi Zona i sisi primer (Ω) ($i = 1,2,3$)

2.9 Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat

2.9.1 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa

Saat terjadi gangguan tiga fasa yang simetris, maka amplitudo tegangan fasa V_A , V_B , V_C turun dan beda fasa tetap 120° , terlihat pada Gambar 2.5. berikut:



Gambar 2.5 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa
Sumber: Stevenson, 1994

Arus gangguan hubung singkat tiga fasa adalah (Gonen, T., 1988:267) :

$$I_{hs-3\phi} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_f} \quad (2-26)$$

Dengan,

I_{hs} : arus hubung singkat (pu)

E_a : tegangan dasar (pu)

Z_1 : impedansi urutan positif (pu)

Z_f : impedansi gangguan hubung singkat (pu)

Sehingga akan terdeteksi arus dan tegangan saat terjadi gangguan tiga fasa pada rele jarak sesuai persamaan berikut (Anderson, P.M, 1999):

$$I_R = C_1 = \frac{Z_{1N}}{Z_{1M} + Z_{1N}} \quad (2-27)$$

Dengan,

Z_{M1} : impedansi pada cabang rele (pu)

Z_{N1} : impedansi pada cabang paralel (pu)

$$V_R = Z_{1F} = Z_F + (nZ_{1L} \times C_1) \quad (2-28)$$

Dengan,

Z_F : impedansi gangguan hubung singkat (pu)

nZ_{1L} : impedansi antara titik rele hingga gangguan (pu)

Dari persamaan di atas dapat diperoleh nilai impedansi yang terdeteksi oleh rele menggunakan persamaan berikut (Anderson, P.M, 1999):

$$Z_{RP} = \frac{V_R}{I_R} \quad (2-29)$$

Dengan,

V_R : tegangan pada saat terjadi gangguan (V)

I_R : arus pada saat terjadi gangguan (A)

Nilai impedansi di atas merupakan nilai impedansi sebenarnya, sehingga untuk mengetahui nilai impedansi gangguan yang akan terbaca oleh rele maka perlu dikalikan dengan faktor pengali (n) seperti pada persamaan berikut :

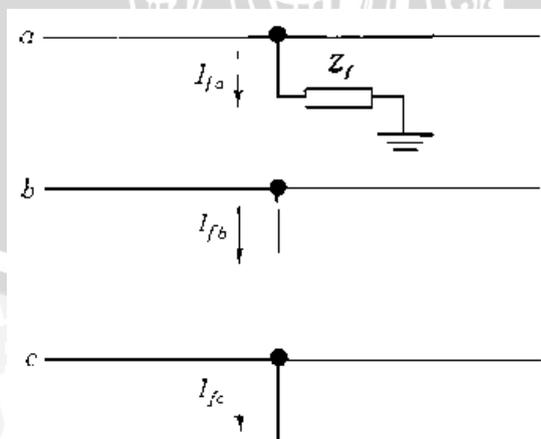
$$Z_{RS} = n * Z_{RP} \quad (2-30)$$

Dengan :

Z_{fP} : impedansi yang terdeteksi rele pada sisi primer (Ω)

2.9.2 Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Untuk mengukur impedansi pada saat terjadi gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, tegangan yang masuk ke komparator rele adalah tegangan fasa yang terganggu, diilustrasikan pada Gambar 2.16.



Gambar 2.6 Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa
Sumber: Stevenson, 1994

Arus hubung singkat fasa ke tanah adalah (Gonen, T., 1988:267) :

$$I_{hs-1\phi} = \frac{3E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + Z_f} \quad (2-31)$$

Dengan,

I_{hs} : arus hubung singkat (pu)

E_a : tegangan dasar (pu)

Z_1 : impedansi urutan positif (pu)

Z_2 : impedansi urutan negatif (pu)

Z_0 : impedansi urutan nol (pu)

Z_f : impedansi gangguan hubung singkat (pu)

Sehingga akan terdeteksi arus dan tegangan saat terjadi gangguan satu fasa ke tanah pada rele jarak sesuai persamaan berikut (Anderson, P.M, 1999):

$$I_R = C_1 + C_2 + C_0 \quad (2-32)$$

Dengan,

C_1 : konstanta urutan positif $\left(\frac{Z_{1N}}{Z_{1M} + Z_{1N}}\right)$ (pu)

C_2 : konstanta urutan negatif $\left(\frac{Z_{2N}}{Z_{2M} + Z_{2N}}\right)$ (pu)

C_0 : konstanta urutan nol $\left(\frac{Z_{0N}}{Z_{0M} + Z_{0N}}\right)$ (pu)

$$V_R = Z_{1F} + Z_{2F} + Z_{0F} \quad (2-33)$$

Dengan,

Z_{F1} : konstanta impedansi urutan positif $[Z_F + (nZ_{1L} \times C_1)]$ (pu)

Z_{F2} : konstanta impedansi urutan negatif $[Z_F + (nZ_{2L} \times C_2)]$ (pu)

Z_{F0} : konstanta impedansi urutan nol $[Z_F + (nZ_{0L} \times C_0)]$ (pu)

dZ_{1L} : impedansi antara titik rele hingga gangguan urutan positif (pu)

dZ_{2L} : impedansi antara titik rele hingga gangguan urutan negatif (pu)

dZ_{0L} : impedansi antara titik rele hingga gangguan urutan nol (pu)

Setelah mengetahui nilai arus gangguan, maka selanjutnya perlu diketahui nilai impedansi gangguan yang terbaca oleh rele jarak. Besaran impedansi ini dapat diperoleh menggunakan persamaan berikut :

$$Z_{RP} = \frac{V_R}{I_R + (K_0 \times I_n)} \quad (2-34)$$

Dengan,

V_R : tegangan pada saat terjadi gangguan (V)

I_R : arus pada saat terjadi gangguan (A)

I_n : arus netral ($I_R + I_S + I_T$) (A)

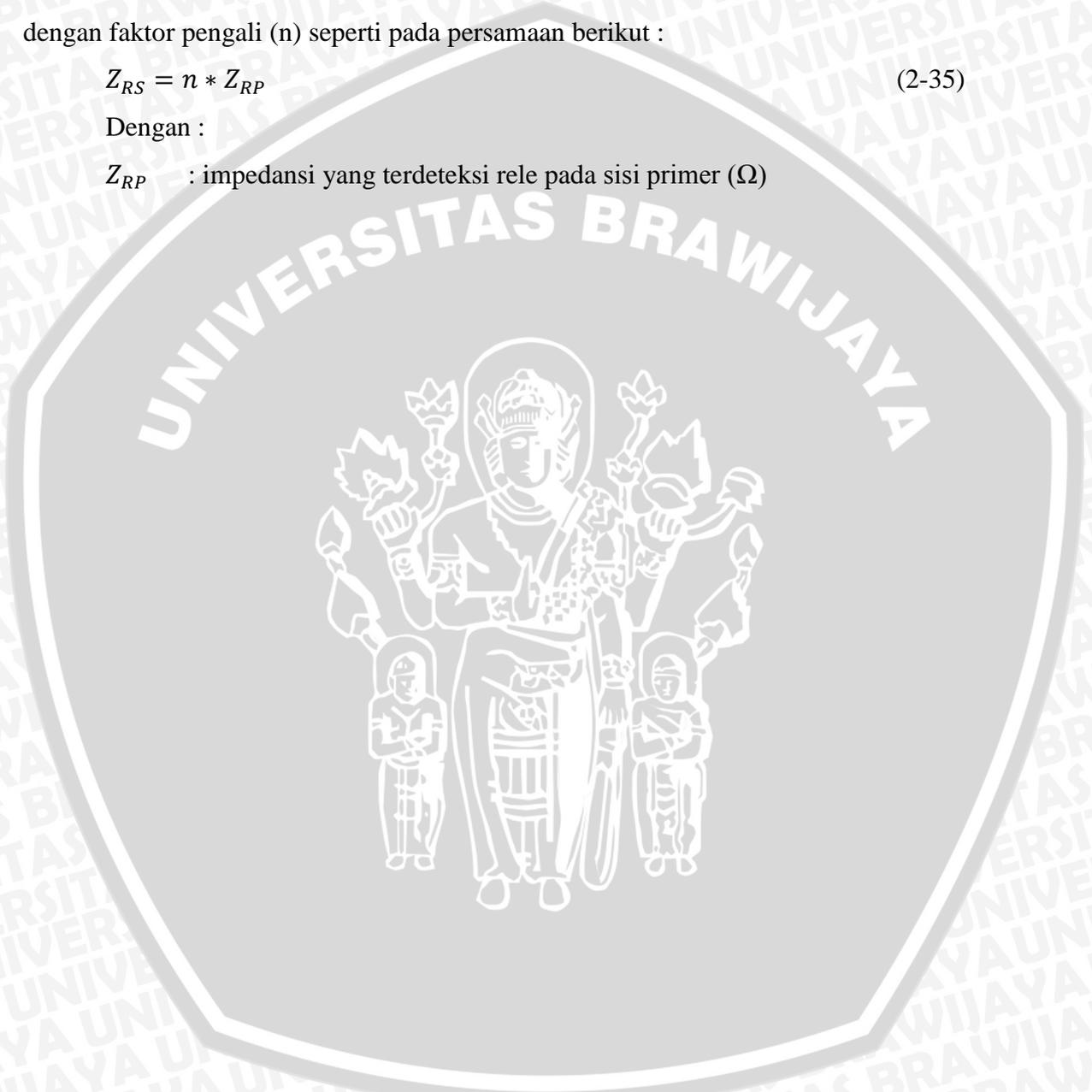
K_0 : kompensasi urutan nol ($\frac{Z_{0sal} - Z_{1sal}}{3 \times Z_{1sal}}$)

Nilai impedansi di atas merupakan nilai impedansi sebenarnya, sehingga untuk mengetahui nilai impedansi gangguan yang akan terbaca oleh rele maka perlu dikalikan dengan faktor pengali (n) seperti pada persamaan berikut :

$$Z_{RS} = n * Z_{RP} \quad (2-35)$$

Dengan :

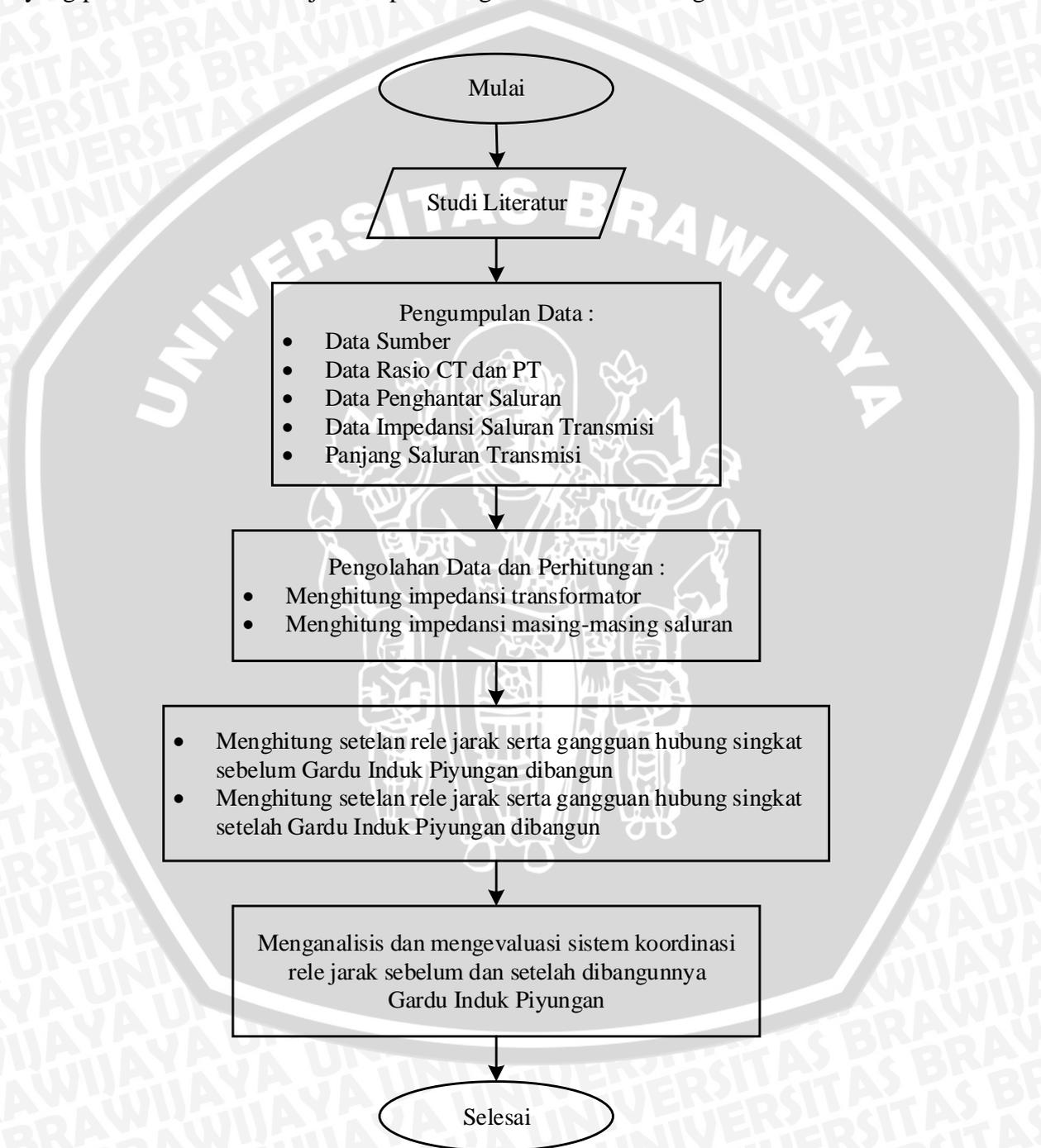
Z_{RP} : impedansi yang terdeteksi rele pada sisi primer (Ω)



BAB III

METODE PENELITIAN

Untuk menyelesaikan rumusan masalah dan merealisasikan tujuan penelitian, maka diperlukan metodologi untuk menyelesaikan permasalahannya. Langkah-langkah yang perlu dilakukan ditunjukkan pada diagram alir sesuai dengan Gambar 3.1:



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

3.1 Pengambilan Data

Penelitian ini dilakukan dengan pengambilan data yang diperoleh dari di PT. PLN (Persero) Distribusi Jawa Tengah dan DI Yogyakarta. Pengambilan data yang diperlukan dalam menyelesaikan penelitian ini berupa data primer dan data sekunder.

3.2 Data Sekunder

Data sekunder adalah data yang bersumber dari buku referensi, jurnal skripsi, tesis, disertasi, dan buku manual peralatan listrik dari pabrikan. Data yang dibutuhkan antara lain:

1. Diagram satu garis saluran transmisi Gardu Induk Semanu dan Gardu Induk Bantul.
2. Data spesifikasi transformator daya pada Gardu Induk Semanu, Gardu Induk Bantul, Gardu Induk Piyungan.
3. Data spesifikasi rele jarak pada Gardu Induk Semanu arah Gardu Induk Bantul.
4. Data spesifikasi kabel penghantar saluran transmisi Gardu Induk Semanu menuju Gardu Induk Bantul dan saluran transmisi Gardu Induk Bantul menuju Gardu Induk Godean dan Gardu Induk Klaten.

3.3 Prosedur Perhitungan

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

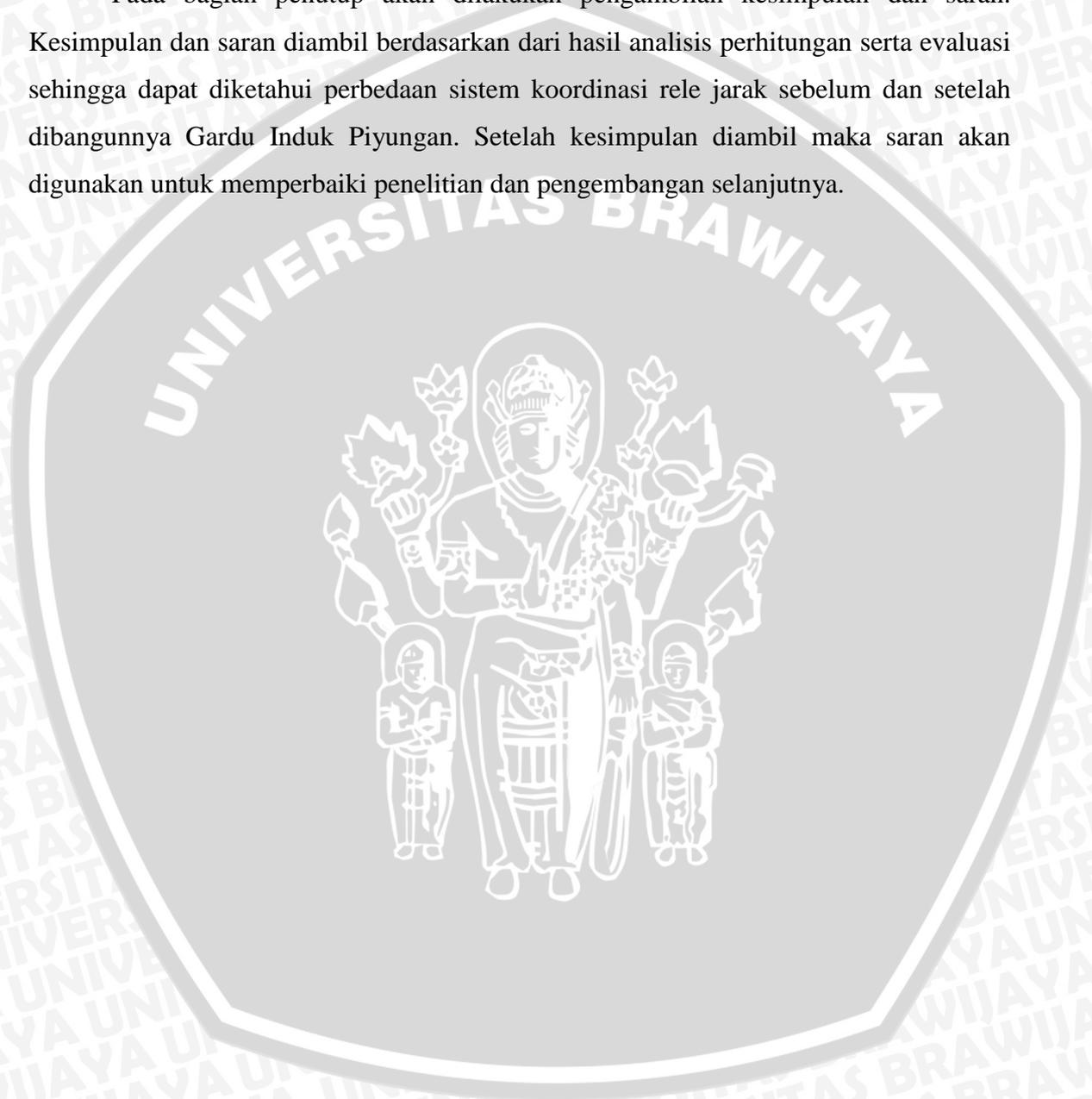
1. Menghitung penyetelan jangkauan impedansi serta penyetelan waktu rele jarak pada Gardu Induk Semanu, adapun langkah-langkah perhitungan adalah sebagai berikut :
 - a. Menghitung impedansi transformator menggunakan persamaan (2-10).
 - b. Menghitung impedansi urutan pada masing-masing saluran transmisi menggunakan persamaan (2-15) dan (2-16).
 - c. Menghitung faktor pengali menggunakan persamaan (2-24).
 - d. Menghitung impedansi setelan masing-masing zona rele jarak dengan menggunakan persamaan (2-17), (2-18), (2-19), (2-20), (2-21), (2-22) dan (2.23).

