

**ANALISIS KOORDINASI RELE ARUS LEBIH PADA PENYULANG PUJON
TERINTEGRASI DENGAN PEMBANGKIT TERSEBAR MIKROHIDRO**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**

Diajukan untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

FAIZ YUSKY AHLIAN

NIM. 0810630051 - 63

KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI, DAN PENDIDIKAN TINGGI

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2015

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT karena hanya dengan rahmat, ridho, dan kasih sayang-Nya sehingga dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "Analisis Koordinasi Rele Arus Lebih Pada penyulang Pujon Terintegrasi Dengan Pembangkit Tersebar Mikrohidro" dengan baik. Shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad Rasulullah SAW sebagai tauladan dalam menghadapi permasalahan. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik dari Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

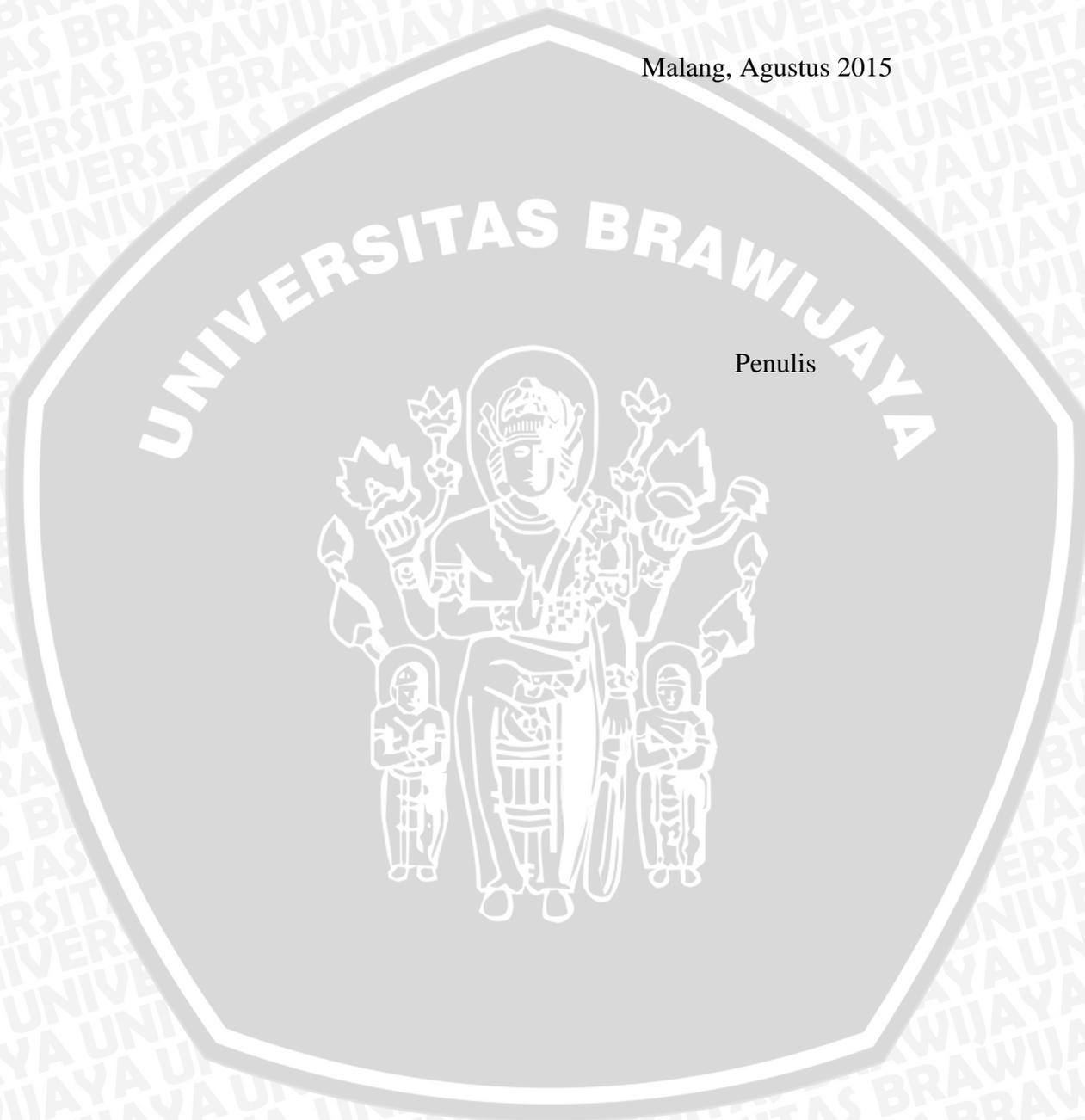
Disadari bahwa tanpa bantuan, bimbingan serta dorongan dari semua pihak, penyelesaian skripsi ini tidak mungkin bisa terwujud. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua tercinta, Bapak Suwandi, Ibu Nunuk, Mbak Nungky dan Mbak Kiki yang selalu mendoakan, memberi nasihat, perhatian, dorongan dan kesabaran selama ini.
2. Bapak M. Aziz Muslim, ST., MT., Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
3. Bapak Hadi Suyono, ST., MT., Ph.D selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya dan selaku dosen pembimbing skripsi yang dengan sabar memberikan banyak pengarahan dan masukan dalam penyelesaian skripsi ini.
4. Bapak Ali Mustofa, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Sarjana Teknik Elektro.
5. Ibu Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc selaku KKDK Konsentrasi Teknik Energi Elektrik dan selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan pengarahan dan bimbingan dalam penyelesaian skripsi ini serta atas segala bentuk bantuan dan saran yang membangun.
6. Profesor Abraham Lomi selaku Kepala Laboratorium SSTE ITN yang mengizinkan melakukan simulasi ETAP 7.0.
7. Bapak Adi Warsito yang bersedia membantu dalam pengerjaan skripsi ini.
8. Teman-teman yang memberikan motivasi, semangat dan bantuan yaitu sahabat terdekat Frandi, Taufik, Yoga, Fajar, Agus, Arsyad, Rudi, Heru, Erwan, Fariz, Bagus dan teman Concorde 2008.
9. Rekan laboratorium Mesin Elektrik Mas Saiful, Mas Toti, Nisa, Penjot dan Nuha.
10. Teman SMA Lutfiana, Mela, Hergunadi dan Madinah.

Sekiranya Allah SWT mencatat amalan ikhlas kami dan semua pihak yang turut membantu sehingga skripsi ini terselesaikan. Akhirnya, saya menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna namun semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi kita semua. Amin.

Malang, Agustus 2015

Penulis



DAFTAR ISI

LEMBAR PERSETUJUAN	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	ix
RINGKASAN	x
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 Penulisan Skripsi	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Sistem Proteksi Tenaga Listrik	5
2.2 Gangguan Pada Sistem Distribusi	5
2.3 Gangguan Hubung Singkat	8
2.3.1 Hubung Singkat Satu Fasa Ke Tanah	10
2.3.2 Hubung Singkat Antar Fasa	11
2.3.3 Hubung Singkat Tiga Fasa	12
2.3.4 Hubung Singkat Dua Fasa Ke Tanah	13
2.4 Perhitungan Impedansi	14
2.4.1 Sistem Per Unit (pu)	14
2.4.2 Perhitungan Impedansi Sumber	15



2.4.3 Impedansi Urutan Komponen	16
2.4.3.1 Impedansi Urutan Transformator Daya	16
2.4.3.2 Impedansi Penyulang	17
2.4.4 Perhitungan Impedansi Ekuivalen Jaringan	18
2.5 Sistem Pengaman Jaringan Distribusi 20 kV	19
2.6 Rele Arus Lebih.....	19
2.7 Karakteristik Rele Arus Lebih.....	22
2.7.1 Rele Arus Lebih Waktu Seketika (Instan).....	22
2.7.2 Rele Arus Lebih Waktu Tertentu (Definite).....	24
2.7.3 Rele Arus Lebih Waktu Terbalik (Invers).....	25
2.8 Daerah Pengaman.....	28
2.9 Koordinasi Arus Dan Waktu Pada Rele Arus Lebih.....	30
2.10 Koordinasi Peralatan Proteksi Menurut Standar PLN.....	31
2.11 Pengaruh <i>Distributed Generation</i> Pada Sistem Proteksi.....	31
2.12 Pembangkit Tersebar Mikrohidro.....	33
2.13 Transformator Daya Pada Pembangkit Tersebar Mikrohidro	33
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	35
3.1 Studi Literatur.....	35
3.2 Pengambilan Data.....	35
3.3 Pemodelan Dan Simulasi.....	35
3.4 Diagram Alir Metode Penelitian	36
3.5 Pengambilan Kesimpulan Dan Saran	36
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN	37
4.1 Gardu Induk Sengkaling.....	37
4.2 Sistem Distribusi Daya	38
4.2.1 Data Gardu Induk	38
4.2.2 Data Saluran	39