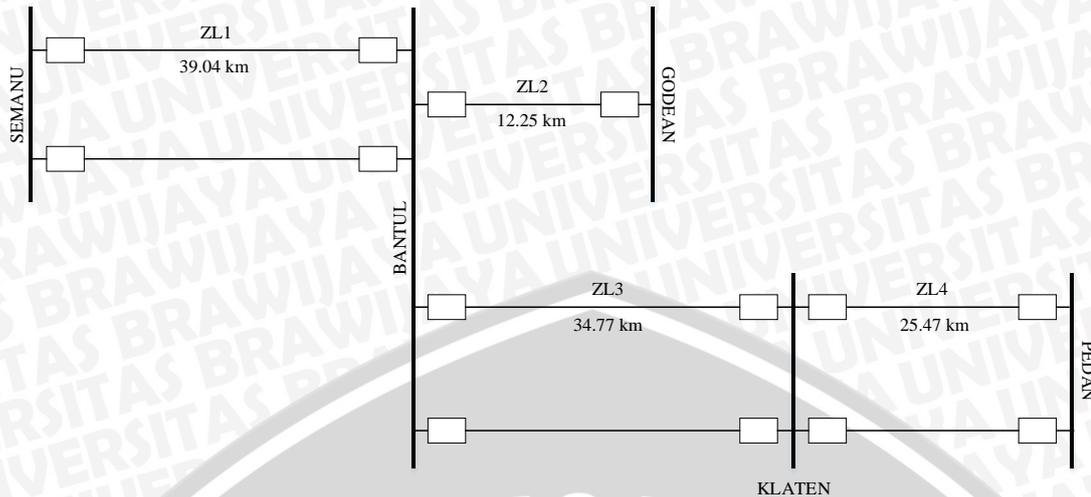
- e. Menghitung impedansi sisi sekunder atau impedansi yang terbaca oleh rele jarak. Nilai impedansi ini dapat diperoleh menggunakan persamaan (2-25).
 - f. Menentukan setelan waktu berdasarkan karakteristik waktu kerja masing-masing zona pengaman rele jarak.
2. Menghitung arus gangguan hubung singkat yang terjadi pada berbagai titik lokasi gangguan yang diasumsikan dengan berjarak 10%, 20%, 30% hingga 100% panjang saluran transmisi. Adapun langkah-langkah perhitungan sebagai berikut :
- a. Menghitung arus dasar dengan menggunakan persamaan (2-7).
 - b. Menghitung impedansi dasar dengan menggunakan persamaan (2-8).
 - c. Menghitung impedansi urutan pada masing-masing saluran transmisi menggunakan persamaan (2-15) dan (2-16).
 - d. Menghitung impedansi total masing-masing urutan sesuai dengan Lampiran I.1.
 - e. Menghitung arus gangguan hubung singkat dengan menggunakan persamaan (2-26) dan (2-31).
 - f. Menghitung arus gangguan yang terdeteksi oleh rele jarak menggunakan persamaan (2-27) dan (2-32).
 - g. Menghitung tegangan gangguan yang terdeteksi oleh rele jarak menggunakan persamaan (2-28) dan (2-33).
 - h. Menghitung impedansi gangguan yang terbaca oleh rele jarak pada sisi primer menggunakan persamaan (2-29) dan (2-34).
 - i. Menghitung nilai impedansi gangguan sebenarnya yang terbaca oleh rele jarak menggunakan persamaan (2-30) dan (2-35).
3. Menganalisis koordinasi zona proteksi serta jangkauan impedansi rele jarak untuk berbagai gangguan arus hubung singkat.
4. Menentukan letak atau lokasi bus baru (bus Gardu Induk Piyungan). Penentuan lokasi ini dapat membantu mengetahui impedansi urutan setiap titik saluran transmisi untuk setiap jangkauan impedansi yang akan dihitung setelah Gardu Induk Piyungan.
5. Melakukan langkah 1 dan langkah 2 dengan data gardu induk baru tersebut.
6. Menganalisis perbandingan hasil perhitungan rele jarak sebelum dan setelah dibangunnya Gardu Induk Piyungan. Analisis ini dilakukan dengan cara

membandingkan hasil perhitungan penyetelan jangkauan impedansi serta penyetelan waktu pada rele jarak Gardu Induk Semanu pada saat sebelum dan setelah dibangunnya Gardu Induk Piyungan.

3.4 Penutup

Pada bagian penutup akan dilakukan pengambilan kesimpulan dan saran. Kesimpulan dan saran diambil berdasarkan dari hasil analisis perhitungan serta evaluasi sehingga dapat diketahui perbedaan sistem koordinasi rele jarak sebelum dan setelah dibangunnya Gardu Induk Piyungan. Setelah kesimpulan diambil maka saran akan digunakan untuk memperbaiki penelitian dan pengembangan selanjutnya.



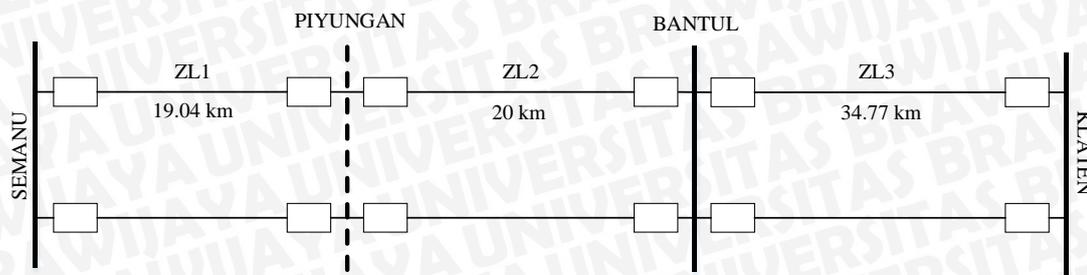


Gambar 4.2 Konfigurasi Jaringan Gardu Induk Semanu arah Bantul
Sumber: PT. PLN (Persero) APD DI Yogyakarta, 2015

Rencana pembangunan Gardu Induk Baru ini (Gardu Induk Piyungan) terletak di Desa Sendangsari Kecamatan Pajangan Kabupaten Bantul. Rencana pembangunan Gardu Induk Piyungan ini terdiri dari berbagai pemasangan peralatan yang dapat dilihat pada Lampiran II.5. Pada rencana pembangunan gardu induk baru ini, salah satu sarana yang dibutuhkan adalah Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT).

Konfigurasi Gardu Induk Piyungan adalah dengan memotong *double-phi* SUTT 150kV Gardu Induk Bantul – Gardu Induk Semanu. Dengan adanya perubahan konfigurasi saluran transmisi ini, maka terjadi pula perubahan akibatnya baik pada aliran daya, maupun dari segi proteksinya. Dengan adanya pemotongan ini, jarak saluran Gardu Induk Semanu Arah Bantul juga berubah, sehingga diperlukan perhitungan ulang setelan rele jarak pada Gardu Induk Semanu.

Titik lokasi gardu induk baru ini sebenarnya belum ditentukan, karena masih dalam perencanaan. Namun pada kajian kelayakan proyek telah diketahui bahwa jarak Desa Sendangsari dengan Gardu Induk Bantul adalah 20 km, sehingga dapat dianggap bahwa jarak Gardu Induk Piyungan dari Gardu Induk Semanu adalah 19,04 km. Sehingga konfigurasi jaringan Gardu Induk Semanu menjadi seperti Gambar 4.3. Pada gambar berikut terlihat bahwa saluran yang diamankan oleh rele jarak pada Gardu Induk Semanu berubah, yaitu saluran menuju Gardu Induk Piyungan.



Gambar 4.3 Konfigurasi Jaringan Gardu Induk Semanu Setelah Gardu Induk Piyungan Dibangun

Sumber: PT. PLN (Persero) APD DI Yogyakarta, 2013

4.2 Gardu Induk Semanu

Gardu Induk (GI) Semanu adalah salah satu GI yang ada di wilayah Area Pelaksana Pemeliharaan Salatiga. Gardu Induk Semanu memiliki 2 buah transformator yang menerima suplai tegangan 150kV. Transformator I dan transformator II yang berfungsi untuk menurunkan tegangan 150kV menjadi 22kV. Dari kedua transformator tersebut disalurkan ke penyulang-penyulang, yang mana transformator distribusi pada penyulang tersebut menurunkan tegangan 22kV menjadi 380/220V sesuai dengan kebutuhan konsumen. Gardu Induk Semanu mensuplai energi listrik untuk daerah Gunung Kidul.

Pengaturan beban dan energi Gardu Induk Semanu adalah sebagai berikut :

- Transformator I dengan kapasitas 30 MVA meyalurkan energi ke penyulang Semanu 02, Semanu 04, dan Semanu 05.
- Transformator II dengan kapasitas 30 MVA menyalurkan energi ke penyulang Semanu 01, Semanu 03, dan Semanu 06.

Berdasarkan dari gambar *single line diagram* (diagram satu garis) Gardu Induk Semanu, dapat dilihat bahwa saluran transmisi Gardu Induk Semanu hanya terhubung dengan Gardu Induk Bantul. Kedua gardu induk ini terhubung melalui *double-phi* Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 150kV. Sesuai dengan adanya rencana pembangunan Gardu Induk Piyungan, konfigurasi gardu induk baru ini adalah memotong *double-phi* SUTT 150kV Gardu Induk Bantul menuju Gardu Induk Semanu.

Untuk perhitungan setelan jangkauan rele jarak dibutuhkan data transformator untuk gardu induk di depannya (Gardu Induk Bantul). Pada gardu induk Bantul terdapat dua buah transformator daya yang berfungsi mensuplai energi listrik untuk wilayah Kabupaten Sleman dan Kodya Yogyakarta bagian utara. Berikut merupakan spesifikasi transformator pada Gardu Induk Bantul :

Tabel 4.1 Data Transformator Daya Gardu Induk Bantul

	Trafo I	Trafo III
Merk	Xian	Pasti
Daya	60 MVA	60 MVA
Impedansi	12,35%	12,79%
Tegangan	150/20kV	150/20kV
Hub. Belitan	YNyn0 (d11)	YNyn0 (d11)

Sumber: PT. PLN (Persero) APD DI Yogyakarta, 2015

4.3 Perhitungan Penyetelan Rele Jarak Sebelum Gardu Induk Piyungan Dibangun

4.3.1 Perhitungan Impedansi Transformator Daya

Data sekunder impedansi transformator daya pada Gardu Induk Bantul dapat terlihat pada Tabel 4.1 masih dalam bentuk presentase. Maka impedansi transformator daya dapat diperoleh menggunakan Persamaan (2-10) sebagai berikut :

Transformator I;

$$\begin{aligned} Z_{1T}(\Omega) = Z_{2T}(\Omega) &= \frac{(150)^2}{60} \times j0,1235 \\ &= j46,3125 \Omega \end{aligned}$$

Transformator III;

$$\begin{aligned} Z_{1T}(\Omega) = Z_{2T}(\Omega) &= \frac{(150)^2}{60} \times j0,1279 \\ &= j47,9625 \Omega \end{aligned}$$

Karena kedua transformator daya pada Gardu Induk Bantul yang terpasang mempunyai hubungan belitan YNyn0 (d11), maka nilai impedansi urutan nol transformator daya dapat diperoleh menggunakan Persamaan (2-13) sebagai berikut :

Transformator I;

$$\begin{aligned} Z_{0T}(\Omega) &= 3 \times j46,3125 \Omega \\ &= j138,938 \Omega \end{aligned}$$

Transformator III;

$$\begin{aligned} Z_{0T}(\Omega) &= 3 \times j47,9625 \Omega \\ &= j143,888 \Omega \end{aligned}$$

Untuk perhitungan berikutnya akan dibutuhkan impedansi transformator sebagai batas nilai impedansi setelan, dari kedua impedansi urutan positif di atas, diambil impedansi transformator terkecil agar batas setelan impedansi tidak terlalu besar, yaitu impedansi Transformator I ($Z_T = j46,3125 \Omega$).

4.3.2 Perhitungan Impedansi Saluran Transmisi

Untuk mengetahui impedansi saluran transmisi, dengan memasukkan data sekunder yang ditunjukkan pada Tabel 4.2. berikut.

Tabel 4.2. Tabel Jenis dan Jarak Penghantar Saluran Transmisi

Dari	Ke	Tegangan (kV)	Jarak (km)	Jenis Kawat	Luas Penampang (mm ²)	I Nom (A)
SEMANU	BANTUL	150	39,04	ACSR	240/40	500
SEMANU	BANTUL	150	39,04	ACSR	240/40	500
BANTUL	GODEAN	150	12,25	ACSR	240/40	600
BANTUL	KLATEN	150	34,77	ACSR	240/40	600
BANTUL	KLATEN	150	34,77	ACSR	240/40	600
KLATEN	PEDAN	150	25,47	ACSR	240/40	1200
KLATEN	PEDAN	150	25,47	ACSR	240/40	1200

Sumber: PT. PLN (Persero) APD DI Yogyakarta, 2015

Diketahui pula untuk penghantar tipe ACSR 240/40 mm², nilai impedansi penghantarnya adalah sebagai berikut:

$$Z_{1\text{ peng}} = Z_{2\text{ peng}} = 0,137 + j0,3966 (\Omega/\text{km})$$

$$Z_{0\text{ peng}} = 0,287 + j1,19 (\Omega/\text{km})$$

Sehingga dapat dihitung impedansi saluran transmisi urutan positif dan negatif menggunakan Persamaan (2-15) sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Z_{1\text{ SNU-BNL}} = Z_{2\text{ SNU-BNL}} &= (0,137 + j0,3966 (\Omega/\text{km})) \times 39,04 (\text{km}) \\ &= 5,3484 + j15,4832 \Omega = 16,3809 \angle 70,94^\circ \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{1\text{ BNL-GDN}} = Z_{2\text{ BNL-GDN}} &= (0,137 + j0,3966 (\Omega/\text{km})) \times 12,25 (\text{km}) \\ &= 1,6782 + j4,8583 \Omega = 5,1400 \angle 70,94^\circ \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{1\text{ BNL-KLT}} = Z_{2\text{ BNL-KLT}} &= (0,137 + j0,3966 (\Omega/\text{km})) \times 34,77 (\text{km}) \\ &= 4,7635 + j13,7897 \Omega = 14,5893 \angle 70,94^\circ \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{1\text{ KLT-PDN}} = Z_{2\text{ KLT-PDN}} &= (0,137 + j0,3966 (\Omega/\text{km})) \times 25,47 (\text{km}) \\ &= 3,4894 + j10,1014 \Omega = 10,6871 \angle 70,94^\circ \Omega \end{aligned}$$

Sedangkan untuk perhitungan impedansi saluran transmisi urutan nol dapat diperoleh dengan Persamaan (2-16) sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Z_{0\text{ SNU-BNL}} &= (0,287 + j1,19 (\Omega/\text{km})) \times 39,04 (\text{km}) \\ &= 11,2044 + j46,4576 \Omega = 47,7896 \angle 76,44^\circ \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{0\text{ BNL-GDN}} &= (0,287 + j1,19 (\Omega/\text{km})) \times 12,25 (\text{km}) \\ &= 3,5157 + j14,5775 \Omega = 14,9954 \angle 76,44^\circ \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{0\text{ BNL-KLT}} &= (0,287 + j1,19 (\Omega/\text{km})) \times 34,77 (\text{km}) \\ &= 9,9789 + j41,3763 \Omega = 42,5626 \angle 76,44^\circ \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{0\text{ KLT-PDN}} &= (0,287 + j1,19 (\Omega/\text{km})) \times 25,47 (\text{km}) \\ &= 7,3098 + j30,3093 \Omega = 31,1783 \angle 76,44^\circ \Omega \end{aligned}$$

4.3.3 Perhitungan Penyetelan Rele Jarak

Setelah mendapatkan perhitungan impedansi transformator dan impedansi saluran transmisi, maka tahap selanjutnya adalah menghitung nilai setelan rele jarak.

4.3.3.1 Faktor Pengali

Sebelum menghitung nilai impedansi masing-masing zona, dilakukan perhitungan faktor pengali terlebih dahulu untuk memudahkan perhitungan impedansi yang akan terbaca oleh rele pada perhitungan selanjutnya. Faktor pengali diperoleh menggunakan Persamaan (2-24) seperti berikut:

$$\begin{aligned} \text{Rasio PT} &= \frac{150000 \text{ Volt}}{100 \text{ Volt}} \\ \text{Rasio CT} &= \frac{2000 \text{ A}}{5 \text{ A}} \\ n &= \frac{\text{Rasio CT}}{\text{Rasio PT}} = \frac{2000/5}{150000/100} \\ n &= \frac{4}{15} = 0,2667 \end{aligned}$$

4.3.3.2 Penyetelan Zona 1

Untuk menghitung nilai impedansi Zona 1, perlu diketahui nilai impedansi saluran yang diamankan. Sesuai perhitungan sebelumnya, telah didapatkan nilai impedansi saluran yang diamankan. Sehingga dapat dihitung impedansi Zona 1 pada sisi primer menggunakan Persamaan (2-17) sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Z_{1p} &= 0,8 \times Z_{1\text{ SNU-BNL}} \\ &= 0,8 \times (5,3484 + j15,4832) \Omega \end{aligned}$$

$$= 4,2787 + j12,3866 \Omega = 13,1047 \angle 70,94^\circ \Omega$$

Setelah mendapatkan nilai impedansi Zona 1 pada sisi primer, kemudian perlu dihitung impedansi Zona 1 pada sisi sekunder (setelan rele jarak) sesuai dengan Persamaan (2-25) sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Z_{1S} &= 0,2667 \times (Z_1) \Omega \\ &= 1,141 + j3,303 \Omega = 3,4946 \angle 70,94^\circ \Omega \end{aligned}$$

Jadi nilai setelan impedansi rele jarak untuk Zona 1 adalah 3,4946 Ω . Sedangkan untuk setelan waktu rele pada Zona 1 diatur seketika (*instantaneous*), atau diatur sama dengan nol detik ($t_1 = 0$ s).

4.3.3.3 Penyetelan Zona 2

Untuk menghitung nilai impedansi Zona 2, perlu diketahui nilai impedansi saluran yang diamankan dan saluran sesi berikutnya yang terpendek (Gardu Induk Bantul Arah Godean). Sesuai perhitungan sebelumnya, telah didapatkan nilai impedansi saluran yang diamankan serta perhitungan impedansi saluran berikutnya. Karena pada sesi berikutnya terdapat transformator, maka perlu juga dihitung nilai impedansi transformator sesuai Persamaan (2-20). Sehingga dapat dihitung impedansi Zona 2 pada sisi primer menggunakan Persamaan (2-18) dan (2-19) sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Z_{2min} &= 1,2 \times Z_{1\text{ SNU-BNL}} \\ &= 1,2 \times (5,3484 + j15,4832) \Omega \\ &= 6,4181 + j18,5798 \Omega = 19,6571 \angle 70,94^\circ \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{2maks} &= 0,8 \times (Z_{1\text{ SNU-BNL}} + 0,8 \times Z_{1\text{ BNL-GDN}}) \\ &= 0,8 \times [(5,3484 + j15,4832) + \{0,8 \times (1,6782 + j4,8583)\}] \Omega \\ &= 5,3527 + j15,4958 \Omega = 16,3943 \angle 70,94^\circ \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{2T} &= 0,8 \times (Z_{1\text{ SNU-BNL}} + (0,5 * jX_t)) \\ &= 0,8 \times \{(5,3484 + j15,4832) + (0,5 \times j46,3125)\} \Omega \\ &= 4,2787 + j30,9115 \Omega = 31,2062 \angle 82,11^\circ \Omega \end{aligned}$$

Hasil perhitungan di atas menunjukkan nilai Z_{2min} lebih besar dari nilai Z_{2maks} , hal ini dikarenakan saluran yang diamankan (Semanu – Bantul) jauh lebih panjang dibandingkan saluran saluran sesi berikutnya (Bantul – Godean). Oleh karena itu untuk impedansi Zona 2 dipilih nilai Z_{2min} , selain itu kedua nilai impedansi tidak melebihi nilai Z_{2T} . Setelah menentukan impedansi Zona 2 pada sisi primer, maka langkah selanjutnya

adalah perhitungan impedansi Zona 2 pada sisi sekunder menggunakan Persamaan (2-25) berikut :

$$\begin{aligned} Z_{2S} &= 0,2667 \times (Z_{2p}) \Omega \\ &= 1,7115 + j4,9546 \Omega = 5,2418 \angle 70,94^\circ \Omega \end{aligned}$$

Jadi nilai setelan impedansi rele jarak untuk Zona 2 adalah 5,2418 Ω . Sedangkan untuk setelan waktu rele pada Zona 2 diatur menjadi berikut, dengan waktu tunda dinaikkan satu tingkat menjadi ($\Delta t = 0,8$ s).

$$t_2 = t_1 + \Delta t = 0 + 0,8 \text{ s} = 0,8 \text{ s}$$

4.3.3.4 Penyetelan Zona 3

Untuk menghitung nilai impedansi Zona 3, perlu diketahui nilai impedansi saluran yang diamankan, saluran sesi berikutnya yang terpanjang (Gardu Induk Bantul Arah Klaten) serta saluran sesi berikutnya (Gardu Induk Klaten Arah Pedan). Sesuai perhitungan sebelumnya, telah didapatkan nilai impedansi saluran yang diamankan. Karena pada sesi berikutnya terdapat transformator, maka perlu juga dihitung nilai impedansi transformator sesuai Persamaan (2-23). Sehingga dapat dihitung impedansi Zona 3 pada sisi primer menggunakan Persamaan (2-21) dan (2-22) sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Z_{3min} &= 1,2 \times [Z_{1\text{SNU-BNL}} + (0,8 \times Z_{1\text{BNL-KLT}})] \\ &= 1,2 \times [(5,3484 + j15,4832) + \{0,8 \times (4,7635 + j13,7897)\}] \Omega \\ &= 10,991 + j31,818 \Omega = 33,6628 \angle 70,94^\circ \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{3maks} &= 0,8 \times [Z_{1\text{SNU-BNL}} + 0,8 \times \{Z_{1\text{BNL-KLT}} + 0,8 \times (Z_{1\text{KLT-PDN}})\}] \\ &= 0,8 \times \{(5,3484 + j15,4832) + 0,8 \times [(4,7635 + j13,7897) + \\ &\quad \{0,8 \times (3,4894 + j10,1014)\}]\} \Omega \\ &= 9,1139 + j26,3838 \Omega = 27,9136 \angle 70,94^\circ \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{3T} &= 0,8 \times (Z_{1\text{SNU-BNL}} + (0,8 \times jX_t)) \\ &= 0,8 \times \{(5,3484 + j15,4832) + (0,8 \times j46,3125)\} \Omega \\ &= 4,2787 + j42,0265 \Omega = 42,2438 \angle 84,18^\circ \Omega \end{aligned}$$

Hasil perhitungan di atas menunjukkan nilai Z_{3min} lebih besar dari nilai Z_{3maks} , hal ini dikarenakan saluran yang diamankan (Semanu – Bantul) jauh lebih panjang dibandingkan saluran saluran sesi berikutnya (Bantul – Klaten). Oleh karena itu untuk impedansi Zona 3 dipilih nilai Z_{3min} , kedua nilai impedansi ini juga tidak melebihi nilai Z_{3T} . Setelah menentukan impedansi Zona 3 pada sisi primer, maka langkah selanjutnya

adalah perhitungan impedansi Zona 3 pada sisi sekunder menggunakan Persamaan (2-25) berikut :

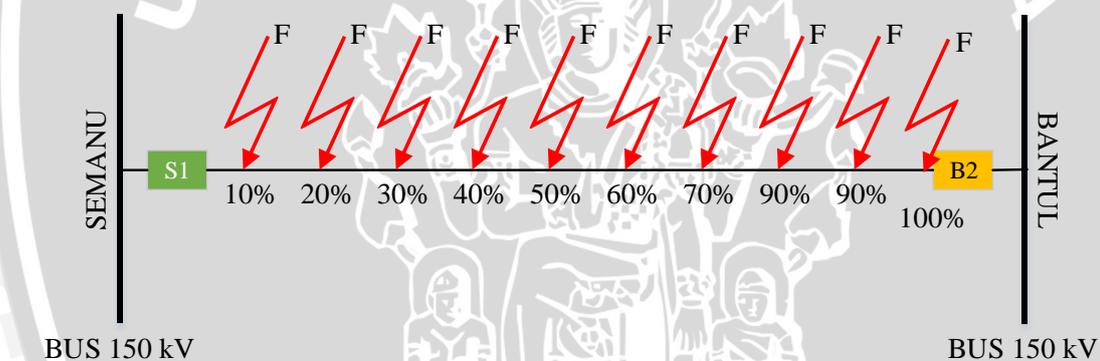
$$\begin{aligned} Z_{3s} &= 0,2667 \times (Z_{3p}) \Omega \\ &= 2,9309 + j8,4848 \Omega = 8,9767 \angle 70,94^\circ \Omega \end{aligned}$$

Jadi nilai setelan impedansi rele jarak untuk Zona 3 adalah $8,9767 \Omega$ dan untuk setelan waktu rele pada Zona 3 diatur menjadi menjadi berikut:

$$t_3 = t_2 + \Delta t = 0,8 \text{ s} + 0,8 \text{ s} = 1,6 \text{ s}$$

4.3.4 Perhitungan Gangguan Hubung Singkat

Untuk perhitungan arus gangguan hubung singkat dihitung berdasarkan panjang saluran transmisi yang diamankan, seperti pada Gambar 4.4 yaitu gangguan hubung singkat diasumsikan terjadi pada saluran transmisi 150 kV antara Gardu Induk Semanu dan Gardu Induk Bantul dengan 10%, 20%, 30% hingga 100% panjang saluran transmisi yang diamankan.



Gambar 4.4 Diagram Satu Garis Saluran Transmisi Semanu – Bantul Dengan Berbagai Titik Lokasi Gangguan

4.3.4.1 Menghitung Arus Dasar

Perhitungan arus dasar diperoleh dari hasil perbandingan antara daya dasar dan tegangan dasar yang telah ditentukan. Dalam perhitungan ini ditentukan daya dasar atau MVA_{base} sebesar 100 MVA dan tegangan dasar atau kV_{base} sebesar 150 kV. Dengan menggunakan Persamaan (2-4) diperoleh nilai arus dasar sebagai berikut :

$$\begin{aligned} I_{base} &= \frac{100.000 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 150 \text{ kV}} \\ &= 384,9 \text{ A} \end{aligned}$$

4.3.4.2 Menghitung Impedansi Dasar

Perhitungan impedansi dasar mengacu dari nilai tegangan dan daya dasar yang sebelumnya telah ditentukan, yaitu 100 MVA dan 150 kV. Dengan menggunakan kedua nilai tersebut dengan menggunakan Persamaan (2-8) diperoleh impedansi dasar sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Z_{base} &= \frac{(150)^2 \text{ kV}}{100 \text{ MVA}} \\ &= 225 \Omega \end{aligned}$$

4.3.4.3 Menghitung Impedansi Saluran

Untuk mengetahui besar impedansi penyulang pada suatu titik gangguan tertentu dapat diasumsikan dengan 10%, 20%, 30%, hingga 100% dari panjang saluran transmisi, dengan memasukkan data sekunder yang ditunjukkan pada Tabel 4.1. Perhitungan impedansi saluran urutan positif, urutan negatif dan urutan nol telah diperoleh dari hasil perhitungan sebelumnya.

4.3.4.4 Menghitung Impedansi Total

Dalam perhitungan ini dibutuhkan nilai impedansi urutan positif, urutan negatif dan urutan nol untuk berbagai titik lokasi terjadinya gangguan. Nilai impedansi total urutan positif, urutan negatif dan urutan nol pada gangguan beberapa titik saluran transmisi dapat diperoleh menggunakan penyederhanaan rangkaian yang tertera pada Lampiran I.1 sehingga diperoleh nilai impedansi total pada gangguan 50% saluran transmisi sebagai berikut:

$$Z_1 = 0,01196 + j0,04163 \text{ pu}$$

$$Z_2 = 0,01193 + j0,042 \text{ pu}$$

$$Z_0 = 0,02616 + j0,1114 \text{ pu}$$

Dengan cara yang sama seperti tertera pada Lampiran I.1 maka untuk perhitungan impedansi urutan positif, urutan negatif dan urutan nol untuk berbagai titik lokasi gangguan hubung singkat dapat dilihat pada tabel Lampiran I.3.

4.3.4.5 Menghitung Arus Gangguan Hubung Singkat

Setelah mendapatkan nilai dari impedansi total sesuai titik lokasi terjadinya gangguan hubung singkat, selanjutnya perhitungan arus gangguan hubung singkat dapat dihitung. Nilai impedansi total tergantung dari jenis gangguan hubung singkat yang

terjadi. Pada perhitungan arus gangguan hubung singkat nilai tegangan (E_a) adalah sebesar $1\angle 0^\circ$ karena dalam bentuk per unit (pu).

Perhitungan arus gangguan hubung singkat tiga fasa dengan menggunakan data pada Lampiran I.3 ke dalam Persamaan (2-26) seperti berikut. Perhitungan arus gangguan hubung singkat berikut dilakukan dengan titik gangguan di 50% panjang saluran transmisi.

$$\begin{aligned} I_{hs-3\phi} &= \frac{1\angle 0^\circ}{0,01196 + j0,04163} pu \\ &= 6,3746 - j22,1852 pu \end{aligned}$$

Karena perhitungan diatas masih dalam satuan per unit maka untuk mengetahui nilai sebenarnya dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} I_{hs-3\phi} &= I_{hs-3\phi} (pu) \times I_{base} (A) \\ &= 6,3746 - j22,1852 (pu) \times 384,9 A \\ &= 8,8846\angle - 73,96^\circ kA \end{aligned}$$

Sehingga arus hubung singkat tiga fasa yang terjadi pada titik 50% panjang saluran adalah 8.8846 kA.

Perhitungan arus gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah dengan menggunakan data pada Lampiran I.3 ke dalam Persamaan (2-31) seperti berikut. Perhitungan arus gangguan hubung singkat berikut dilakukan dengan titik gangguan di 50% panjang saluran.

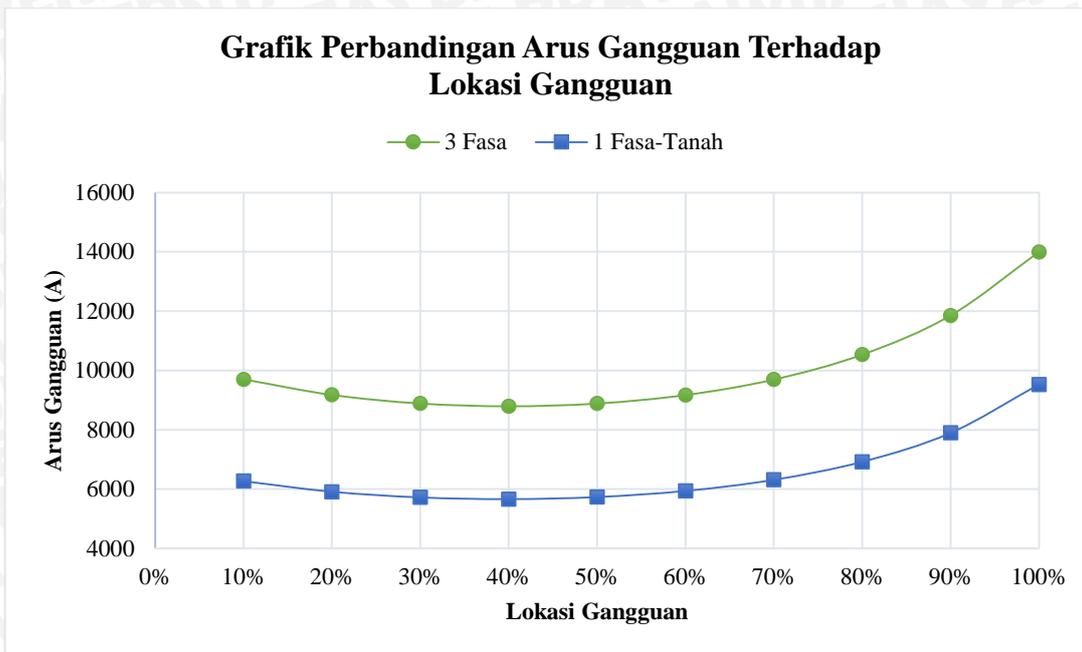
$$\begin{aligned} I_{hs-1\phi} &= \frac{3 \times 1\angle 0^\circ}{0,01196 + j0,04163 + 0,01193 + j0,042 + 0,02467 + j0,1023} \\ &= 3,7022 - j14,4265 pu \end{aligned}$$

Karena perhitungan diatas masih dalam satuan per unit maka untuk mengetahui nilai sebenarnya dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} I_{hs-1\phi} &= I_{hs-1\phi} (pu) \times I_{base} (A) \\ &= 3,7022 - j14,4265 (pu) \times 384,9 A \\ &= 5,7327\angle - 75,60^\circ kA \end{aligned}$$

Sehingga arus hubung singkat fasa ke tanah yang terjadi pada titik 50% panjang saluran adalah 5,7327 kA.