4.2.3 Data Transformator Distribusi.....	39
4.3 Pembangkit Tersebar Mikrohidro	40
4.4 Simulasi Gangguan Hubung Singkat Penyulang Pujon Pada ETAP	51
4.4.1 Tanpa PLTMH	41
4.4.2 Dengan PLTMH.....	42
4.5 Koordinasi <i>Over Current Relay</i> Pada Penyulang Pujon.....	45
4.5.1 Tanpa PLTMH	45
4.5.2 Dengan PLTMH.....	48
BAB V PENUTUP	52
5.1 Kesimpulan.....	52
5.2 Saran.....	52
DAFTAR PUSTAKA	53
LAMPIRAN	55
Lampiran 1 <i>Single Line</i> dan Gambar Rangkaian Penyulang Pujon.....	55
Lampiran 2 Arus Hubung Singkat GI/GITET P3B Jawa Bali Semester Dua, Tahun 2012 untuk Perhitungan Sistem Proteksi	56
Lampiran 3 Impedansi Saluran.....	57
Lampiran 4 Beban Trafo dan Penyulang Gardu Induk Sengkaling.....	58

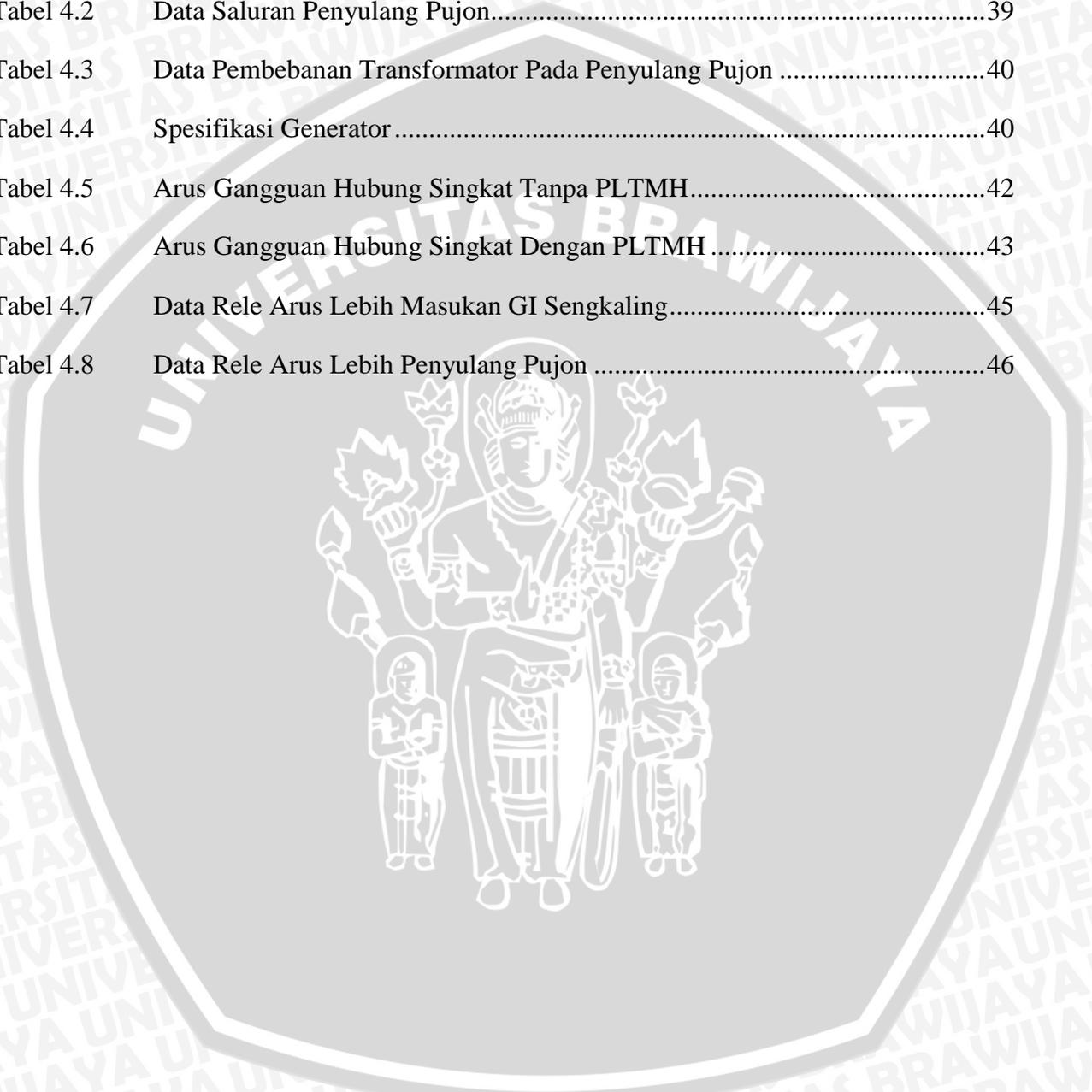
DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah	10
Gambar 2.2	Gangguan hubung singkat antar fasa	11
Gambar 2.3	Gangguan hubung singkat tiga fasa	13
Gambar 2.4	Gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah	13
Gambar 2.5	Karakteristik rele arus lebih waktu seketika	22
Gambar 2.6	Karakteristik rele arus lebih waktu tertentu	25
Gambar 2.7	Karakteristik rele arus lebih waktu terbalik	26
Gambar 2.11	Daerah pengaman distribusi	29
Gambar 2.12	Koordinasi setelan arus dan waktu	30
Gambar 2.13	Aliran daya balik saat gangguan pada sistem tenaga listrik akibat penambahan pembangkit tersebar.....	32
Gambar 3.1	Diagram alir metode penelitian.....	36
Gambar 4.1	Penyulang pujan dan lokasi pemberian gangguan pada ETAP 7.0	41
Gambar 4.2	Penyulang pujan terhubung PLTMH dan lokasi pemberian gangguan pada ETAP 7.0.....	42
Gambar 4.3	Perbandingan arus gangguan hubung singkat tiga fasa pada penyulang pujan tanpa PLTMH dan dengan PLTMH	43
Gambar 4.4	Perbandingan arus gangguan hubung singkat dua fasa pada penyulang pujan tanpa PLTMH dan dengan PLTMH	44
Gambar 4.5	Perbandingan arus gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah pada penyulang pujan tanpa PLTMH dan dengan PLTMH.....	44
Gambar 4.6	Perbandingan arus gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah pada penyulang pujan tanpa PLTMH dan dengan PLTMH.....	45



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Koefisien <i>Time Dial</i>	28
Tabel 4.1	Data Transformator Daya III Gardu Induk Sengkaling Malang.....	37
Tabel 4.2	Data Saluran Penyulang Pujon.....	39
Tabel 4.3	Data Pembebanan Transformator Pada Penyulang Pujon	40
Tabel 4.4	Spesifikasi Generator	40
Tabel 4.5	Arus Gangguan Hubung Singkat Tanpa PLTMH.....	42
Tabel 4.6	Arus Gangguan Hubung Singkat Dengan PLTMH	43
Tabel 4.7	Data Rele Arus Lebih Masukan GI Sengkaling.....	45
Tabel 4.8	Data Rele Arus Lebih Penyulang Pujon	46



RINGKASAN

Faiz Yusky Ahlian, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Agustus 2015, Analisis Koordinasi Rele Arus Lebih Pada Penyulang Pujon Terintegrasi Dengan Pembangkit Tersebar Mikrohidro, Dosen Pembimbing: Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D., Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc.