Dengan cara yang sama maka untuk perhitungan arus gangguan hubung singkat untuk berbagai titik lokasi gangguan dapat dilihat pada Lampiran I.5. Untuk perbandingan nilai arus gangguan tiga fasa dan gangguan satu fasa ke tanah dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Arus Gangguan Terhadap Lokasi Gangguan Sebelum GI Piyungan Dibangun

Dapat dilihat dari tabel pada Lampiran I.5 dapat dianalisis bahwa arus gangguan hubung singkat terbesar adalah arus gangguan hubung singkat tiga fasa pada saat lokasi gangguan 10% saluran transmisi, yaitu sebesar 9,7022 kA dan untuk arus gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah sebesar 6,2682 kA. Besarnya nilai arus gangguan hubung singkat berbanding lurus dengan jarak atau lokasi gangguan terjadi, semakin jauh jarak lokasi gangguan maka arus gangguan hubung singkat semakin besar.

4.3.4.6 Menghitung Impedansi Gangguan Yang Terbaca Rele

Sebelum menghitung nilai impedansi gangguan yang terbaca oleh rele, perlu diketahui nilai arus dan tegangan yang terdeteksi oleh rele ketika gangguan terjadi menggunakan data hasil perhitungan yang tertera pada Lampiran I.2 dan Lampiran I.3, untuk mendapatkan nilai arus dan tegangan gangguan hubung singkat tiga fasa digunakan persamaan (2-27) dan (2-28) seperti berikut :

$$I_R = C_1 = 0,4377 + j0,00367 \text{ pu}$$

$$\begin{aligned} V_R = Z_{1F} &= 0 + [(0,01188 + j0,0344) \times (0,4377 + j0,00367)] \\ &= 0,00507 + j0,0151 \text{ pu} \end{aligned}$$

Karena perhitungan diatas masih dalam satuan per unit maka untuk mengetahui nilai sebenarnya dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$I_R = (0,4377 + j0,00367) \times 384,9 \text{ A}$$

$$= 168,4931 + j1,416 A = 168,4991 \angle 0,48^\circ A$$

$$\begin{aligned} V_R &= (0,00507 + j0,0151) \times 150000/\sqrt{3} V \\ &= 439,6285 + j1308,1996 V = 1380,0939 \angle 71,42^\circ V \end{aligned}$$

Untuk nilai arus gangguan dan tegangan gangguan yang terdeteksi oleh rele pada sisi primer saat terjadi gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah dapat diperoleh menggunakan persamaan (2-32) dan (2-33) berikut :

$$\begin{aligned} I_R &= (0,4377 + j0,00367) + (0,4383 + j0,00384) + (0,4303 + j0,00047) \\ &= 1,3064 + j0,00799 pu \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_R &= (0,00507 + j0,0151) + (0,00507 + j0,01512) \\ &\quad + (0,01066 + j0,04444) \\ &= 0,0208 + j0,07467 pu \end{aligned}$$

Karena perhitungan diatas masih dalam satuan per unit maka untuk mengetahui nilai sebenarnya dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} I_R &= (1,3064 + j0,00799) \times 384,9 A \\ &= 502,8556 + j3,0782 A = 502,865 \angle 0,35^\circ A \\ V_R &= (0,0208 + j0,07467) \times 150000/\sqrt{3} V \\ &= 1803,1381 + j6467,2213 V = 6713,8855 \angle 74,42^\circ V \end{aligned}$$

Setelah memperoleh nilai arus dan tegangan gangguan hubung singkat, maka untuk mendapatkan nilai impedansi yang akan terbaca oleh rele dapat digunakan persamaan (2-29) dan (2-34) sebagai berikut :

Besaran impedansi gangguan yang terbaca oleh rele pada saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa pada titik 50% saluran transmisi adalah :

$$\begin{aligned} Z_{fp} &= \frac{1380,0939 \angle 71,42^\circ V}{168,4991 \angle 0,48^\circ A} \\ &= 2,6742 + j7,7416 \Omega \end{aligned}$$

Nilai impedansi diatas merupakan nilai impedansi gangguan sebenarnya atau impedansi gangguan pada sisi primer, sedangkan nilai impedansi gangguan yang terbaca oleh rele diperoleh menggunakan Persamaan (2-30) berikut :

$$\begin{aligned} Z_{fs} &= 0,2667 \times (2,6742 + j7,7416) \Omega \\ &= 0,7131 + j2,0644 \Omega = 2,1841 \angle 70,94^\circ \Omega \end{aligned}$$

Sehingga nilai impedansi gangguan tiga fasa yang terdeteksi oleh rele jarak adalah 2.1841 Ω , nilai ini jauh lebih kecil dibandingkan nilai setelan impedansi rele jarak. Sebelum menghitung besaran impedansi gangguan yang terbaca oleh rele pada saat terjadi

gangguan hubung singkat fasa ke tanah, terlebih dulu dilakukan perhitungan kompensasi urutan nol menggunakan persamaan berikut:

$$K_0 = \frac{Z_{0\text{ sal}} - Z_{1\text{ sal}}}{3 \times Z_{1\text{ sal}}} = \frac{(0,02489 + j0,1238) - (0,1188 + j0,0344)}{3 \times (0,1188 + j0,0344)}$$

$$= 0,6346 + j0,09316$$

Sehingga impedansi gangguan satu fasa ke tanah pada titik 50% saluran adalah :

$$Z_{fp} = \frac{6713,8855 \angle 74,42^\circ V}{502,865 \angle 0,35^\circ + (K_0 \times 502,865 \angle 0,35^\circ) A}$$

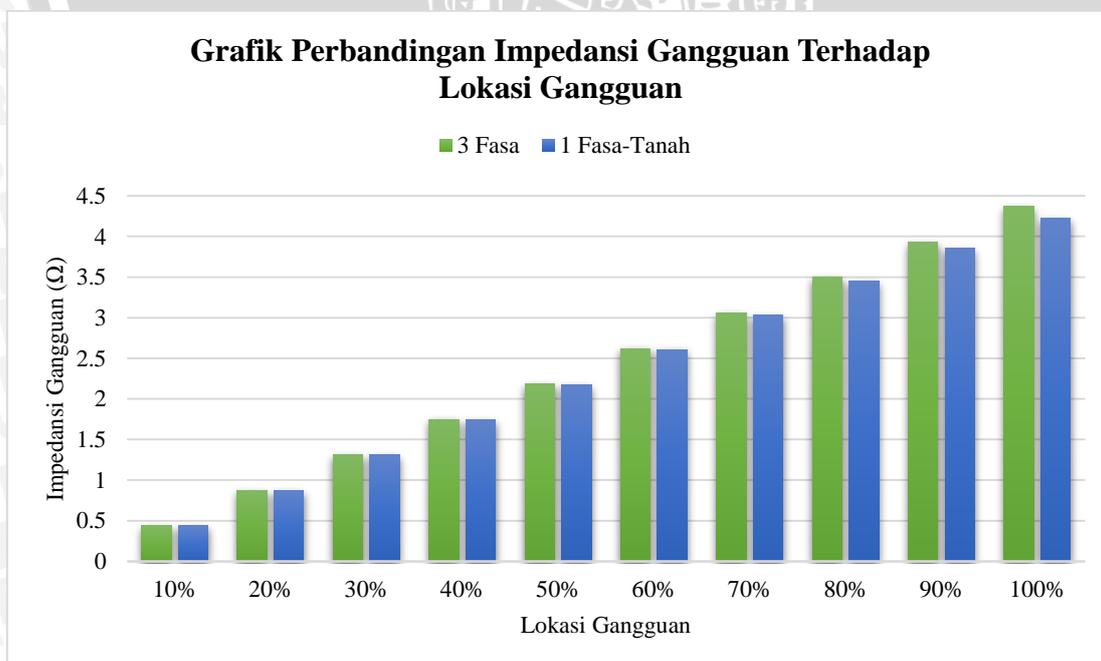
$$= 2,6805 + j7,7012 \Omega$$

Nilai impedansi diatas merupakan nilai impedansi gangguan sebenarnya atau impedansi gangguan pada sisi primer, sedangkan nilai impedansi gangguan yang terbaca oleh rele diperoleh menggunakan persamaan (2-35) berikut :

$$Z_{fs} = 0,2667 \times (2,6805 + j7,7012) \Omega$$

$$= 0,7148 + j2,0536 \Omega = 2,1745 \angle 70,80^\circ \Omega$$

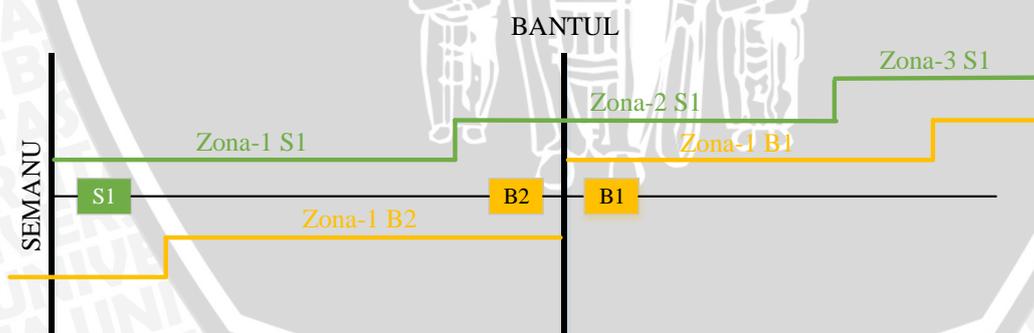
Sehingga nilai impedansi gangguan yang terdeteksi oleh rele jarak adalah 2,1745 Ω , nilai ini jauh lebih kecil dibandingkan nilai setelan impedansi rele jarak. Untuk nilai arus gangguan hubung singkat serta nilai impedansi gangguan yang terbaca oleh rele pada berbagai titik gangguan dapat dilihat pada Lampiran I.6. Berikut merupakan grafik perbandingan nilai impedansi gangguan tiga fasa dan gangguan satu fasa ke tanah yang terdeteksi oleh rele yang ditunjukkan oleh Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Impedansi Gangguan Terhadap Lokasi Gangguan Sebelum GI Piyungan Dibangun

Dapat dilihat juga pada tabel di Lampiran I.6 ketika lokasi gangguan berada dibawah 80% saluran transmisi, nilai impedansi gangguan yang terlihat oleh rele masih lebih kecil dibandingkan nilai setelan impedansi rele tersebut. Saat terjadi gangguan pada 80% saluran transmisi nilai impedansi gangguan hubung singkat tiga fasa dan satu fasa ke tanah adalah sebesar $3,4946 \Omega$ dan $3,4509 \Omega$. Nilai impedansi ini lebih kecil dibandingkan nilai impedansi setelan rele untuk Zona 1, yaitu sebesar $3,4946 \Omega$ yang mana mencakup 80% saluran transmisi. Hal ini menandakan rele jarak dapat bekerja dengan selektif.

Pada saat terjadi gangguan pada 90% dan 100% saluran transmisi nilai impedansi gangguan hubung singkat tiga fasa dan satu fasa ke tanah lebih besar dibandingkan nilai setelan impedansi untuk Zona 1, namun masih lebih kecil dibandingkan impedansi setelan Zona, sehingga rele jarak mendeteksi gangguan pada Zona 2 dengan waktu tunda yaitu sebesar 0,4 detik. Hal ini dikarenakan gangguan berada di luar jangkauan Zona 1 (80% saluran). Pada kondisi ini gangguan juga terdeteksi oleh rele jarak pada Gardu Induk Bantul arah Gardu Induk Semanu. Rele jarak pada Gardu Induk Bantul ini akan mendeteksi gangguan pada Zona 1. Hal ini biasa disebut dengan *overlap*, yaitu dimana rele diujung saluran mendeteksi gangguan pada Zona 2 sedangkan rele di ujung saluran lainnya mendeteksi gangguan pada Zona 1. Ketika hal ini terjadi, rele yang mendeteksi gangguan pada Zona 1 akan bekerja terlebih dahulu, dikarenakan pada Zona 1 waktu kerjanya instan atau seketika. Untuk koordinasi antar rele dapat dilihat pada Gambar 4.7 sebagai berikut.



Gambar 4.7 Koordinasi Rele Jarak Gardu Induk Semanu – Gardu Induk Bantul

Dapat dilihat pada gambar diatas ketika gangguan terjadi pada daerah Zona-1 rele *forward* Gardu Induk Semanu (S1), rele *reverse* Gardu Induk Bantul (B2) juga mendeteksi gangguan pada Zona-1, sehingga rele akan bekerja dalam waktu seketika. Rele yang bekerja terlebih dahulu merupakan rele yang memiliki jarak terdekat dari

gangguan tersebut. Ketika terjadi gangguan pada Zona-2 rele S1 dan terdeteksi sebagai gangguan pada Zona-1 rele B2, maka rele B2 akan bekerja terlebih dahulu. Sama halnya ketika terjadi gangguan pada saluran berikutnya, ketika gangguan terdeteksi pada Zona-2 rele S1 sedangkan rele B1 mendeteksi gangguan pada Zona-1, maka yang bekerja adalah rele B1 dengan waktu kerja instan, kemudian rele S1 bekerja dengan waktu tunda (t_2). Untuk perhitungan setelan rele jarak B2 dapat dilihat pada tabel Lampiran I.11.

4.4 Perhitungan Penyetelan Rele Jarak Setelah Gardu Induk Piyungan Dibangun

4.4.1 Perhitungan Impedansi Transformator Daya

Data sekunder kedua transformator daya pada Gardu Induk Piyungan dapat terlihat pada Tabel 4.3

Tabel 4.3. Rencana Data Transformator Daya Gardu Induk Piyungan

	Trafo I	Trafo II
Daya	60 MVA	60 MVA
Impedansi	12,5%	12,5%
Tegangan	150/20kV	150/20kV

Sumber: PT. PLN (Persero) APD DI Yogyakarta, 2015

Sehingga impedansi transformator daya dapat diperoleh menggunakan Persamaan (2-13) sebagai berikut :

Transformator I & II;

$$\begin{aligned} Z_{1T}(\Omega) = Z_{2T}(\Omega) &= \frac{(150)^2}{60} \times j0,125 \\ &= j46,875 \Omega \end{aligned}$$

Karena kedua transformator daya pada Gardu Induk Piyungan masih dalam perencanaan dan belum terpasang sehingga hubungan belitannya belum dapat diketahui, maka impedansi urutan nol transformator daya tidak dihitung. Untuk perhitungan berikutnya akan dibutuhkan impedansi transformator atau reaktansi transformator (X_T), karena kedua impedansi urutan positif di atas sama, maka impedansi transformator adalah ($Z_T = j46,875 \Omega$).

4.4.2 Perhitungan Impedansi Saluran Transmisi

Untuk mengetahui impedansi saluran transmisi, perlu diketahui jenis penghantar yang digunakan. Karena Gardu Induk Piyungan masih dalam proses perencanaan, jenis penghantar yang akan digunakan juga masih dalam perencanaan yaitu sama dengan penghantar Semanu – Bantul penghantar tipe ACSR dengan luas penampang 240 mm² dan panjang saluran transmisi adalah 19,04 km.

Tabel 4.4. Tabel Jenis dan Jarak Penghantar Saluran Transmisi

Dari	Ke	Tegangan (kV)	Jarak (km)	Jenis Kawat	Luas Penampang (mm ²)
SEMANU	PIYUNGAN	150	19,04	ACSR	240/40
SEMANU	PIYUNGAN	150	19,04	ACSR	240/40
PIYUNGAN	BANTUL	150	20	ACSR	240/40
PIYUNGAN	BANTUL	150	20	ACSR	240/40
BANTUL	KLATEN	150	34,77	ACSR	240/40
BANTUL	KLATEN	150	34,77	ACSR	240/40

Sumber: PT. PLN (Persero) APD DI Yogyakarta, 2015

Sehingga dapat dihitung impedansi saluran transmisi urutan positif dan negatif menggunakan Persamaan (2-18) sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Z_{1\text{ SNU-PYG}} &= Z_{2\text{ SNU-PYG}} = (0,137 + j0,3966 (\Omega/\text{km})) \times 19,04 (\text{km}) \\ &= 2,6084 + j7,5512 \Omega = 7,9891 \angle 70,94^\circ \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{1\text{ PYG-BNL}} &= Z_{2\text{ PYG-BNL}} = (0,137 + j0,3966 (\Omega/\text{km})) \times 20 (\text{km}) \\ &= 1,6782 + j4,8583 \Omega = 5,1400 \angle 70,94^\circ \Omega \end{aligned}$$

Sedangkan untuk perhitungan impedansi saluran transmisi urutan nol dapat diperoleh dengan Persamaan (2-19) sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Z_{0\text{ SNU-PYG}} &= (0,287 + j1,19 (\Omega/\text{km})) \times 19,04 (\text{km}) \\ &= 5,4644 + j22,6576 \Omega = 23,3072 \angle 76,44^\circ \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{0\text{ PYG-BNL}} &= (0,287 + j1,19 (\Omega/\text{km})) \times 20 (\text{km}) \\ &= 5,74 + j23,8 \Omega = 24,4823 \angle 76,44^\circ \Omega \end{aligned}$$

4.4.3 Perhitungan Penyetelan Rele Jarak

Setelah mendapatkan perhitungan impedansi transformator dan impedansi saluran transmisi, maka tahap selanjutnya adalah menghitung nilai setelan rele jarak.

4.4.2.1 Penyetelan Zona 1

Untuk menghitung nilai impedansi Zona 1, perlu diketahui nilai impedansi saluran yang diamankan. Sesuai perhitungan sebelumnya, telah didapatkan nilai impedansi saluran yang diamankan. Sehingga dapat dihitung impedansi Zona 1 pada sisi primer menggunakan Persamaan (2-17) sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Z_1 &= 0,8 \times (2,6084 + j7,5512) \Omega \\ &= 2,0867 + j6,041 \Omega = 6,3912 \angle 70,94^\circ \Omega \end{aligned}$$

Setelah mendapatkan nilai impedansi Zona 1 pada sisi primer, kemudian perlu dihitung impedansi Zona 1 pada sisi sekunder (setelan rele jarak) sesuai dengan persamaan (2.25) sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Z_{1s} &= 0,2667 \times (2,0867 + j6,041) \Omega \\ &= 0,5564 + j1,6109 \Omega = 1,7043 \angle 70,94^\circ \Omega \end{aligned}$$

Jadi nilai setelan impedansi rele jarak untuk Zona 1 adalah $1,7043 \Omega$. Sedangkan untuk setelan waktu rele pada Zona 1 diatur seketika (*instantaneous*), atau diatur sama dengan nol detik ($t_1 = 0 \text{ s}$).

4.4.2.2 Penyetelan Zona 2

Untuk menghitung nilai impedansi Zona 2, perlu diketahui nilai impedansi saluran yang diamankan dan saluran sesi berikutnya yang terpendek (Gardu Induk Piyungan Arah Bantul). Karena pada rencana seperti Lampiran II.5 Gardu Induk Piyungan hanya terhubung dengan saluran transmisi Gardu Induk Semanu dan Gardu Induk Bantul. Sehingga saluran sesi berikutnya yang terpendek dan yang terpanjang adalah sama yaitu (Piyungan - Bantul)

Sesuai perhitungan sebelumnya, telah didapatkan nilai impedansi saluran yang diamankan, serta perhitungan impedansi saluran berikutnya. Karena pada sesi berikutnya terdapat transformator, maka perlu dihitung nilai impedansi transformator sesuai Persamaan (2-20). Sehingga dapat dihitung impedansi Zona 2 pada sisi primer menggunakan Persamaan (2-18) dan (2-19) sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Z_{2min} &= 1,2 \times (2,6084 + j7,5512) \Omega \\ &= 3,1301 + j9,0615 \Omega = 9,5869 \angle 70,94^\circ \Omega \\ Z_{2maks} &= 0,8 \times [(2,6084 + j7,5512) + \{0,8 \times (2,74 + j7,932)\}] \Omega \\ &= 3,8403 + j11,1174 \Omega = 11,762 \angle 70,94^\circ \Omega \\ Z_{2T} &= 0,8 \times \{(2,6084 + j7,5512) + (0,5 \times j46,875)\} \Omega \end{aligned}$$

$$= 2,0867 + j24,7909 \Omega = 24,8786 \angle 85,18^\circ \Omega$$

Hasil perhitungan di atas menunjukkan nilai Z_{2min} lebih kecil dari nilai Z_{2maks} . Oleh karena itu untuk impedansi Zona 2 dipilih nilai Z_{2maks} , selain itu kedua nilai impedansi tidak melebihi nilai Z_{2T} . Setelah menentukan impedansi Zona 2 pada sisi primer, maka langkah selanjutnya adalah perhitungan impedansi Zona 2 pada sisi sekunder menggunakan Persamaan (2-25) berikut :

$$\begin{aligned} Z_{2S} &= 0,2667 \times (3,8403 + j11,1174) \Omega \\ &= 1,0242 + j2,9650 \Omega = 3,1369 \angle 70,94^\circ \Omega \end{aligned}$$

Jadi nilai setelan impedansi rele jarak untuk Zona 2 adalah 3,1369 Ω . Sedangkan untuk setelan waktu rele pada Zona 2 diatur menjadi berikut, dengan waktu tunda menjadi ($\Delta t = 0,4$ s).

$$t_2 = t_1 + \Delta t = 0 + 0,4 \text{ s} = 0,4 \text{ s}$$

4.4.2.3 Penyetelan Zona 3

Untuk menghitung nilai impedansi Zona 3, perlu diketahui nilai impedansi saluran yang diamankan, saluran sesi berikutnya yang terpanjang (Gardu Induk Piyungan Arah Bantul) serta saluran sesi berikutnya (Gardu Induk Bantul Arah Klaten). Sesuai perhitungan sebelumnya, telah didapatkan nilai impedansi saluran yang diamankan, serta perhitungan impedansi saluran. Karena pada sesi berikutnya terdapat transformator, maka perlu juga dihitung nilai impedansi transformator sesuai Persamaan (2-23). Sehingga dapat dihitung impedansi Zona 3 pada sisi primer menggunakan Persamaan (2-21) dan (2-22) sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Z_{3min} &= 1,2 \times [(2,6084 + j7,5512) + \{0,8 \times (2,74 + j7,932)\}] \Omega \\ &= 5,7604 + j16,6761 \Omega = 17,643 \angle 70,94^\circ \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{3maks} &= 0,8 \times \{(2,6084 + j7,5512) \\ &\quad + 0,8 \times [(2,74 + j7,932) + \{0,8 \times (4,7635 + j13,7897)\}]\} \Omega \\ &= 6,2792 + j18,1777 \Omega = 19,2317 \angle 70,94^\circ \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{3T} &= 0,8 \times \{(2,6084 + j7,5512) + (0,8 \times j46,875)\} \Omega \\ &= 2,0867 + j36,0409 \Omega = 36,1013 \angle 86,68^\circ \Omega \end{aligned}$$

Hasil perhitungan di atas menunjukkan nilai Z_{3min} lebih kecil dari nilai Z_{3maks} . Oleh karena itu untuk impedansi Zona 3 dipilih nilai Z_{3maks} , selain itu kedua nilai impedansi tidak melebihi nilai Z_{3T} . Setelah menentukan impedansi Zona 3 pada sisi

primer, maka langkah selanjutnya adalah perhitungan impedansi Zona 3 pada sisi sekunder menggunakan persamaan (2.25) berikut :

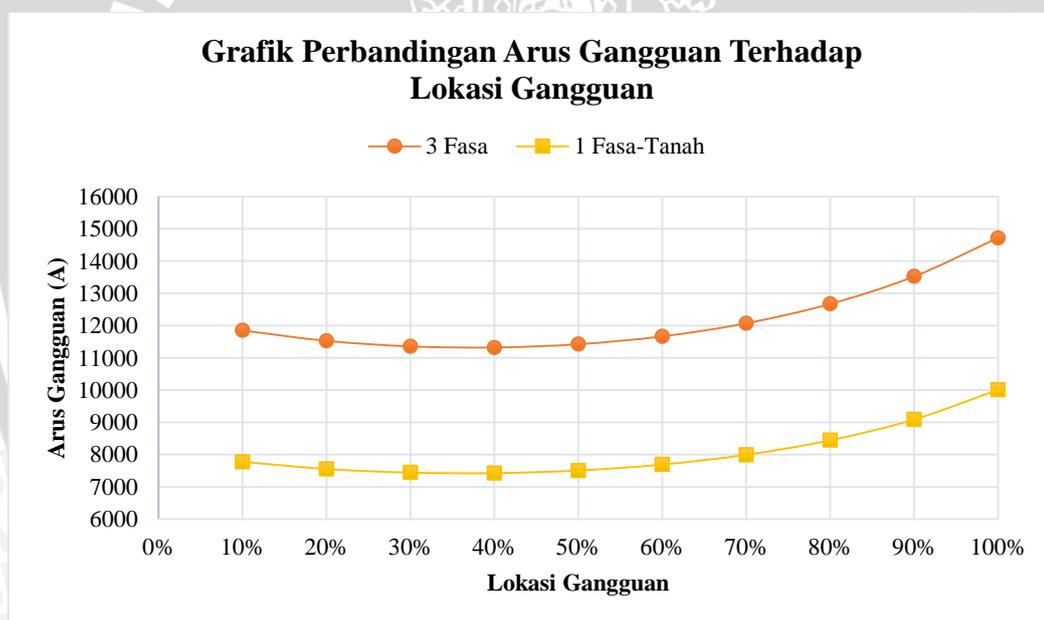
$$\begin{aligned} Z_{3s} &= 0,2667 \times (6,2792 + j18,1777) \Omega \\ &= 1,6744 + j4,8473 \Omega = 5,1284 \angle 70,94^\circ \Omega \end{aligned}$$

Jadi nilai setelan impedansi rele jarak untuk Zona 3 adalah 5,1284 Ω . Sedangkan untuk setelan waktu rele pada Zona 3 diatur menjadi berikut, dengan waktu tunda menjadi ($\Delta t = 0,4$ s).

$$t_3 = t_2 + \Delta t = 0,4 \text{ s} + 0,4 \text{ s} = 0,8 \text{ s}$$

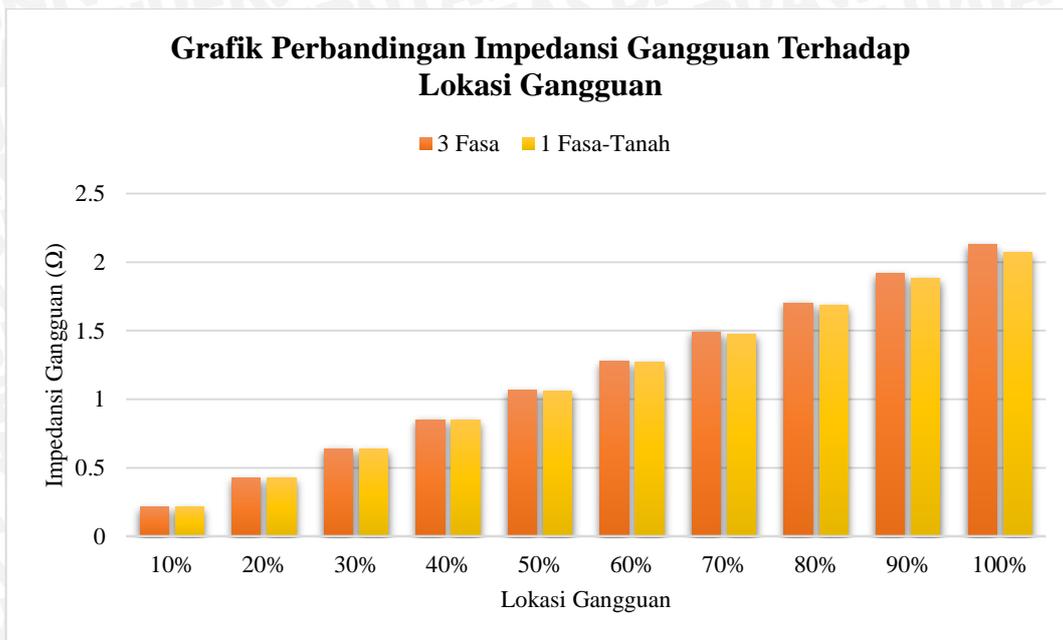
4.4.4 Perhitungan Gangguan Hubung Singkat

Hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat setelah dibangunnya Gardu Induk Piyungan dapat dilihat pada Lampiran I.9, dilakukan seperti halnya pada kondisi sebelum gardu induk dibangun. Hasil perhitungan impedansi gangguan hubung singkat setelah dibangunnya Gardu Induk Piyungan ditunjukkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Arus Gangguan Terhadap Lokasi Gangguan Setelah GI Piyungan Dibangun

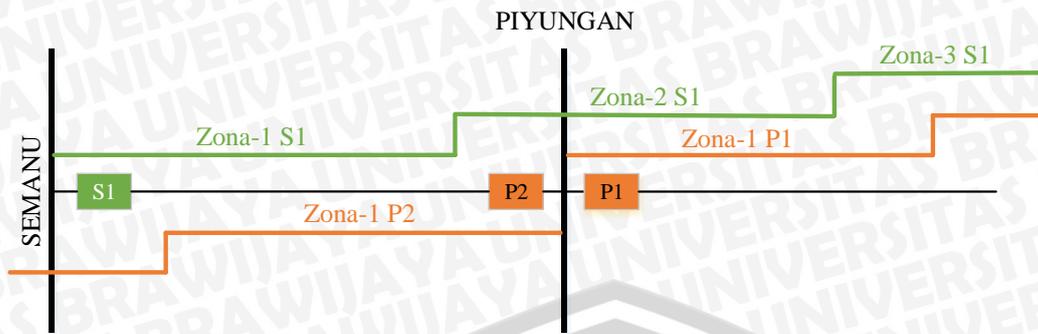
Dapat dilihat dari tabel pada Lampiran I.9 dapat dianalisis bahwa arus gangguan hubung singkat terbesar adalah arus gangguan hubung singkat tiga fasa pada saat lokasi gangguan 10% saluran transmisi, yaitu sebesar 11,8528 kA dan untuk arus gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah sebesar 7,7784 kA. Besarnya nilai arus gangguan hubung singkat berbanding lurus dengan jarak atau lokasi gangguan terjadi, semakin jauh jarak lokasi gangguan maka arus gangguan hubung singkat semakin besar.



Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Impedansi Gangguan Terhadap Lokasi Gangguan Setelah GI Piyungan Dibangun

Dari hasil perhitungan yang ditunjukkan pada Lampiran I.10 dapat dilihat bahwa besarnya nilai impedansi gangguan yang terbaca oleh rele sangat dipengaruhi oleh jarak lokasi gangguan dengan rele jarak. Semakin jauh jarak lokasi gangguan, maka semakin besar nilai impedansi gangguan yang akan terbaca. Hal ini berbanding terbalik dengan nilai arus gangguan hubung singkat yang terdeteksi oleh rele, semakin jauh lokasi gangguan maka semakin kecil nilai arus gangguan yang terdeteksi. Karena arus dan impedansi berbanding terbalik, oleh karena itu dengan semakin kecil nilai arus hubung singkat yang terbaca, maka akan semakin besar nilai impedansi gangguan yang akan terlihat oleh rele.

Dilihat dari tabel pada Lampiran I.10 bahwa ketika terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa atau satu fasa ke tanah pada titik dibawah 80% saluran transmisi, nilai impedansi gangguan yang terdeteksi oleh rele lebih kecil dari nilai impedansi setelan Zona 1. Sedangkan saat gangguan terjadi pada 90% dan 100% saluran transmisi, rele akan mendeteksi gangguan terjadi pada Zona 2. Hal ini menunjukkan bahwa rele tetap dapat bekerja secara selektif walaupun Gardu Induk Piyungan telah dibangun. Untuk koordinasi antar rele dapat dilihat pada Gambar 4.10 sebagai berikut.



Gambar 4.10 Koordinasi Rele Jarak Gardu Induk Semanu – Gardu Induk Piyungan

Dapat dilihat pada gambar diatas ketika gangguan terjadi pada daerah Zona-1 rele Gardu Induk Semanu (S1), rele Gardu Induk Piyungan (P2) akan mendeteksi gangguan pada Zona-1, sehingga rele akan bekerja dalam waktu seketika. Ketika gangguan pada Zona-2 rele S1 dan terdeteksi sebagai gangguan pada Zona-1 rele P2, maka rele P2 akan bekerja terlebih dahulu. Untuk perhitungan setelan rele jarak P2 dapat dilihat pada tabel Lampiran I.11.