Kebutuhan masyarakat akan energi listrik yang terus meningkat tentu harus diikuti oleh penambahan pembangkit listrik. Akhir-akhir ini telah dikembangkan sistem pembangkitan energi mandiri yang dapat dikoneksikan pada jaringan distribusi. Pembangkit tersebut adalah pembangkit tersebar. Pembangkit tersebut diantaranya adalah mikrohidro.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis besar arus hubung singkat dan koordinasi proteksi yang terjadi di penyulang pujon sebelum dan setelah terintegrasi dengan pembangkit tersebar mikrohidro.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah pengumpulan data diantaranya gambar *single line diagram* penyulang Pujon, spesifikasi generator PLTMH, transformator GI dan rele arus lebih pada GI Sengkaling, data saluran dan data beban. Setelah data-data yang telah disebutkan didapatkan, hal yang dilakukan selanjutnya adalah memodelkan sistem jaringan distribusi penyulang Pujon menggunakan perangkat lunak ETAP 7.0, kemudian data-data potensi mikrohidro diproses dengan pendekatan matematis sehingga diketahui daya pada pembangkit mikrohidro. Selanjutnya PLTMH tersebut disambungkan pada jaringan distribusi 20 dengan bantuan perangkat lunak ETAP 7.0. Berdasarkan hasil simulasi tersebut dilakukan sebuah analisis bagaimana pengaruh penyambungan pembangkit tersebar mikrohidro tersebut terhadap arus hubung singkat dan koordinasi proteksinya.

Kesimpulan yang dapat diambil dari skripsi ini adalah dari hasil simulasi, penyambungan pembangkit tersebar mikrohidro dapat meningkatkan arus hubung singkat pada saluran distribusi 20 kV pada penyulang Pujon, dimana arus hubung singkat tiga fasa pada ujung saluran sebelum dan setelah disambungkan pembangkit tersebar mikrohidro adalah 903 A dan 907 A. Arus hubung singkat dua fasa pada ujung saluran sebelum dan setelah disambungkan pembangkit tersebar mikrohidro adalah 782 A dan 786 A. Arus hubung singkat dua fasa ke tanah pada ujung saluran sebelum dan setelah disambungkan pembangkit tersebar mikrohidro adalah 795 A dan 797 A. Arus hubung singkat satu fasa ke tanah pada ujung saluran sebelum dan setelah disambungkan pembangkit tersebar mikrohidro adalah 78 A dan 97 A. Setelah penyambungan pembangkit tersebar mikrohidro pada penyulang Pujon terjadi perubahan pengali waktu (TMS) oleh rele arus lebih penyulang Pujon, yaitu 0,2 dan 0,083. Hal ini terjadi juga pada pengali waktu (TMS) rele arus lebih masukan GI Sengkaling, yaitu 0,05 dan 0,074.

Kata kunci : Pembangkit Tersebar Mikrohidro, Sistem Proteksi, Rele Arus Lebih, Saluran
Distribusi 20 kV.



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan masyarakat akan energi listrik yang terus meningkat tentu harus diikuti oleh penambahan pembangkit listrik. Dengan demikian maka tidak perlu terjadi pemadaman bergilir yang dilakukan PT. PLN (Persero) kepada masyarakat pengguna energi listrik. Penambahan pembangkit listrik yang besar tentu akan membutuhkan biaya yang besar pula dan waktu pembangunan yang lama.

Pembangkit tersebar (DG) atau pembangkit tersebar merupakan salah satu alternatif yang dapat dilakukan untuk mengatasi permasalahan tentang penambahan pembangkit listrik yang terintegrasi langsung dengan sistem distribusi 20 kV. Pembangkit ini dapat berukuran puluhan kW sampai puluhan MW. Selain itu, sistem pembangkit tersebar mempunyai beberapa keuntungan diantaranya adalah menggunakan energi terbarukan yang ramah lingkungan seperti energi matahari dan energi angin, dalam jaringan distribusi, ketika kapasitas pembangkit tidak cukup untuk melayani permintaan beban yang terus meningkat, pembangunan suatu sistem pembangkit tersebar dapat memenuhi pasokan listrik akibat peningkatan beban dan mengurangi investasi fasilitas pembangkit listrik (Wang Bo dan Lan Ka, 2011).

Beberapa teknologi pembangkit tersebar memiliki polusi yang rendah dan efisiensi total yang tinggi seperti *combined heat and power* (CHP) dan mikrohidro (PLTMH). Disamping itu, energi terbarukan yang dapat digunakan sebagai pembangkit tersebar yaitu, tenaga surya dan mikrohidro. Saat ini, mikrohidro mempunyai kontribusi yang besar dalam pembangkitan listrik oleh pembangkit tersebar. Namun demikian, masalah timbul ketika pembangkit tersebar ini terintegrasi dengan jaringan sistem distribusi karena sistem distribusi yang ada dirancang dalam bentuk jaringan radial tanpa mempertimbangkan integrasi dari pembangkit tersebar ini (K. Vijeta, D.V.S.S Siva Sarma). Penempatan pembangkit tersebar pada sebuah jaringan distribusi, akan sangat berpengaruh pada nilai arus gangguan yang muncul saat terjadi gangguan hubung singkat, baik itu hubung singkat tiga fasa atau satu fasa ke tanah di sekitar area penempatan pembangkit tersebar tersebut (Michael T. Doyle). Pada jaringan distribusi tipe radial, penempatan pembangkit tersebar akan sangat berpengaruh pada nilai arus gangguan. Hal ini akan berimbas pada evaluasi penyetelan rele proteksi di area penempatan pembangkit tersebar tersebut (T.Mashau, S.Kibaara, S.Chowdhury, S.P.Chowdhury).

Latar belakang pemilihan judul Analisis Koordinasi Rele Arus Lebih Pada Penyulang Pujon Terintegrasi Dengan Pembangkit Tersebar Mikrohidro berasal dari judul Analisis Pengaruh Penyambungan *Distributed Generation* Pada Rugi – Rugi Daya Saluran Distribusi. Pada skripsi tersebut, PLTMH menghasilkan daya listrik sebesar 8,7 kW.

1.2 Rumusan Masalah

Mengacu pada permasalahan yang diuraikan dalam latar belakang, maka rumusan masalah yang ada pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Berapa besar arus hubung singkat yang terjadi di penyulang Pujon sebelum dan setelah terintegrasi dengan pembangkit tersebar mikrohidro.
2. Bagaimana pengaruh penambahan pembangkit tersebar mikrohidro terhadap koordinasi rele arus lebih di penyulang Pujon sebelum dan setelah terintegrasi dengan pembangkit tersebar mikrohidro.

1.3 Batasan Masalah

Agar masalah yang akan dibahas menjadi jelas dan tidak banyak menyimpang dari topik yang akan dibahas, maka dalam penulisan skripsi ini penulis menekankan, bahwa hal yang akan dibahas adalah:

1. Pembahasan pada sistem koordinasi proteksi pada penyulang Pujon.
2. Pembahasan pada tahap perencanaan penyulang Pujon terintegrasi dengan pembangkit tersebar mikrohidro.
3. Perhitungan arus hubung singkat meliputi analisis gangguan hubung singkat tiga fasa, antar fasa, dua fasa ke tanah dan satu fasa ke tanah.
4. Rele proteksi yang digunakan pada pembangkit tersebar mikrohidro yaitu rele arus lebih waktu terbalik biasa.
5. Tidak membahas koordinasi *Recloser*.

1.4 Tujuan

Adapun tujuan penulisan skripsi ini adalah:

1. Untuk mengetahui pengaruh penambahan pembangkit tersebar terhadap arus hubung singkat dan waktu rele arus lebih.
2. Untuk mengetahui pengaruh penambahan pembangkit tersebar terhadap koordinasi sistem proteksi sistem distribusi.

1.5 Manfaat

Manfaat dari penulisan skripsi ini dapat digunakan sebagai dasar pertimbangan koordinasi sistem proteksi pada penyulang Pujon saat terintegrasi dengan pembangkit tersebar mikrohidro.

1.6 Sistematika Penulisan Skripsi

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

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini membahas mengenai latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan dan manfaat skripsi ini.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Membahas mengenai teori tentang pembangkit tersebar, gangguan pada sistem jaringan distribusi, gangguan hubung singkat, rele arus lebih, sistem proteksi, koordinasi sistem proteksi, koordinasi peralatan proteksi menurut Standar PLN dan pengaruh pembangkit tersebar pada proteksi.