4.5 Evaluasi Koordinasi Rele Jarak Sebelum dan Setelah Dibangunnya Gardu Induk Piyungan

Tabel 4.5. Perbandingan Penyetelan Rele Jarak Sebelum dan Setelah Gardu Induk Piyungan Dibangun

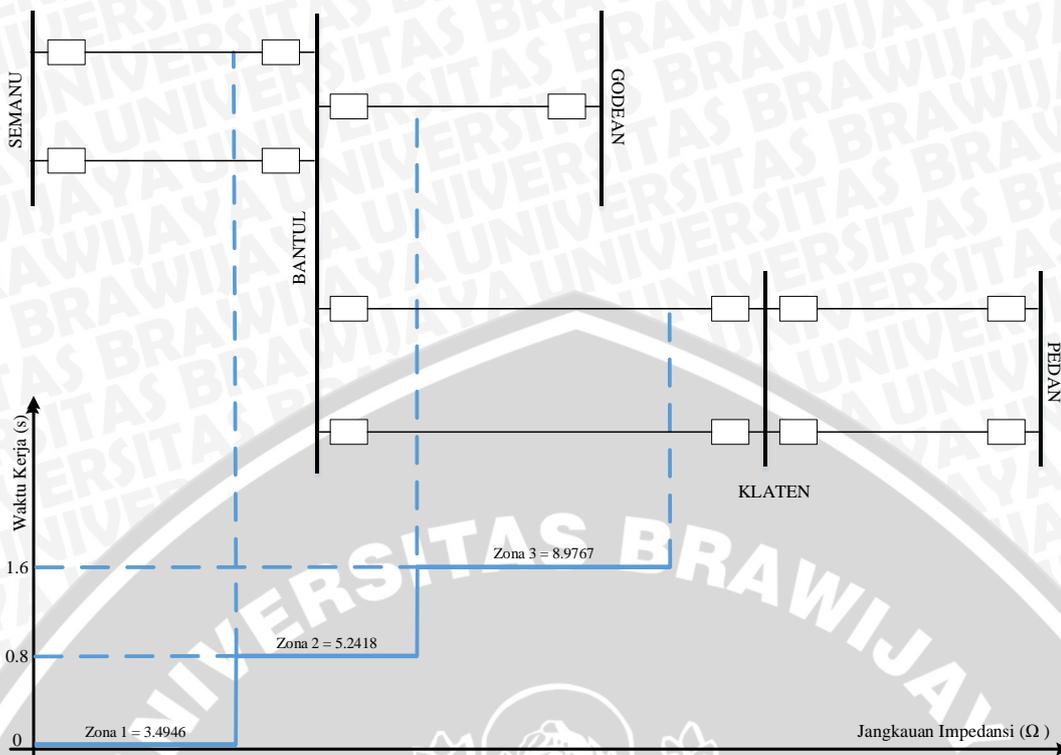
Zona Pengaman	Sebelum Dibangun GI Piyungan	Setelah Dibangun GI Piyungan
Zona 1	$Z1p = 13,1047 \Omega$	$Z1p = 6,3912 \Omega$
	$Z1s = 3,4946 \Omega$	$Z1s = 1,7043 \Omega$
	$t = 0 \text{ s (instan)}$	$t = 0 \text{ s (instan)}$
Zona 2	$Z2min = 19,6571 \Omega$	$Z2min = 9,5869 \Omega$
	$Z2maks = 16,3944 \Omega$	$Z2maks = 11,762 \Omega$
	$Z2p = 19,6571 \Omega$	$Z2p = 11,762 \Omega$
	$Z2s = 5,2419 \Omega$	$Z2s = 3,1369 \Omega$
	$t = 0,8 \text{ s}$	$t = 0,4 \text{ s}$
Zona 3	$Z3min = 33,6628 \Omega$	$Z3min = 17,643 \Omega$
	$Z3maks = 27,9136 \Omega$	$Z3maks = 19,2317 \Omega$
	$Z3p = 33,6628 \Omega$	$Z3p = 19,2317 \Omega$
	$Z2s = 8,9767 \Omega$	$Z2s = 5,1284 \Omega$
	$t = 1,6 \text{ s}$	$t = 0,8 \text{ s}$

Berdasarkan dari Tabel 4.4. di atas terlihat perbedaan cara penyetelan rele jarak. Sebelum Gardu Induk Piyungan dibangun, nilai impedansi setelan rele Zona 1 adalah

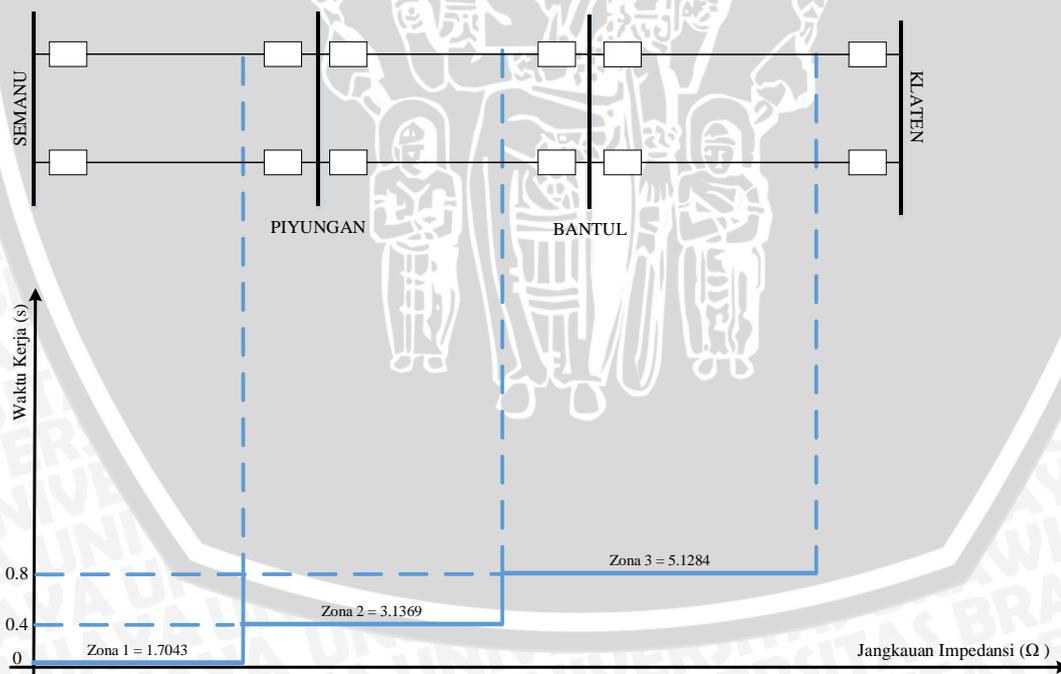
3,4946 Ω , sedangkan setelah Gardu Induk Piyungan dibangun, nilai impedansi setelan rele Zona 1 menjadi 1,7403 Ω . Hal ini dikarenakan jarak saluran transmisi yang diamankan berubah menjadi lebih pendek, awalnya jarak saluran transmisi adalah sepanjang 39,04 km. Namun setelah dibangunnya Gardu Induk Piyungan yang memotong *double-phi* saluran transmisi (Semenu – Bantul), sehingga saluran transmisi yang diamankan menjadi 19,04 km. Perubahan panjang saluran ini, menyebabkan nilai setelan impedansi menjadi lebih kecil daripada sebelumnya, hal ini dikarenakan panjang saluran transmisi berbanding lurus dengan setelan impedansinya. Dapat disimpulkan bahwa semakin panjang saluran transmisi yang diamankan, maka semakin besar pula nilai impedansi setelan untuk Zona 1, begitu pula sebaliknya.

Untuk penyetelan sebelum dibangunnya Gardu Induk Piyungan, nilai Z_{2maks} lebih kecil dibandingkan dengan Z_{2min} hal ini dikarenakan saluran berikutnya (Bantul - Godean) lebih pendek dibandingkan saluran yang diamankan (Semenu - Bantul). Karena kondisi ini terjadi, maka setelan waktu kerja rele pada Zona 2 harus ditingkatkan menjadi 0,8 s. Berbeda dengan setelan setelah Gardu Induk Piyungan dibangun, selisih panjang saluran berikutnya lebih pendek dengan saluran yang diamankan tidak terlalu besar. Sehingga nilai Z_{2maks} lebih besar dibandingkan dengan nilai Z_{2min} dan setelan waktu kerja rele berubah dan diatur menjadi 0,4 s. Dilihat dari nilai impedansi setelan Zona 2 setelah dibangun Gardu Induk Piyungan lebih kecil dibandingkan dengan kondisi sebelum dibangun Gardu Induk Piyungan. Hal ini dikarenakan panjang saluran transmisi yang berubah.

Pada penyetelan impedansi Zona 3 sebelum Gardu Induk Piyungan dibangun, kondisi dimana nilai Z_{3min} lebih besar dibandingkan nilai Z_{3maks} , sehingga waktu kerja rele pada Zona 3 menjadi 1,6 s. Sedangkan setelah Gardu Induk Piyungan dibangun, setelan impedansi untuk Zona 3 berbeda dengan sebelumnya. Dimana nilai Z_{3min} lebih kecil dibandingkan nilai Z_{3maks} sehingga waktu kerja rele pada Zona 3 menjadi 0,8 s. Untuk perbandingan diagram waktu kerja rele jarak pada saat sebelum dan setelah Gardu Induk Piyungan dibangun dapat dilihat pada Gambar 4.11 dan Gambar 4.12. Dari gambar berikut dapat terlihat bahwa terjadi peningkatan waktu kerja pada setiap zona proteksi sesuai dengan waktu tunda yang telah ditentukan.



Gambar 4.11 Grafik Diagram Waktu Kerja Rele Sebelum Dibangunnya Gardu Induk Piyungan



Gambar 4.12 Grafik Diagram Waktu Kerja Rele Setelah Dibangunnya Gardu Induk Piyungan

Untuk koordinasi ketika terjadi gangguan hubung singkat dapat dilihat pada Tabel 4.2. dan 4.3. ketika terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa maupun fasa ke tanah, rele

dapat bekerja dengan selektif. Dimana untuk gangguan 25%, 50% dan 75% gangguan terdeteksi pada Zona-1 rele, yang mana daerah ini merupakan daerah pengamanan dari Zona-1 (80% saluran yang diamankan) sehingga rele bekerja dengan waktu seketika. Sedangkan pada saat gangguan pada 100% nilai impedansi gangguan yang terbaca oleh rele lebih besar dari nilai setelan Zona-1 sehingga, Zona-1 tidak bekerja karena gangguan berada di luar daerah pengamanannya. Namun nilai gangguan ini lebih kecil dibandingkan nilai setelan impedansi untuk Zona-2, sehingga yang bekerja adalah Zona-2 dengan waktu tunda sebesar t_2 . Setelah dibangunnya Gardu Induk Piyungan, nilai impedansi gangguan pada 100% saluran yang terdeteksi oleh rele masih lebih kecil dibandingkan dengan setelan impedansi Zona-1, namun karena letak gangguan dari rele jarak melebihi daerah pengamanan Zona-1 maka zona ini tidak akan mendeteksi gangguan, melainkan Zona-2 yang akan mendeteksi gangguan ini.

Penambahan Gardu Induk baru ini menyebabkan perlunya perubahan penyetelan rele jarak pada gardu induk di sekitarnya. Perubahan penyetelan rele jarak ini berdampak positif terhadap sistem proteksi, yaitu sistem proteksi menjadi lebih selektif dan lebih cepat dibandingkan sebelumnya. Jika tidak dilakukan perubahan penyetelan rele jarak, maka dapat terjadi *overlap* antara zona pengamanan rele satu dan lainnya. Dengan adanya perubahan sistem ini sudah pasti mempengaruhi gangguan hubung singkat, gangguan hubung singkat ini tidak boleh melebihi dari nilai setelan impedansi rele jarak. Setelah dianalisis, nilai gangguan hubung singkat tidak melebihi nilai setelan rele jarak, yang menandakan perubahan setelan rele jarak sudah selektif dan peka terhadap gangguan.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil evaluasi koordinasi rele jarak pada Gardu Induk Semanu setelah dibangunnya Gardu Induk Piyungan maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1.a. Koordinasi rele jarak setelah Gardu Induk Piyungan dibangun ketika terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa dan satu fasa ke tanah pada 80% saluran adalah 1,7403 Ω dan 1,6819 Ω , nilai ini lebih kecil dibandingkan nilai setelan impedansi Zona 1 yaitu 1,7403 Ω . Sedangkan gangguan hubung singkat pada 90% dan 100% saluran, nilai impedansi yang terdeteksi oleh rele lebih besar dari setelan impedansi Zona 1, namun lebih kecil dari setelan impedansi pada Zona 2, sehingga rele akan bekerja dengan mendeteksi gangguan pada Zona 2 dengan waktu tunda (Δt) yang telah ditentukan .

1.b. Penyetelan rele jarak setelah Gardu Induk Piyungan dibangun diperoleh dari hasil perhitungan berbeda sebelum dibangunnya Gardu Induk Piyungan yaitu, untuk penyetelan impedansi Zona 1 adalah 1,7043 Ω dengan setelan waktu adalah seketika. Untuk setelan impedansi Zona 2 adalah 2,5564 Ω dengan setelan waktu kerja yang berbeda dengan sebelumnya yaitu 0,4 detik. Setelan impedansi Zona 3 adalah 5,1284 Ω dengan setelan waktu yang berbeda yaitu 0,8 detik. Setelan impedansi rele jarak menjadi lebih kecil karena panjang saluran yang diamankan menjadi lebih pendek dari sebelumnya.

5.2 Saran

1. Karena Gardu Induk Piyungan ini masih dalam perencanaan, sehingga perhitungan gangguan hubung singkat dilakukan tanpa memperhitungkan aliran daya serta beban yang akan dipikul Gardu Induk Piyungan, maka perlu dilakukan perhitungan ulang ketika Gardu Induk Piyungan telah beroperasi secara normal.
2. Penelitian ini masih menggunakan alat perhitungan manual yaitu kalkulator serta software Microsoft Excel 2013, sebaiknya penelitian selanjutnya dilakukan dengan menggunakan software perhitungan lain.

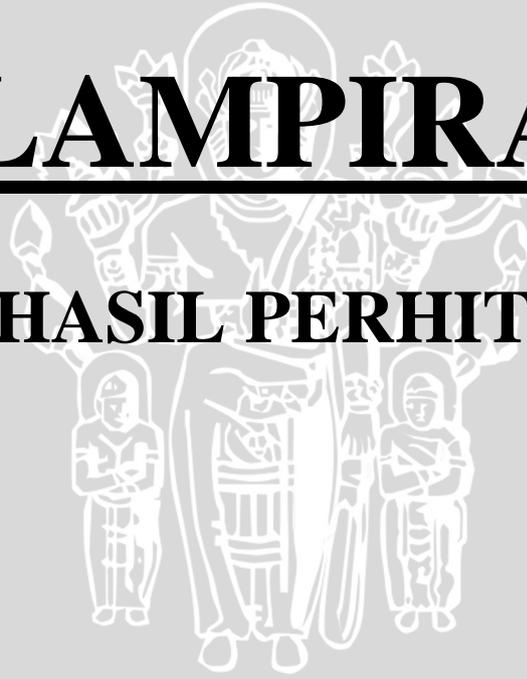
DAFTAR PUSTAKA

- Alstom. 2011. *Network Protection & Automation Guide Alstom*. England: Stafford.
- Anderson, Paul M. 1999. *Power System Protection*. New York: A Jhon Wiley & Sons, Inc. Publication
- British BS 142-1966 Standart.
- Gonen, Turan. 1988. *Modern Power System Analysis*. California: John Wiley & Sons Inc.
- Hewitson, L.G., dkk. 2004. *Practical Power System Protection*. USA: Elsevier Ltd.
- Hutauruk, Tumpak S. 1991. *Pentanahan Titik Netral Sistem Tenaga dan Pentanahan Peralatan*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Jamah, Akhmad. 2014. *Evaluasi Setting Rele Jarak Gardu Induk Ungaran Jaringan 150kV Arah Krapyak-2*. Politeknik Negeri Semarang.
- NFPA 70E., “*Electrical Safety Requirements for Employee Workplace 2003 Edition*”, 2003.
- Pandjaitan, Bonar. 2012. *Proteksi Sistem Tenaga Listrik*. Yogyakarta: Andi Offset.
- Parhusip, Ira Debora. 2012. *Rele Jarak Sebagai Pengaman Uama Pada Pola Proteksi SUTT PT. PLN (Persero) Udiklat Semarang*. Universitas Diponegoro.
- PT. PLN (Persero) P3B Jawa-Bali. 2009. *Diktat Pelatihan & Perhitungan Koordinasi Setelan Relai Proteksi*.
- PT. PLN (Persero). 2006. *Pelatihan O&M Relai Proteksi Jaringan*. Jakarta : PT. PLN (Persero)
- Ravindranath, B. and M. Chander. 1987. *Power System Protection and Switchgear 1st edition*. Singapore: Jhon Wiley and Sons Inc.
- Saksomo, Setiyo. Tanpa Tahun. *Diktat Proteksi Sistem Tenaga Listrik*. Malang: Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- Samaulah, Hazairin. 2004. *Dasar-dasar Sistem Proteksi Tenaga Listrik*. Universitas Sriwijaya.
- Stevenson, Jr., William D. 1994. *Analisis Sistem Tenaga Listrik*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Sunil, S. Rao. 1980. *Switch Gear and Protection*. India: Khanna Publishers.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

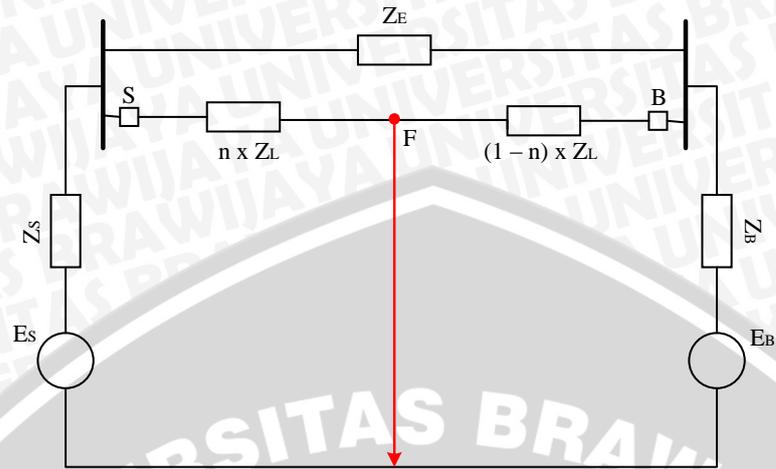
LAMPIRAN I

HASIL PERHITUNGAN

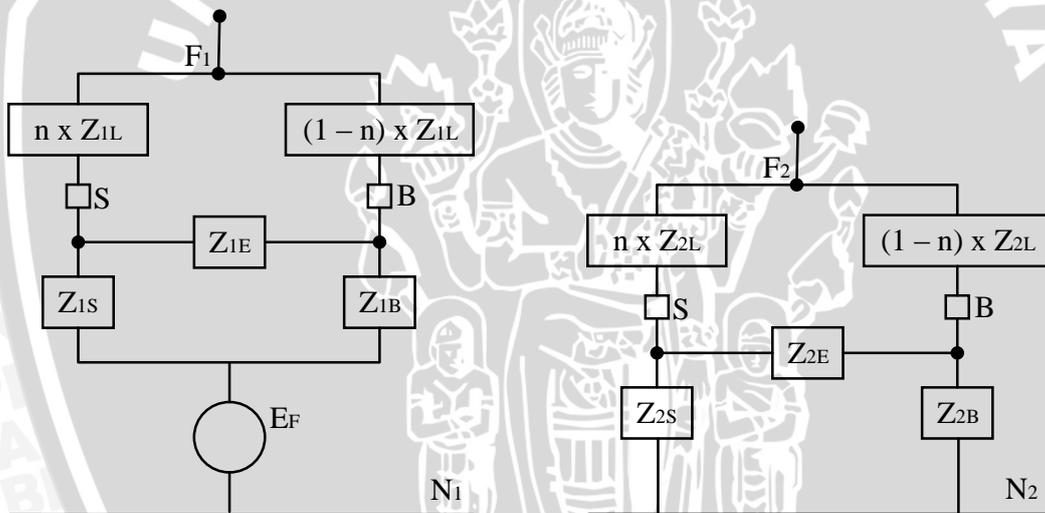


Lampiran I.1

Penyederhanaan Rangkaian Ekuivalen Urutan

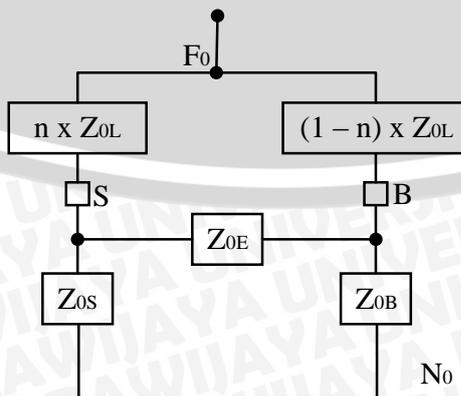


Gambar I.1 Representasi Gangguan Pada Titik F

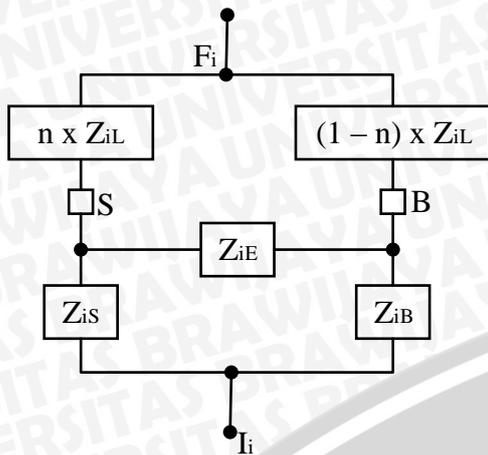


Gambar I.2 Jaringan Urutan Positif

Gambar I.3 Jaringan Urutan Negatif



Gambar I.4 Jaringan Urutan Nol



i : urutan jaringan (1,2,0)

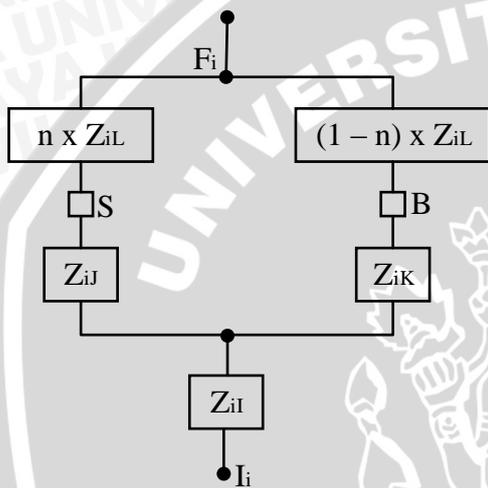
$n \times Z_{iL}$: impedansi dari rele hingga titik gangguan

$(1 - n) \times Z_{iL}$: impedansi dari titik gangguan hingga rele di depannya

Z_{iE} : impedansi saluran

Z_{iS} : impedansi sumber bus S

Z_{iB} : impedansi sumber bus B



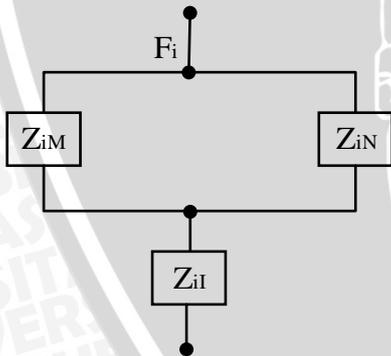
Reduksi jaringan $\Delta - Y$

$$Z_{iI} = \frac{Z_{iS} \times Z_{iB}}{Z_{iS} + Z_{iE} + Z_{iB}}$$

$$Z_{iJ} = \frac{Z_{iS} \times Z_{iE}}{Z_{iS} + Z_{iE} + Z_{iB}}$$

$$Z_{iK} = \frac{Z_{iB} \times Z_{iE}}{Z_{iS} + Z_{iE} + Z_{iB}}$$

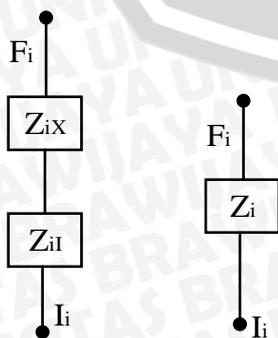
$$\begin{bmatrix} Z_{iI} \\ Z_{iJ} \\ Z_{iK} \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_{iS} + Z_{iE} + Z_{iB}} \begin{bmatrix} Z_{iS} \times Z_{iB} \\ Z_{iS} \times Z_{iE} \\ Z_{iB} \times Z_{iE} \end{bmatrix}$$



$$Z_{iM} = Z_{iJ} + (n \times Z_{iL})$$

$$Z_{iN} = Z_{iK} + ((1 - n) \times Z_{iL})$$

$$C_i = \frac{Z_{iN}}{Z_{iM} + Z_{iN}}$$



$$Z_{iX} = \frac{Z_{iM} \times Z_{iN}}{Z_{iM} + Z_{iN}}$$

$$Z_i = Z_{iX} + Z_{iI}$$

Lampiran I.2

Tabel Hasil Perhitungan Impedansi Saluran Transmisi Urutan Positif, Negatif dan Nol Sebelum Gardu Induk Piyungan Dibangun

Lokasi Gangguan (% Panjang Saluran)	Impedansi Saluran (pu)		
	nZ_{1L}	nZ_{2L}	nZ_{0L}
10%	0,00237 + j0,00688	0,00237 + j0,00688	0,00497 + j0,02064
20%	0,00475 + j0,013762	0,00475 + j0,013762	0,00995 + j0,04129
30%	0,00713 + j0,02064	0,00713 + j0,02064	0,01493 + j0,06194
40%	0,00950 + j0,02752	0,00950 + j0,02752	0,01991 + j0,08259
50%	0,01188 + j0,03440	0,01188 + j0,03440	0,02489 + j0,10323
60%	0,01426 + j0,04128	0,01426 + j0,04128	0,02987 + 0,12388
70%	0,01663 + j0,04817	0,01663 + j0,04817	0,03485 + j0,14453
80%	0,01901 + j0,05505	0,01901 + j0,05505	0,03983 + j0,16518
90%	0,02139 + j0,06193	0,02139 + j0,06193	0,04481 + j0,18583
100%	0,02377 + j0,06881	0,02377 + j0,06881	0,04979 + j0,20647

Lampiran I.3

Tabel Hasil Perhitungan Impedansi Total Urutan Positif, Negatif dan Nol Sebelum Gardu Induk Piyungan Dibangun

Lokasi Gangguan (% Panjang Saluran)	Impedansi Saluran (pu)		
	Z_1	Z_2	Z_0
10%	0,01089 + j0,03814	0,01086 + j0,03849	0,02389 + j0,10183
20%	0,01162 + j0,04030	0,01159 + j0,04064	0,02542 + j0,10819
30%	0,01204 + j0,04160	0,01201 + j0,04195	0,02631 + j0,11192
40%	0,01215 + j0,04204	0,01213 + j0,04240	0,02655 + j0,11301
50%	0,01196 + j0,04163	0,01193 + j0,04200	0,02616 + j0,11146
60%	0,01146 + j0,04037	0,01143 + j0,04074	0,02513 + j0,10727
70%	0,01065 + j0,03824	0,01063 + j0,03863	0,02345 + j0,10044
80%	0,00954 + j0,03526	0,00951 + j0,03566	0,02114 + j0,09097
90%	0,00812 + j0,03143	0,00809 + j0,03184	0,01818 + j0,07887
100%	0,00639 + j0,02674	0,00637 + j0,02717	0,01459 + j0,06412

Lampiran I.4

Tabel Hasil Perhitungan Konstanta Urutan Positif, Negatif dan Nol Sebelum Gardu Induk Piyungan Dibangun

Lokasi Gangguan	Urutan Positif			Urutan Negatif			Urutan Nol		
	Z _{1M}	Z _{1N}	C ₁	Z _{2M}	Z _{2N}	C ₂	Z _{0M}	Z _{0N}	C ₀
10%	0,01156 + j0,03453	0,02519 + j0,07608	0,68755 + j0,00073	0,01156 + j0,03459	0,02519 + j0,07625	0,68765 + j0,00076	0,02433 + j0,10142	0,05308 + j0,22169	0,68608 + j0,000096
20%	0,01394 + j0,04141	0,02281 + j0,06920	0,62510 + j0,00147	0,01394 + j0,04147	0,02282 + j0,06937	0,62532 + j0,00153	0,02931 + j0,12207	0,04810 + j0,20104	0,62215 + j0,00019
30%	0,01632 + j0,04830	0,02044 + j0,06232	0,56265 + j0,00220	0,01632 + j0,04835	0,02044 + j0,06248	0,56298 + j0,00230	0,03429 + j0,14272	0,04312 + j0,18039	0,55823 + j0,00028
40%	0,01869 + j0,05518	0,01806 + j0,05544	0,50020 + j0,00294	0,01870 + j0,05523	0,01806 + j0,05560	0,50065 + j0,00307	0,03927 + j0,16336	0,03814 + j0,18039	0,49430 + j0,00037
50%	0,02107 + j0,06206	0,01568 + j0,04856	0,43775 + j0,00367	0,02107 + j0,06211	0,01568 + j0,04872	0,43831 + j0,00384	0,04425 + j0,18401	0,03316 + j0,13910	0,43038 + j0,00047
60%	0,02345 + j0,06894	0,01330 + j0,04168	0,37531 + j0,00441	0,02345 + j0,06900	0,01331 + j0,04184	0,37597 + j0,00461	0,04923 + j0,20466	0,02818 + j0,11845	0,36646 + j0,00056
70%	0,02583 + j0,07582	0,01093 + j0,03480	0,31286 + j0,00515	0,02583 + j0,07588	0,01093 + j0,03496	0,31364 + j0,00538	0,05421 + j0,22531	0,02320 + j0,09780	0,30253 + j0,00066
80%	0,02820 + j0,08270	0,00855 + j0,02791	0,25041 + j0,00588	0,02820 + j0,08276	0,00855 + j0,02808	0,25130 + j0,00615	0,05919 + j0,2459	0,01822 + j0,07715	0,23861 + j0,00075
90%	0,03058 + j0,08959	0,00617 + j0,02103	0,18796 + j0,00662	0,03058 + j0,08964	0,00618 + j0,02120	0,18897 + j0,00691	0,06417 + j0,26660	0,01324 + j0,05651	0,17468 + j0,00085
100%	0,03296 + j0,09647	0,00380 + j0,01415	0,12551 + j0,00735	0,03296 + j0,09652	0,00380 + j0,01431	0,12663 + j0,00768	0,06915 + j0,28725	0,00827 + j0,03586	0,11076 + j0,00094

Lampiran I.5

Tabel Hasil Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat Sebelum Gardu Induk Piyungan Dibangun

Lokasi Gangguan (% Panjang Saluran)	Arus Gangguan Hubung Singkat (A)	
	3 Fasa	1 Fasa-Tanah
10%	9702,2593	6268,2096
20%	9176,2865	5912,3239
30%	8886,7643	5720,0680
40%	8793,5789	5662,8475
50%	8884,6222	5732,7020
60%	9171,6429	5939,3704
70%	9694,2401	6313,8957
80%	10534,7455	6921,4970
90%	11855,7461	7895,1454
100%	13998,5747	9529,8001

Lampiran I.6

Tabel Hasil Perhitungan Arus, Tegangan dan Impedansi Gangguan Hubung Singkat Yang Terdeteksi Oleh Rele Jarak Sebelum Gardu Induk Piyungan Dibangun

Lokasi Gangguan	3 Fasa				1 Fasa-Tanah			
	V_R (V)	I_R (A)	Z_{RP} (Ω)	Z_{RS} (Ω)	V_R (V)	$I_R + K_0 I_N$ (A)	Z_{RP} (Ω)	Z_{RS} (Ω)
10%	0,289 $\angle 71,00^\circ$	0,6616 $\angle 0,06^\circ$	1,6381	0,4368	1,4178 $\angle 74,23^\circ$	3,2475 $\angle 3,30^\circ$	1,6371	0,4365
20%	0,5255 $\angle 71,07^\circ$	0,6025 $\angle 0,13^\circ$	3,2762	0,8736	2,5743 $\angle 74,26^\circ$	2,9502 $\angle 3,35^\circ$	3,2721	0,8725
30%	0,7095 $\angle 71,16^\circ$	0,5414 $\angle 0,22^\circ$	4,9143	1,3104	3,4695 $\angle 74,30^\circ$	2,6529 $\angle 3,42^\circ$	4,9042	1,3077
40%	0,841 $\angle 71,28^\circ$	0,4813 $\angle 0,33^\circ$	6,552	1,7473	4,1033 $\angle 74,35^\circ$	2,3556 $\angle 3,50^\circ$	6,5322	1,7419
50%	0,92 $\angle 71,42^\circ$	0,4212 $\angle 0,48^\circ$	8,1905	2,1841	4,4759 $\angle 74,42^\circ$	2,0583 $\angle 361^\circ$	8,1544	2,1745
60%	0,9466 $\angle 71,61^\circ$	0,3611 $\angle 0,67^\circ$	9,8286	2,6209	4,5871 $\angle 74,50^\circ$	1,761 $\angle 3,75^\circ$	9,7677	2,6047
70%	0,9206 $\angle 71,88^\circ$	0,3011 $\angle 0,94^\circ$	11,4667	3,0577	4,437 $\angle 74,63^\circ$	1,4638 $\angle 3,95^\circ$	11,3669	3,0311
80%	0,8424 $\angle 72,26^\circ$	0,241 $\angle 1,34^\circ$	13,1048	3,4946	4,0257 $\angle 74,81^\circ$	1,1665 $\angle 4,25^\circ$	12,9409	3,4509
90%	0,7115 $\angle 72,96^\circ$	0,1823 $\angle 2,01^\circ$	14,7429	3,9314	3,3531 $\angle 75,13^\circ$	0,8693 $\angle 4,75^\circ$	14,4634	3,8569
100%	0,5285 $\angle 74,29^\circ$	0,1209 $\angle 3,35^\circ$	16,3810	4,3682	2,4195 $\angle 75,80^\circ$	0,5723 $\angle 5,78^\circ$	15,8530	4,2274

Lampiran I.7

Tabel Hasil Perhitungan Impedansi Saluran Transmisi Urutan Positif, Negatif dan Nol Setelah Gardu Induk Piyungan Dibangun

Lokasi Gangguan (% Panjang Saluran)	Impedansi Saluran (pu)		
	nZ_{1L}	nZ_{2L}	nZ_{0L}
10%	0,00115 + j0,00335	0,00115 + j0,00335	0,00242 + j0,01007
20%	0,00231 + j0,00671	0,00231 + j0,00671	0,00485 + j0,02014
30%	0,00347 + j0,01006	0,00347 + j0,01006	0,00728 + j0,03021
40%	0,00463 + j0,01342	0,00463 + j0,01342	0,00971 + j0,04028
50%	0,00579 + j0,01678	0,00579 + j0,01678	0,01214 + j0,05035
60%	0,00695 + j0,02013	0,00695 + j0,02013	0,01457 + j0,06042
70%	0,00811 + j0,02349	0,00811 + j0,02349	0,01700 + j0,07049
80%	0,00927 + j0,02684	0,00927 + j0,02684	0,01942 + j0,08056
90%	0,01043 + j0,03020	0,01043 + j0,03020	0,02185 + j0,09063
100%	0,01159 + j0,03356	0,01159 + j0,03356	0,02428 + j0,10070

Lampiran I.8

Tabel Hasil Perhitungan Impedansi Total Urutan Positif, Negatif dan Nol Setelah Gardu Induk Piyungan Dibangun

Lokasi Gangguan (% Panjang Saluran)	Impedansi Saluran (pu)		
	Z_1	Z_2	Z_0
10%	0,00848 + j0,03134	0,00845 + j0,03169	0,01885 + j0,08102
20%	0,00875 + j0,03221	0,00873 + j0,03257	0,01943 + j0,08347
30%	0,00889 + j0,03269	0,00887 + j0,03305	0,01973 + j0,08475
40%	0,00890 + j0,03280	0,00887 + j0,03316	0,01974 + j0,08487
50%	0,00877 + j0,03252	0,00874 + j0,03289	0,01948 + j0,08382
60%	0,00850 + j0,03186	0,00848 + j0,03224	0,01893 + j0,08161
70%	0,00810 + j0,03082	0,00808 + j0,03121	0,01810 + j0,07822
80%	0,00757 + j0,02940	0,00754 + j0,02979	0,01698 + j0,07368
90%	0,00689 + j0,02760	0,00687 + j0,02800	0,01559 + j0,06796
100%	0,00609 + j0,02542	0,00607 + j0,02582	0,01391 + j0,06108

Lampiran I.8

Tabel Hasil Perhitungan Konstanta Urutan Positif, Negatif dan Nol Setelah Gardu Induk Piyungan Dibangun