BAB III : METODE PENELITIAN

Memberikan penjelasan tentang metode yang digunakan dalam penelitian ini, meliputi pengambilan data, prosedur perhitungan data.

BAB IV : ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Berisi data hasil pemodelan penyulang Pujon pada etap 7.0 untuk mendapatkan arus hubung singkat pada dan perhitungan koordinasi rele arus lebih.

BAB V : KESIMPULAN

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil penelitian dan saran dari penulis.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 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. Kondisi abnormal tersebut bias disebabkan oleh beberapa keadaan seperti adanya arus hubung singkat, kenaikan tegangan atau penurunan tegangan, keadaan beban berlebih, dan naik turun frekuensi (Pandjaitan, Bonar 2012).

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

Fungsi utama dari sistem proteksi adalah (Hutauruk, Tumpak, 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.

2.2 Gangguan Pada Sistem Distribusi

Gangguan pada sistem distribusi adalah terganggunya sistem energi listrik yang menyebabkan suplai energi listrik terputus. Gangguan pada jaringan distribusi lebih banyak terjadi pada saluran udara (SUTM) yang umumnya lebih rentan dibandingkan dengan saluran distribusi yang ditanam pada tanah (SKTM). Sumber gangguan pada jaringan distribusi dapat berasal dari dalam sistem maupun dari luar sistem distribusi.

1. Gangguan distribusi dari dalam sistem :
 - a) Arus lebih atau tegangan lebih.
 - b) Pemasangan yang kurang tepat.
 - c) Usia pemakaian peralatan.
2. Gangguan distribusi dari luar sistem :
 - a) Sambaran petir.

- b) Hujan atau cuaca.
- c) Penggalian tanah.
- d) Hewan.
- e) SUTM yang terkena dahan/ranting pohon.

Berdasarkan sifat gangguannya, gangguan pada sistem distribusi dapat dibagi menjadi :

a) Gangguan temporer

Gangguan yang bersifat sementara dan terjadi dalam hanya pada waktu yang singkat saja dimana kemudian sistem kembali pada keadaan normal. Misalnya gangguan yang disebabkan oleh petir, hewan atau pohon, dimana terjadi loncatan api pada isolasi udara atau minyak (Hutahuruk, 1991).

b) Gangguan permanen

Gangguan yang baru dapat dihilangkan atau diperbaiki setelah bagian yang terganggu itu diisolir dengan bekerjanya pemutus daya (Hutauruk, Tumpak, 1991).

Gangguan ini bersifat tetap dan ditandai dengan jatuhnya (*trip*) kembali pemutus daya setelah operator memasukkan sistem kembali setelah terjadi gangguan. Untuk mengatasi gangguan-gangguan sebuah peralatan harus dilengkapi dengan sistem pengaman rele, dimana sistem pengaman ini diharapkan dapat mendeteksi adanya gangguan sesuai dengan fungsi dan daerah pengamanannya.

Gangguan yang terjadi dalam jaringan distribusi dapat disebabkan oleh kelalaian manusia (pegawai) didalam mengenai peralatan listrik baik dari dalam instalasi, kalibrasi peralatan, atau karena kecerobohan operator. Meskipun gangguan yang disebabkan manusia ini bisa saja terjadi namun prosentasenya sangat kecil.

Gangguan yang sering terjadi pada jaringan distribusi diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yakni :

1. Dilihat dari fasanya (hubung singkat)

Gangguan ini disebut juga dengan gangguan hubung singkat. Hubung singkat terjadi disebabkan oleh hubungan antar penghantar bertegangan (antar konduktor) atau antara penghantar bertegangan dan media tidak bertegangan (konduktor dengan tanah) sehingga timbul arus yang besar atau

tidak normal. Hubung singkat dapat pula terjadi karena adanya arus yang cukup besar melebihi keadaan normal mengalir pada sistem sebagai akibat dari petir atau pensaklaran yang menimbulkan tegangan yang cukup besar (*over voltage*) sehingga timbul kebocoran atau menyebabkan percikan (*flash over*) melalui permukaan isolator. Isolator yang sudah terkontaminasi oleh debu dapat menyebabkan percikan selama kondisi tegangan normal.

Terdapat beberapa macam gangguan hubung singkat, yaitu :

- Gangguan fasa dengan tanah (*single line to ground*).
- Gangguan antar fasa dengan tanah (*double line to ground*).
- Gangguan tiga fasa dengan atau tanpa hubungan ke tanah.
- Gangguan antar fasa (*line to line*).

Gangguan fasa dengan tanah, gangguan antar fasa dengan tanah, dan gangguan antar fasa menimbulkan arus hubung singkat yang tidak simetris (*asymmetrical short circuit*). Sedangkan gangguan tiga fasa dengan atau tanpa hubungan ke tanah menimbulkan arus hubung singkat yang simetris (*symmetrical short circuit*). Banyak faktor yang memengaruhi jumlah dari masing-masing gangguan seperti konfigurasi jaringan, tegangan, metode pentanahan, tingkat isolasi ke tanah dan antar fasa, kecepatan menghilangkan gangguan, jumlah petir per tahun dan keadaan lingkungan sekitar.

2. Dilihat dari rele yang bekerja

Rele berfungsi untuk melindungi saluran dan peralatan terhadap kerusakan dengan cara menghilangkan gangguan yang terjadi secara tepat dan cepat. Selain itu, untuk membatasi daerah yang terkena gangguan seminimum mungkin agar mutu dan keandalan sistem tetap terjamin.

Jenis gangguan dapat dilihat berdasarkan rele yang bekerja, antara lain dengan melihat jenis rele yang bekerja, misalnya rele arus lebih. Jika yang bekerja adalah rele arus lebih (menyebabkan *PMT trip*) dipastikan gangguan yang terjadi adalah karena hubung singkat fasa ke fasa. Untuk memastikan perlu dilakukan pemeriksaan dengan mencoba memasukkan *PMT* penyulang satu kali, bila *trip* kembali terjadi maka perlu dilakukan pengecekan secara visual pada jaringan seperti : pemeriksaan kemungkinan kawat lengket karena kawat kendur, dahan pohon, benda lain dan binatang yang menyangkut antara fasa ke fasa.

3. Dilihat dari bagian peralatan jaringan sistem distribusi.

Gangguan pada sistem distribusi dapat dengan mudah dilihat dan dikenali dari bagian peralatan jaringan yang mengalami kerusakan, misalnya transformator, *arrester* dan isolator.

2.3 Gangguan Hubung Singkat

Dari jenis gangguan hubung singkat dapat digolongkan menjadi dua kelompok yaitu (Penangsang, O., 2005) :

- a. Hubung Singkat Simetris.

Merupakan gangguan yang terjadi pada semua fasanya sehingga arus maupun tegangan setiap fasanya tetap seimbang setelah gangguan terjadi.

- b. Hubung Singkat Tak Simetris (Asimetris).

Merupakan gangguan yang mengakibatkan tegangan dan arus yang mengalir pada setiap fasanya menjadi tidak seimbang.

Gangguan hubung singkat yang termasuk ke dalam gangguan tak simetris (asimetris) adalah hubung singkat satu fasa maupun dua fasa, sedangkan gangguan simetris adalah hubung singkat tiga fasa (NFPA 70E, 2003). Hampir semua gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik merupakan gangguan tidak simetris. Gangguan-gangguan tak simetris akan menyebabkan mengalirnya arus tak seimbang dalam sistem sehingga untuk menganalisis gangguan yang terjadi digunakan metode komponen simetris untuk menentukan arus maupun tegangan di semua bagian sistem setelah terjadi gangguan. Gangguan ini akan mengakibatkan arus lebih pada fasa yang terganggu, juga akan dapat mengakibatkan kenaikan tegangan pada fasa yang tidak terganggu dan dapat mengakibatkan arus yang jauh lebih besar dari pada arus normal. 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 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.

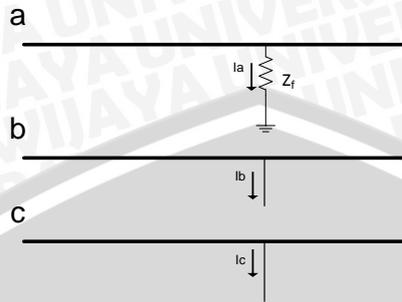
Perhitungan arus gangguan hubung singkat adalah analisa suatu sistem tenaga pada saat dalam gangguan hubung singkat, dimana nantinya akan diperoleh besar nilai besaran-besaran listrik yang dihasilkan sebagai akibat gangguan hubung singkat tersebut. Gangguan hubung singkat dapat didefinisikan sebagai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

Perhitungan arus hubung singkat dibutuhkan untuk :

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

2.3.1 Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Untuk gangguan ini dianggap fasa a mengalami gangguan. Gangguan ini dapat dilihat pada gambar 2.1 di bawah:



Gambar 2.1 Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah

Sumber : (Stevenson, 1994)

Kondisi terminalnya sebagai berikut:

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

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\text{Diperoleh : } I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = 1/3 I_a \quad (2.2)$$

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \quad (2.3)$$

$$I_a = 3I_{a1} = 3 \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \quad (2.4)$$

Arus hubung singkat satu fasa ke tanah adalah (Gonen, 1987) :

$$I_{hs} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \text{ (A)} \quad (2.5)$$

Keterangan :

I_{hs} = Arus hubung singkat (A)

V_f = Tegangan sebelum gangguan (V)

Z_1 = Impedansi urutan positif (Ω)

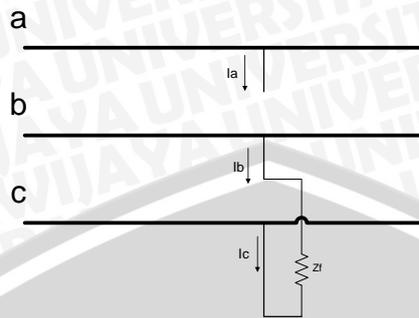
Z_2 = Impedansi urutan negatif (Ω)

Z_0 = Impedansi urutan nol (Ω)

Z_f = Impedansi gangguan (Ω)

2.4.2 Hubung Singkat Antar Fasa

Gangguan terjadi pada fasa b dan c seperti terlihat pada gambar 2.2 di bawah :



Gambar 2.2 Gangguan hubung singkat antar fasa

Sumber : (Stevenson, 1994)

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

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Diperoleh $V_{a1} = V_{a2}$, maka :

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Dari persamaan di atas, didapatkan bahwa :

$$I_{a0} = 0 \quad (2.8)$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3}(a-a^2)I_b \quad (2.9)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3}(a^2-a)I_b \quad (2.10)$$

Sehingga

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

$$I_a = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_f}$$

$$I_b = -I_c = a^2 I_{a1} + a I_{a2} + I_{a0}$$

$$I_b = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_f}$$

Arus hubung singkat antar fasa adalah (Gonen, 1987) :

$$I_{hs} = \left| \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \right| \quad (2.11)$$

2.3.3 Hubung Singkat Tiga Fasa

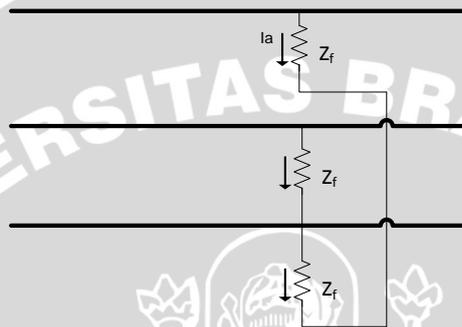
Dengan memperhatikan gambar 2.3 di bawah, maka dapat diketahui kondisi sebagai berikut :

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

$$I_{a0} = 0 ; I_{a2} = 0 ;$$

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

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



Gambar 2.3 Gangguan hubung singkat tiga fasa

Sumber : Stevenson (1994)

Arus hubung singkat tiga fasa adalah (Gonen, 1967) :

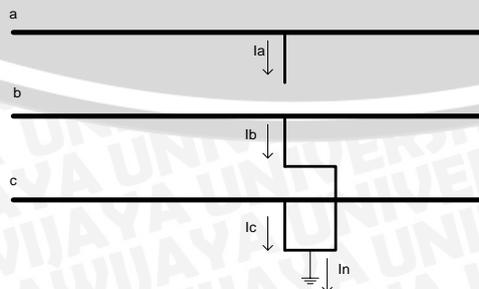
$$I_{hs} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_f} \quad (\text{A}) \quad (2.12)$$

2.3.4 Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah

Sesuai dengan gambar 2.4 diasumsikan bahwa fasa yang mengalami hubung singkat adalah fasa b dan c, sehingga terdapat hubungan-hubungan berikut ini :

$$V_b = V_c = 0$$

$$I_a = 0$$



Gambar 2.4 Gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah

Sumber : (Stevenson, 1994)

Sedangkan besar arus urutan positif, urutan negatif dan urutan nol nya adalah sebagai berikut : (Gonen, 1987)

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + \frac{Z_2 Z_0}{Z_2 + Z_0}} \quad (2.13)$$

$$I_{a2} = -I_{a1} \frac{Z_0}{Z_2 + Z_0} \quad (2.14)$$

$$I_{a0} = -I_{a1} \frac{Z_2}{Z_2 + Z_0} \quad (2.15)$$

Dan untuk arus pada masing-masing fasa yang terkena gangguan yaitu fasa b dan c adalah :

$$I_b = I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2} \quad (2.16)$$

$$I_c = I_{a0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2} \quad (2.17)$$

2.4 Perhitungan Impedansi

Untuk melakukan perhitungan arus hubung singkat terlebih dahulu adalah menentukan impedansi dari setiap elemen rangkaian dan mengubahnya dengan dasar sama. Dua macam cara untuk menentukan impedansi yaitu metode ohm dan per unit (pu).

2.4.1 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):

$$\text{Arus dasar} = \frac{\text{kVA}_{3\phi} \text{ dasar}}{\sqrt{3} \times \text{tegangan dasar, kV}_{L-L}} \quad (2.18)$$

$$\text{Impedansi dasar} = \frac{(\text{Tegangan dasar, kV}_{L-L})^2}{\text{MVA}_{3\phi} \text{ dasar}} \quad (2.19)$$

$$\text{Impedansi per unit} = \frac{\text{Impedansi sebenarnya, } \Omega}{\text{Impedansi dasar, } \Omega} \quad (2.20)$$

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):

$$Z_{\text{baru}} (\text{pu}) = Z_{\text{lama}} (\text{pu}) \left(\frac{\text{kV}_{\text{lama}} \text{ dasar}}{\text{kV}_{\text{baru}} \text{ dasar}} \right)^2 \times \left(\frac{\text{kVA}_{\text{baru}} \text{ dasar}}{\text{kVA}_{\text{lama}} \text{ dasar}} \right) \quad (2.21)$$

2.4.2 Perhitungan Impedansi Sumber

Jaringan distribusi yang dipasok dari tegangan tinggi dengan menggunakan transformator daya, untuk menentukan impedansi sumber maka harus diketahui MVA hubung singkat sisi tegangan tinggi. Dimana untuk mendapatkan nilai MVA hubung singkat terlebih dahulu harus diketahui nilai arus hubung singkat pada busbar sisi tegangan tinggi (busbar primer transformator daya) yang mewakili semua unit pembangkit beroperasi. MVA hubung singkat dapat ditentukan melalui persamaan:

$$\text{MVA}_{\text{hs}} = \sqrt{3} \times \text{kV}_{L-L} \times I_{\text{hs}} \quad (2.22)$$

Keterangan :

- I_{hs} : Arus hubung singkat (A)
- kV_{L-L} : Tegangan sisi primer transformator tenaga (kV)
- MVA : Data hubung singkat di bus 150 kV (MVA)

2.4.3 Impedansi Urutan Komponen

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

a. 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.

b. 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.

c. 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:

2.4.3.1 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 $Z_{1T} = Z_{2T}$ (2.23)

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, 2012):

1) Untuk transformator daya dengan hubungan belitan ΔY dimana kapasitas belitan delta sama besar dengan kapasitas belitan Y, maka $Z_{0T} = Z_{1T}$ (2.24)

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 $Z_{0T} = 3 \times Z_{1T}$ (2.25)

3) Untuk transformator daya dengan hubungan belitan YY dan tidak mempunyai belitan delta di dalamnya, maka Z_{0T} berkisar antara 9 sampai dengan $14 \times Z_{1T}$ (2.26)

2.4.3.2 Impedansi Urutan Penyulang

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

$$Z_{1\text{penyulang}} = Z_{2\text{penyulang}} = R_1 + jX_1 \text{ (ohm/km)} \times L \text{ (km)} \quad (2.27)$$

$$Z_{0\text{penyulang}} = R_0 + jX_0 \text{ (ohm/km)} \times L \text{ (km)} \quad (2.28)$$

Keterangan:

$Z_{1\text{penyulang}}$: Impedansi penyulang urutan positif (ohm).