Lokasi Gangguan	Urutan Positif			Urutan Negatif			Urutan Nol		
	Z _{1M}	Z _{1N}	C ₁	Z _{2M}	Z _{2N}	C ₂	Z _{0M}	Z _{0N}	C ₀
10%	0,00699 + j0,02023	0,01286 + j0,03885	0,65651 + j0,00294	0,00699 + j0,02023	0,01287 + j0,03893	0,65696 + j0,00307	0,01465 + j0,06076	0,02708 + j0,11313	0,65048 + j0,00039
20%	0,00815 + j0,02359	0,01170 + j0,03549	0,59956 + 0,00341	0,00815 + j0,02359	0,01171 + j0,03557	0,60008 + j0,00356	0,01708 + j0,07083	0,02465 + j0,10306	0,59256 + j0,00045
30%	0,00931 + 0,02695	0,01054 + j0,03214	0,54260 + j0,00389	0,00931 + j0,02694	0,01055 + j0,03222	0,54320 + j0,00405	0,01951 + j0,08090	0,02222 + j0,09299	0,53464 + j0,00051
40%	0,01047 + j0,03030	0,00939 + j0,02878	0,48565 + j0,00436	0,01047 + j0,03030	0,00939 + j0,02886	0,48631 + j0,00454	0,02194 + j0,09097	0,01979 + j0,08292	0,47672 + j0,00058
50%	0,01163 + j0,03366	0,00823 + j0,02542	0,42870 + j0,004832	0,01163 + j0,03366	0,00823 + j0,02551	0,42943 + j0,00503	0,02437 + j0,10104	0,01736 + j0,07285	0,41880 + j0,00064
60%	0,01279 + j0,03701	0,00707 + j0,02207	0,37174 + j0,00530	0,01279 + j0,03701	0,00707 + j0,02215	0,37255 + j0,00552	0,02680 + j0,11111	0,01494 + j0,06278	0,36088 + j0,00070
70%	0,01395 + j0,04037	0,00591 + j0,01871	0,31479 + j0,00577	0,01395 + j0,04037	0,00591 + j0,01879	0,31567 + j0,00601	0,02923 + j0,12118	0,01251 + j0,05271	0,30295 + j0,00076
80%	0,01511 + j0,04373	0,00475 + j0,01535	0,25783 + j0,00624	0,01511 + j0,04373	0,00475 + j0,01544	0,25878 + j0,00651	0,03165 + j0,13125	0,01008 + j0,04264	0,24503 + j0,00083
90%	0,01627 + j0,04708	0,00359 + j0,01200	0,20088 + j0,00671	0,01627 + j0,04708	0,00359 + j0,01208	0,20190 + j0,00700	0,03408 + j0,14132	0,00765 + j0,03257	0,18711 + j0,00089
100%	0,01743 + j0,05044	0,00243 + j0,00864	0,14392 + j0,00718	0,01743 + j0,05044	0,00243 + j0,00873	0,14502 + j0,00749	0,03651 + j0,15139	0,00522 + j0,02250	0,12919 + j0,00095

Lampiran I.9

Tabel Hasil Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat Setelah Gardu Induk Piyungan Dibangun

Lokasi Gangguan (% Panjang Saluran)	Arus Gangguan Hubung Singkat (A)	
	3 Fasa	1 Fasa-Tanah
10%	11852,8966	7778,4147
20%	11530,2361	7557,6434
30%	11358,2637	7444,0292
40%	11324,1430	7428,3551
50%	11425,3744	7509,3793
60%	11669,3250	7693,5806
70%	12074,6088	7996,5032
80%	12674,8233	8446,2483
90%	13526,1332	9090,6994
100%	14722,2314	10012,3910

Lampiran I.10

Tabel Hasil Perhitungan Arus, Tegangan dan Impedansi Gangguan Hubung Singkat Yang Terdeteksi Oleh Rele Jarak Setelah Gardu Induk Piyungan Dibangun

Lokasi Gangguan	3 Fasa				1 Fasa-Tanah			
	V_R (V)	I_R (A)	Z_{RP} (Ω)	Z_{RS} (Ω)	V_R (V)	$I_R + K_0 \cdot I_N$ (A)	Z_{RP} (Ω)	Z_{RS} (Ω)
10%	0,1345 $\angle 71,20^\circ$	0,6317 $\angle 0,25^\circ$	0,7989	0,2130	0,6576 $\angle 74,32^\circ$	3,0942 $\angle 3,44^\circ$	0,7970	0,2125
20%	0,2458 $\angle 71,26^\circ$	0,5769 $\angle 0,32^\circ$	1,5978	0,4261	1,1994 $\angle 74,35^\circ$	2,8236 $\angle 3,49^\circ$	1,5929	0,4248
30%	0,3337 $\angle 71,35^\circ$	0,5221 $\angle 0,48^\circ$	2,3967	0,6391	1,6254 $\angle 74,38^\circ$	2,5530 $\angle 3,56^\circ$	2,3875	0,6367
40%	0,3982 $\angle 71,45^\circ$	0,4748 $\angle 0,51^\circ$	3,1956	0,8522	1,9356 $\angle 74,43^\circ$	2,2824 $\angle 3,63^\circ$	3,1802	0,8481
50%	0,4394 $\angle 71,58^\circ$	0,4125 $\angle 0,64^\circ$	3,9946	1,0652	2,13 $\angle 74,49^\circ$	2,0118 $\angle 3,73^\circ$	3,9703	1,0588
60%	0,4572 $\angle 71,76^\circ$	0,3577 $\angle 0,81^\circ$	4,7935	1,2783	2,2087 $\angle 74,57^\circ$	1,7413 $\angle 3,86^\circ$	4,7566	1,2684
70%	0,4518 $\angle 71,99^\circ$	0,3029 $\angle 1,05^\circ$	5,5924	1,4913	2,1715 $\angle 74,68^\circ$	1,4707 $\angle 4,03^\circ$	5,5368	1,4765
80%	0,4229 $\angle 72,33^\circ$	0,2481 $\angle 1,38^\circ$	6,3913	1,7043	2,0185 $\angle 74,84^\circ$	1,2001 $\angle 4,28^\circ$	6,3070	1,6819
90%	0,3708 $\angle 72,85^\circ$	0,1934 $\angle 1,91^\circ$	7,1902	1,9174	1,7498 $\angle 75,09^\circ$	0,9296 $\angle 4,68^\circ$	7,0581	1,8822
100%	0,2954 $\angle 73,80^\circ$	0,1386 $\angle 2,85^\circ$	7,9891	2,1304	1,3653 $\angle 75,55^\circ$	0,6592 $\angle 5,40^\circ$	7,7665	2,0711

Lampiran I.11

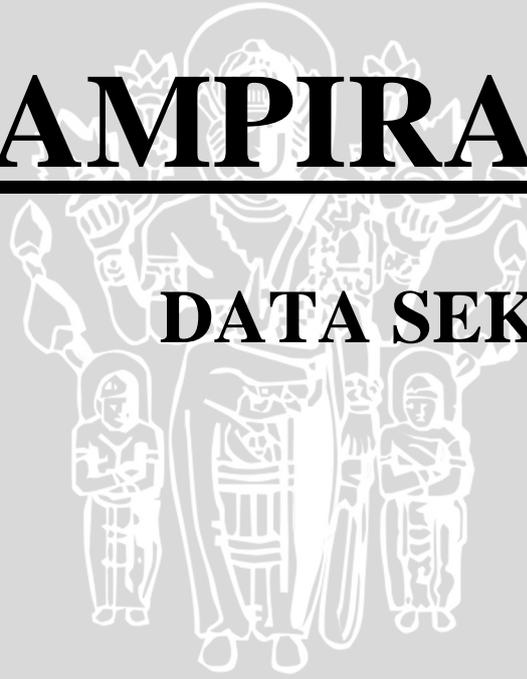
Tabel Hasil Perhitungan Setelah Impedansi Rele Jarak Berdasarkan Saluran Yang Diamankan

Zona Proteksi	Arah Rele Setelan	Bantul-Semanu	Piyungan-Semanu	Piyungan-Bantul	Bantul-Piyungan
Zona 1	$Z_{1s} (\Omega)$	3,49462	1,70434	1,79028	1,79028
	$t_1 (s)$	0	0	0	0
Zona 2	$Z_{2min} (\Omega)$	5,24193	2,55651	2,68541	2,68541
	$Z_{2maks} (\Omega)$	-	-	4,28019	3,15375
	$Z_{2s} (\Omega)$	5,24193	2,55651	4,28019	3,15375
	$t_2 (s)$	0,40	0,40	0,40	0,40
Zona 3	$Z_{3min} (\Omega)$	-	-	6,42028	4,73062
	$Z_{3maks} (\Omega)$	-	-	5,73934	-
	$Z_{3s} (\Omega)$	-	-	6,42028	4,73062
	$t_3 (s)$	-	-	1,20	0,80

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

LAMPIRAN II

DATA SEKUNDER



Lampiran II.1

Impedansi Sumber Gardu Induk Region Jawa Tengah & D.I. Yogyakarta 2015

BUS	GI/GITET	Tegangan (kV)	Imp. urutan positif		Imp. urutan negatif		Imp. urutan nol	
			R ₁ (pu)	X ₁ (pu)	R ₂ (pu)	X ₂ (pu)	R ₀ (pu)	X ₀ (pu)
1	BANTUL	150	0,00783212	0,0358591	0,007779	0,0365457	0,01854695	0,08241932
2	BANTUL	150	0,00783212	0,0358591	0,007779	0,0365457	0,01854695	0,08241932
1	GEJAYAN	150	0,01002228	0,0403309	0,0099688	0,0410023	0,02378985	0,09597447
2	GEJAYAN	150	0,01002228	0,0403309	0,0099688	0,0410023	0,02378985	0,09597447
1	SEMANU	150	0,01971854	0,070269	0,0196654	0,0709556	0,04344771	0,185649
2	SEMANU	150	0,01971854	0,070269	0,0196654	0,0709556	0,04344771	0,185649
I-5	WATES	150	0,01389724	0,0519787	0,0138715	0,0529322	0,02914886	0,1278981
1	GODEAN	150	0,01093584	0,0445619	0,0108825	0,0452407	0,02493571	0,1086356
2	GODEAN	150	0,01093584	0,0445619	0,0108825	0,0452407	0,02493571	0,1086356
I-5	MEDARI	150	0,010629	0,0439036	0,0105754	0,0445687	0,02450572	0,1066576
1	GEJAYAN	150	0,01002228	0,0403309	0,0099688	0,0410023	0,02378985	0,09597447
2	GEJAYAN	150	0,01002228	0,0403309	0,0099688	0,0410023	0,02378985	0,09597447
2	KENTUNGAN	150	0,00411888	0,0407815	0,0041407	0,0408073	0,01597925	0,07515969
1	KENTUNGAN	150	0,0887175	0,0385853	0,0088182	0,0392567	0,02065565	0,09073759
1	WIROBRAJAN	150	0,00906945	0,0377365	0,0090163	0,038423	0,02191762	0,08805132
2	WIROBRAJAN	150	0,00906945	0,0377365	0,0090163	0,038423	0,02191762	0,08805132

Lampiran II.2

Data Kawat Penghantar Gardu Induk Region Jawa Tengah & D.I. Yogyakarta 2015

Dari	Ke	SKT	Tegangan (kV)	Jarak (Km)	Jenis Kawat	Luas Penampang (mm ²)	I _{Nom} (A)
BANTUL	KLATEN	1	150	34,77	ACSR	240/40	600
BANTUL	KLATEN	2	150	34,77	ACSR	240/40	600
SEMANU	BANTUL	1	150	39,04	ACSR	240/40	500
SEMANU	BANTUL	2	150	39,04	ACSR	240/40	500
GODEAN	BANTUL	1	150	12,25	ACSR	240/40	600
KENTUNGAN	BANTUL	1	150	19,96	ACSR	240/40	600
KENTUNGAN	GODEAN	1	150	7,71	ACSR	240/40	600
PEDAN5	KLATEN	1	150	25,47	ACSR	240/40	1200
PEDAN5	KLATEN	2	150	25,47	ACSR	240/40	1200

Sumber : APD Yogyakarta, 2015

Lampiran II.3

Data Transformator Gardu Induk Region Jawa Tengah & D.I. Yogyakarta 2015

GI	Bay Trafo	MVA	XT (%)	HV (kV)	LV (kV)	I _{nom} LV (kA)	ZT (Ω)
GI Bantul	Trafo-1 150/20 kV	60	12,35%	150	20	1,7321	0,8233
GI Bantul	Trafo-3 150/20 kV	60	12,79%	150	20	1,7321	0,8527
GI Semanu	Trafo-1 150/22 kV	30	12,44%	150	22	0,7873	2,0071
GI Semanu	Trafo-2 150/22 kV	30	11,97%	150	22	0,7873	1,9310
GI Klaten	Trafo-2 150/20 kV	30	12,40%	150	20	0,8660	1,6533
GI Klaten	Trafo-3 150/20 kV	30	12,39%	150	20	0,8660	1,6520
GI Pedan	Trafo-2 150/20 kV	60	12,32%	150	20	1,7321	0,8213
GI Godean	Trafo-1 150/22 kV	30	11,86%	150	20	0,8660	1,5813
GI Godean	Trafo-2 150/20 kV	30	13,27%	150	20	0,8660	1,7695

Sumber : APD Yogyakarta, 2015

Lampiran II.4

Data CT & PT Gardu Induk Bantul & Semanu 2014

GI	Trafo	CT Prim	CT Sek	Rasio CT	PT Prim	PT Sek	Rasio PT
Bantul	1	2000	5	400	150000	100	1500
	3	2000	1	2000	150000	100	1500
Semanu	1	2000	5	400	150000	100	1500
	2	2000	5	400	150000	100	1500

Sumber : APD Yogyakarta, 2014

Lampiran II.5

Data Rencana Pembangunan Gardu Induk Piyungan

A. RINGKASAN EKSEKUTIF

Nama	:	PEMBANGUNAN GI BANTUL BARU
Lokasi	:	DS. Sendangsari, Kecamatan Pajangan, Kabupaten Bantul.
Kapasitas	:	Trafo : 2x60 MVA 150/20 kV,
Lingkup proyek	:	Pembangunan serandang 150 kV, Pemasangan Trafo 2 x 60 MVA, 4 line bay, 2 TR Bay, 1 Bus Coupler, SUTT Pendukung, Pembangunan Gedung Cell 20 KV dan Prasarana Lainnya.
Perkiraan biaya	:	Rp. 96,9 M (GI & SUTT)
Sumber dana	:	LOAN JBIC
Rencana beroperasi	:	THN 2016

B. DISKRIPSI PROYEK

Rencana pembangunan GI Bantul Baru di Desa Sendangsari Kecamatan Pajangan Kabupaten Bantul terletak antara Kec. Kasihan disebelah Timur (Kab. Bantul) dan Kec. Sentolo sebelah barat (Kab. Kulon Progo), di sebelah utara Kecamatan Sedayu (Kab. Bantul) serta Kecamatan Pandak (Kab. Bantul) disebelah selatan.

Saat ini kawasan Sendangsari dan sekitarnya dipasok dari Gardu Induk Bantul penyulang BTL 11, Gardu Induk Godean penyulang GDN 02, serta Gardu Induk Wates penyulang WT 02.

Tegangan ujung saat beban puncak pada penyulang-penyulang tersebut di atas bervariasi antara 18 – 19 kV, sedangkan tegangan sekunder dari gardu distribusi saat beban puncak berkisar antara 180 – 190 volt pada posisi trap terendah.

Hal tersebut di atas disebabkan karena tegangan system 150 kV yang masuk ke Gardu Induk eksisting sudah rendah (137kV), disamping penyulang-penyulang yang melayani wilayah Sendangsari mempunyai panjang berkisar antara 50 –75 kms termasuk percabangannya, serta beban penyulang – penyulang tersebut cukup besar . Sedangkan jarak wilayah Sendangsari dari GI Bantul ± 20 km, dari GI Godean ± 22 km, dari GI Wates ± 15 km.

Susut distribusi pada penyulang yang melayani lokasi tersebut diatas relatif besar yaitu antara 9 - 10 % dan jumlah gangguan penyulang cukup tinggi yaitu rata-rata 15 kali / bulan.

Tujuan Pembangunan GI Kentungan Baru adalah :

- Mengatasi tegangan Sistem 150 kV yang mensuply di Gardu induk Eksisting di wilayah selatan (GI Bantul, Wates, Purworejo).
- Mengantisipasi penambahan kebutuhan tenaga listrik di kawasan wilayah pelayanan UPJ Wates, sebagian UPJ Bantul, sebagian UPJ Sedayu, dengan mengalihkan beban dari Gardu Induk Eksisting (Gardu Induk Bantul dan Godean serta GI KWates) ke GI Bantul Baru beberapa tahun ke depan yang trendnya meningkat terus.
- Memperbaiki mutu dan keandalan penyaluran tenaga listrik ke konsumen
- Mendukung proyek pembangunan pembangkit non BBM 10.000 MW.
- Mendekatkan GI ke arah pelanggan
- Mengantisipasi GRESS yang akan datang.

C. KAJIAN SISTEM KELISTRIKAN

1 Rencana Pengembangan GI

Guna mencapai sasaran dalam rangka memperbaiki tegangan sistem yang ada dibagian selatan saat ini serta penyerapan daya dalam rangka program percepatan pembangkit 10.000 MW maka alternatif solusi yang dapat dilaksanakan adalah :

Lampiran 2: Aliran Daya Tahun 2016 Setelah GI Bantul Baru Beroperasi