$Z_{2\text{penyulang}}$: Impedansi penyulang urutan negatif (ohm).

$Z_{0\text{penyulang}}$: Impedansi penyulang urutan nol (ohm).

L : Panjang penyulang (km).

2.4.4 Perhitungan Impedansi Ekiwalen Jaringan

Perhitungan yang akan dilakukan di sini adalah perhitungan besarnya nilai impedansi ekiwalen positif ($Z_{1\text{eki}}$), negatif ($Z_{2\text{eki}}$), dan nol ($Z_{0\text{eki}}$) dari titik gangguan sampai ke sumber sesuai dengan urutan diatas. Karena dari sumber ke titik gangguan impedansi yang terbentuk adalah tersambung seri maka perhitungan $Z_{1\text{eki}}$ dan $Z_{2\text{eki}}$ dapat

langsung dengan cara menjumlahkan impedansi tersebut, sedangkan untuk perhitungan Z_0 eki dimulai dari titik gangguan sampai ke transformator tenaga yang netralnya ditanahkan. Tetapi, untuk menghitung impedansi Z_0 eki ini, harus diketahui dulu hubungan belitan transformatornya. Sehingga untuk impedansi ekivalen jaringan dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$Z_{1\text{total}} = Z_{2\text{total}} = Z_S + Z_{1T} + Z_{1\text{penyulang}} \quad (2.29)$$

$$Z_{0\text{total}} = Z_{0T} + 3.Z_n + Z_{0\text{penyulang}} \quad (2.30)$$

Keterangan :

$Z_{1\text{total}}$: Impedansi total urutan positif (pu).

$Z_{2\text{total}}$: Impedansi total urutan negatif (pu).

$Z_{0\text{total}}$: Impedansi total urutan nol (pu).

Z_{1T} : Impedansi transformator daya urutan positif (pu).

Z_{2T} : Impedansi transformator daya urutan negatif (pu).

Z_{0T} : Impedansi transformator daya urutan nol (pu).

Z_S : Impedansi sumber (pu).

$Z_{1\text{penyulang}}$: Impedansi penyulang urutan positif (pu).

$Z_{2\text{penyulang}}$: Impedansi penyulang urutan negatif (pu).

$Z_{0\text{penyulang}}$: Impedansi penyulang urutan nol (pu).

Z_n : Impedansi pengetanahan (pu).

2.5 Sistem Pengamanan Jaringan Distribusi 20 kV

Jaringan distribusi berfungsi untuk menyalurkan tenaga listrik kepihak konsumen/pelanggan. Karena fungsinya tersebut, maka keandalan menjadi sangat penting dan untuk itu jaringan distribusi perlu dilengkapi oleh alat pengamanan.

Pada dasarnya semua konstruksi jaringan distribusi tidak ada yang benar-benar aman dari gangguan yang datangnya dari dalam sistem itu sendiri maupun dari luar sistem. Gangguan tersebut merupakan potensi yang merugikan ditinjau dari beberapa hal, maka perlunya dipasang sistem proteksi yang berfungsi sebagai berikut:

Ada tiga fungsi sistem pengaman dalam jaringan distribusi, antara lain:

- Mencegah atau membatasi kerusakan pada jaringan beserta peralatannya dari akibat adanya gangguan listrik
- Menjaga keselamatan umum dari akibat gangguan listrik
- Meningkatkan kelangsungan pelayanan tenaga listrik kepada konsumen

Pada sistem distribusi 20 kV hal yang terpenting pada sistem proteksi selain alat proteksi itu sendiri, sistem pentanahan juga merupakan bagian yang tidak terpisahkan dalam sistem proteksi itu sendiri. Misalnya ada gangguan fasa yang bocor ke tanah, maka bila sistem pentanahan tidak sesuai dengan sistem distribusi yang diproteksi, maka alat proteksi tidak akan bekerja dengan benar, sehingga dapat merusak peralatan jaringan maupun membahayakan keselamatan manusia.

2.6. Rele Arus Lebih

Rele merupakan peralatan pengaman yang dipasang pada peralatan yang berfungsi untuk melindungi peralatan listrik dari gangguan yang mungkin terjadi. Tujuan dipasang rele pengaman adalah :

- Menghindari atau mengurangi kerusakan yang terjadi akibat gangguan pada alat yang dilalui arus gangguan.
- Menyelamatkan sistem atau bagian sistem lainnya yang tidak terganggu supaya tetap dapat bekerja terus, dengan cara melepaskan bagian sistem yang terganggu sedemikian rupa sehingga penyimpangan atau kesalahan akibat gangguan tersebut tidak memberikan akibat negatif yang lebih luas terhadap sistem keseluruhan yang ada.

Peralatan proteksi harus dirancang sedemikian rupa sehingga gangguan dapat dengan segera diputuskan atau dihilangkan. Suatu gangguan yang serius dapat menyebabkan pemutusan yang cepat dan dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan. Gangguan yang terjadi secara tidak langsung harus diketahui oleh operator sehingga peralatan dapat dioperasikan di luar daerah kritis. Kejadian-kejadian yang sangat berbahaya bagi operasi generator ataupun transformator adalah hubung singkat, gangguan ke tanah, penguatan kurang, arus lebih dan panas berlebihan.

Rele pengaman merupakan bentuk dasar dari peralatan listrik otomatis dan sangat perlu kerja dari sistem distribusi daya yang modern bahkan tergantung padanya. Bila

terjadi gangguan baik berupa arus, tegangan, frekuensi dan daya, rele pengaman akan mendeteksi dan memutuskan bagian yang mengalami gangguan dari sistem. Selanjutnya akan mengembalikan ke keadaan normal atau membangkitkan sinyal peringatan kepada operator.

Rele jenis ini adalah besarnya arus yang masuk ke dalam rele, atau rele arus lebih. Rele ini memberikan reaksi terhadap besarnya arus masukan, dan bekerja untuk memutuskan bilamana besarnya arus melebihi nilai tertentu yang dapat diatur. Rele arus lebih akan menutup kontak-kontaknya untuk menggerakkan rangkaian yang menyebabkan terjadinya saklar daya membuka atau menutup. Bila arus mencapai nilai yang sudah ditentukan terdahulu sedemikian rupa. Dengan begitu, maka pada rele arus lebih terdapat kepekaan terhadap besar arus yang mengalir.

Rele arus lebih dikategorikan menjadi tiga yaitu :

- Rele arus lebih waktu seketika
- Rele arus lebih waktu tertentu
- Rele arus lebih waktu terbalik

Rele arus lebih waktu seketika adalah rele yang bekerjanya tanpa penundaan waktu atau jangka waktu rele mulai saat rele arusnya *pick up* sampai selesai, sangat singkat (sekitar 20 milidetik sampai 100 milidetik).

Rele arus lebih waktu tertentu, yaitu suatu rele dengan jangka waktu mulai rele arus *pick up* sampai selesainya kerja rele diperpanjang dengan nilai atau waktu tertentu. Sehingga apabila arus yang mengalir telah melebihi arus setting maka rele akan bekerja sesuai dengan waktu penundaan yang telah ditetapkan.

Berdasarkan waktu tunda kerja, rele arus lebih waktu terbalik dapat dibedakan menjadi tiga, yakni (Sarimun, 2011) :

- Rele arus lebih waktu terbalik biasa.
- Rele arus lebih waktu sangat berbanding terbalik.
- Rele arus lebih waktu sangat berbanding terbalik sekali.

1. Prinsip kerja rele arus lebih

Rele arus lebih merupakan suatu jenis rele yang bekerja berdasarkan besarnya arus masukan, dan apabila besarnya arus masukan melebihi suatu

harga tertentu yang dapat diatur (I_p) maka rele arus lebih bekerja. Dimana I_p merupakan arus kerja yang dinyatakan menurut gulungan sekunder dari transformator arus (CT). bila suatu gangguan terjadi di dalam daerah perlindungan rele, besarnya arus gangguan I_f yang juga dinyatakan terhadap gulungan sekunder CT juga. Rele akan bekerja apabila memenuhi keadaan sebagai berikut (Sarimun, 2012) :

$I_f > I_p$ Rele bekerja (trip)

$I_f < I_p$ tidak bekerja (blok)

2. Dasar penyetelan rele arus lebih

Pada dasarnya rele arus lebih berfungsi sebagai pengaman gangguan hubung singkat, tetapi dalam beberapa hal dapat berfungsi sebagai pengaman beban lebih. Fungsi rele ini disamping sebagai pengaman utama untuk seksi yang diamankan juga berfungsi sebagai pengaman cadangan pada seseksi berikutnya. Hal ini apabila rele arus lebih dipakai pada sistem distribusi tegangan menengah. Namun untuk saluran transmisi tegangan tinggi rele arus lebih berfungsi sebagai pengaman cadangan (*backup*) (Anderson, 1998).

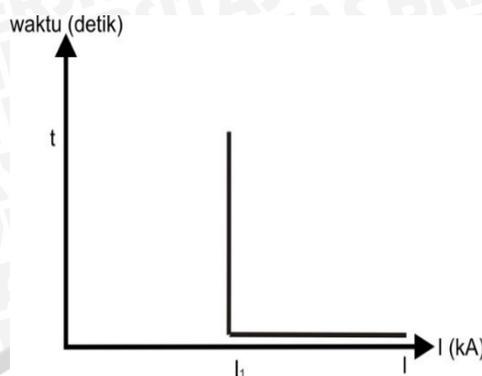
Untuk operasi yang selektif, apabila terdapat beberapa rele arus lebih pada suatu jaringan radial. Maka rele pada ujung yang terjauh dari sumber harus disetel untuk dapat bekerja pada waktu yang sesingkat mungkin.

2.7 Karakteristik Rele Arus Lebih

Berdasarkan karakteristik waktu rele arus lebih dibedakan atas 3 jenis, yaitu:

2.7.1 Rele Arus Lebih Waktu Seketika (Instan)

Rele arus lebih waktu seketika adalah jenis rele arus lebih yang paling sederhana dimana jangka waktu kerja rele yaitu mulai saat rele mengalami *pick up* sampai selesainya kerja rele sangat singkat, yaitu sekitar 20-100 milidetik tanpa adanya penundaan waktu (Ravindranath, 1976:51). Rele ini memiliki waktu kerja yang sangat cepat dibandingkan dengan rele lainnya. Pada setelan koordinasi proteksi di sistem distribusi tegangan menengah disebut setelan momen/instan/cepat (Sarimun, 2011). Karakteristik rele arus lebih waktu seketika, bekerjanya didasarkan pada besarnya arus gangguan hubung singkat yang dipilih, ditunjukkan pada gambar 2.8 di bawah ini.



Gambar 2.8 Karakteristik rele arus lebih waktu seketika

Sumber: Setiyo, tanpa tahun : 28

Penyetelan arus rele arus lebih waktu seketika (Instan)

Pada penerapannya, rele arus lebih waktu terbalik kurang efektif dalam mengamankan gangguan. Hal ini karena semakin dekat gangguan yang terjadi dengan sumber, maka arus gangguan yang mengalir akan semakin besar, namun waktu pemutusan gangguan tersebut terlalu lama. Sedangkan tingkat keamanan sistem proteksi dinilai dari seberapa cepat sistem proteksi dapat memutus gangguan. Oleh sebab itu, perlu ditambahkan bantuan rele arus lebih instan sehingga menghasilkan sistem proteksi yang lebih baik, karena rele arus lebih instan tanpa perlambatan waktu. Dalam aplikasinya di sistem pengamanan suatu jaringan tenaga listrik biasanya rele arus lebih waktu seketika dikombinasikan dengan rele arus lebih invers (Horowitz dan Phadke, 2008). Maka koordinasi antara satu dan seksi lainnya untuk mendapatkan selektifitas didasarkan tingkat beda arus (*current grading*). Penyetelan rele ini adalah :

a. Penyetelan Arus Pada Bagian Sekunder

Besarnya penyetelan arus pada bagian sekunder sebesar:

$$I_{\text{instan sekunder}} = \frac{I_{\text{instan}}}{I_{\text{set primer}}} \quad (2.31)$$

Keterangan :

$I_{\text{instan sekunder}}$: Penyetelan arus instan pada bagian sekunder (A).

$I_{\text{set primer}}$: Penyetelan arus pada bagian primer (A).

I_{instan} : Penyetelan arus instan (A).

Dengan penyetelan arus instan sebagai berikut:

- 1) Untuk penyetelan sisi penyulang, dengan arus maksimum adalah :
 - Trafo kapasitas 60 MVA maksimum $2,0 \times I_{n \text{ trafo}}$
 - Trafo kapasitas 50 MVA maksimum $2,2 \times I_{n \text{ trafo}}$
 - Trafo kapasitas 30 MVA maksimum $2,4 \times I_{n \text{ trafo}}$
 - Trafo kapasitas 20 MVA maksimum $2,6 \times I_{n \text{ trafo}}$
 - Trafo kapasitas 16 MVA maksimum $3,0 \times I_{n \text{ trafo}}$
 - Trafo kapasitas 10 MVA maksimum $3,2 \times I_{n \text{ trafo}}$
- 2) Untuk penyetelan sisi masukan 20 kV sebesar:

$$I_{\text{instan}} = 4 \times I_{n \text{ trafo}} \quad (2.33)$$

Keterangan :

$I_{n \text{ trafo}}$: Arus nominal transformator daya (A).

Untuk menghitung arus nominal transformator daya menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$I_{n \text{ trafo}} = \frac{\text{kVA}}{\sqrt{3} \times \text{kV}_{L-L}} \quad (2.34)$$

b. Penyetelan Arus Pada Bagian Primer

Besarnya penyetelan arus pada bagian primer sebesar:

$$I_{\text{instan primer}} = I_{\text{instan sekunder}} \times I_{\text{set primer}} \quad (2.35)$$

Keterangan :

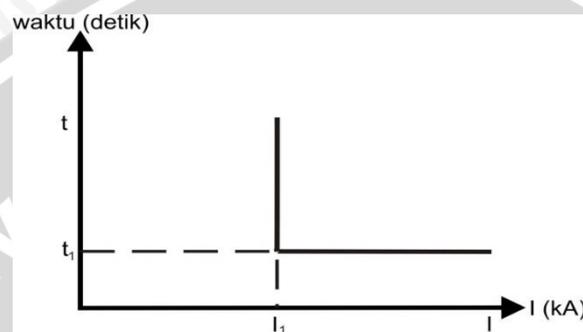
$I_{\text{instan primer}}$: Penyetelan arus instan pada bagian primer (Ampere).

Penyetelan waktu rele arus lebih waktu seketika (Instan)

Untuk penyetelan waktu rele arus lebih waktu seketika sisi penyulang berkisar antara 40 sampai dengan 100 milidetik, sedangkan untuk sisi masukan 20 kV penyetelan waktunya lebih besar dari penyetelan waktu sisi penyulang (Sarimun, 2012).

2.7.2 Rele Arus Lebih Waktu Tertentu (Definite)

Rele arus lebih waktu tertentu (definite) adalah jenis rele arus lebih dimana jangka waktu rele mulai *pick up* sampai selesainya kerja rele dapat diperpanjang dengan nilai tertentu dan tidak tergantung dari besarnya arus yang mengerjakannya (tergantung dari besarnya arus penyetelan, melebihi arus penyetelan maka waktu kerja rele ditentukan oleh waktu penyetelannya). Karakteristik rele arus lebih waktu tertentu ditunjukkan pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Karakteristik rele arus lebih waktu tertentu

Sumber: Setiyo, tanpa tahun : 29

2.7.3 Rele Arus Lebih Waktu Terbalik (Invers)

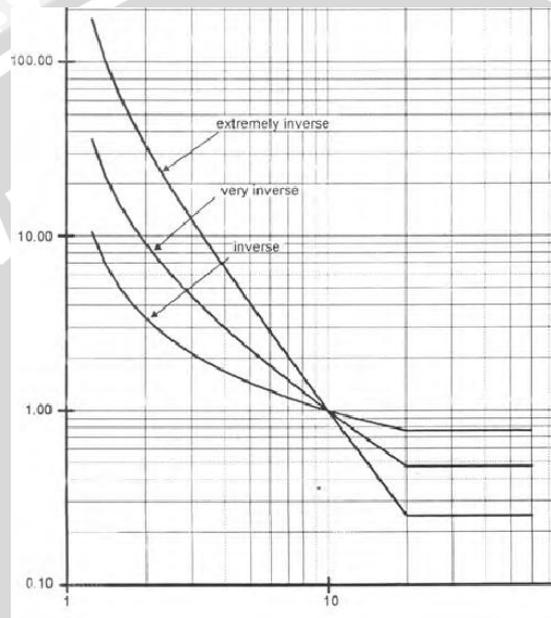
Rele arus lebih dengan karakteristik waktu arus waktu terbalik adalah jenis rele arus lebih dimana jangka waktu rele mulai *pick up* sampai dengan selesainya kerja rele tergantung dari besarnya arus yang melewati kumparan relenya, maksudnya rele tersebut mempunyai sifat terbalik untuk nilai arus dan waktu bekerjanya.

Karakteristik rele arus lebih waktu terbalik ini dijelaskan dalam standard IEC 60255-3 dan BS 142. Standard-standard ini mendefinisikan beberapa jenis perlindungan waktu terbalik yang dibedakan oleh gradien kurvanya, yaitu *standart inverse*, *very inverse* dan *extremely inverse* (Prévé, 2006). Standar lain, misalnya standar IEEE juga memberikan karakteristik kurva yang lain, seperti *standart inverse*, *very inverse* dan *extremely inverse*.

Adapun karakteristik rele arus lebih waktu terbalik berdasarkan standard IEC 60255-3 dan B.S. 142, 1966 dapat dilihat pada gambar 2.10 di bawah ini, dimana dalam gambar tersebut menunjukkan besarnya arus gangguan dan waktu unjuk kerja yang biasanya disebut *time dial*. Semakin besar *time dial* maka semakin lama pula waktu operasi rele ini.

Karakteristik kerja dari rele arus lebih waktu terbalik ini dapat dibedakan dalam tiga kelompok waktu berdasarkan tingkat kecuraman perbandingan antara waktu kerja rele dengan nilai arus yang terdeteksi oleh rele arus lebih waktu terbalik, yaitu :

- a) *Standard Inverse*
- b) *Very Inverse*
- c) *Extremely Inverse*



Gambar 2.10 Karakteristik rele arus lebih waktu terbalik

Sumber: (Davies, 2006)

Penyetelan arus rele arus lebih waktu terbalik (Invers)

Untuk penyetelan arus dari rele arus lebih waktu terbalik dihitung berdasarkan arus beban yang mengalir dipenyulang atau masukan 20 kV, artinya (Sarimun, 2012) :

- Rele arus lebih yang terpasang di penyulang, dihitung berdasarkan arus beban maksimum (beban puncak) yang mengalir di penyulang tersebut.
- Rele arus lebih yang terpasang dimasukan 20 kV, dihitung berdasarkan arus nominal transformator daya.

a. Penyetelan Arus Primer Rele Arus Lebih Waktu Terbalik

Sesuai *British Standart* untuk rele arus lebih waktu terbalik biasa diset sebesar:

$$I_{\text{set primer}} = 1,05 \text{ s/d } 1,3 \times I_{\text{beban}} (A) \quad (2.36)$$

Keterangan :

$I_{\text{set primer}}$: Penyetelan arus pada bagian primer (A).

Nilai penyetelan primer rele arus lebih waktu terbalik akan digunakan untuk menghitung waktu bekerja rele arus lebih apabila terjadi gangguan pada saluran dan mengaktifkan CB.

b. Penyetelan Arus Sekunder Rele Arus Lebih Waktu Terbalik

Untuk mendapatkan nilai penyetelan sekunder yang diaturkan pada rele arus lebih, maka harus dihitung dengan menggunakan ratio transformator arus (CT) yang terpasang pada sisi masukan maupun sisi penyulang 20 kV. Sehingga persamaannya adalah (Ravindranath, 1976:177) :

$$I_{\text{set sekunder}} = I_{\text{set primer}} \times \frac{1}{n_{CT}} (A) \quad (2.37)$$

Keterangan :

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

n_{CT} : Angka transformasi pada transformator arus.

Penyetelan waktu rele arus lebih waktu terbalik (Invers)

Penyetelan waktu rele arus lebih waktu terbalik dihitung menggunakan rumus kurva waktu dengan arus adalah seperti persamaan berikut (IEC 60255-3 dan B.S.142, 1966):

$$t = \frac{\beta}{\left[\left(\frac{I_f}{I_{\text{set}}} \right)^\alpha - 1 \right]} \times \text{TMS (detik)} \quad (2.38)$$

Nilai TMS pada rele arus lebih waktu terbalik dapat dicari dengan menggunakan persamaan :

$$\text{TMS} = \frac{\left[\left(\frac{I_f}{I_{\text{set}}} \right)^\alpha - 1 \right]}{\beta} \times t \quad (2.39)$$

Keterangan :

- t : Waktu beroperasinya rele (detik).
 TMS : *Time Multiple Setting*. Nilai ini yang diaturkan ke rele sebagai konstanta (tanpa satuan).
 I_f : Arus gangguan hubung singkat (A), pada sistem distribusi tenaga listrik. Penyetelan rele arus lebih, I_f diambil arus gangguan tiga fasa terkecil atau terjauh dari sumber.
 I_{set} : Arus penyetelan yang dimasukkan ke rele (A).

Tabel 2.1 Koefisien *Time Dial*

Jenis Kurva	β	α
<i>Standart Inverse</i>	0,14	0,02
<i>Very Inverse</i>	13,5	1
<i>Extremely Inverse</i>	80	2

Sumber : Penulis

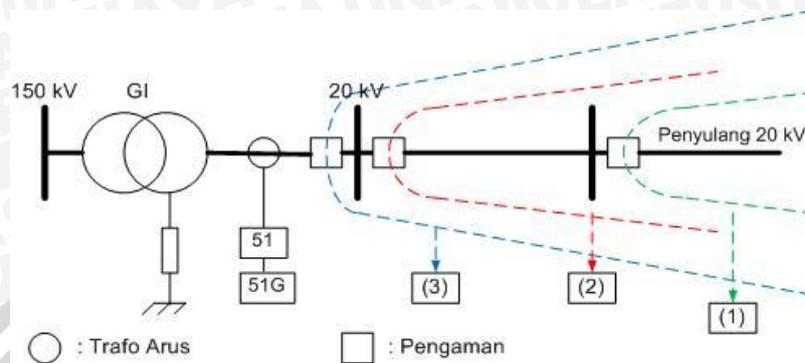
2.8 Daerah Pengamanan

Untuk memperoleh tingkat selektifitas yang tinggi, dimana hanya bagian sistem yang terganggu saja yang diisolasi (mengalami pemutusan), maka pada sistem proteksi dibentuk daerah-daerah pengamanan. Daerah pengamanan akan memberikan suatu pengertian mengenai batas daerah bagi sistem pengamanan. Sehingga suatu sistem pengamanan akan memberikan respon terhadap gangguan yang terjadi didaerahnya dan memberikan perlindungan terhadap gangguan tersebut.

Daerah pengamanan distribusi dapat dilihat pada gambar 2.11 di bawah ini, dimana dalam gambar tersebut merupakan suatu sistem tegangan menengah yang terdiri dari satu transformator, satu saluran distribusi dan tiga buah busbar yang digambarkan dalam diagram segaris. Garis terputus-putus tersebut menunjukkan pembagian sistem tenaga listrik ke dalam tiga daerah pengamanan.

Batas setiap daerah menentukan bagian sistem tegangan menengah sehingga untuk gangguan yang terjadi di dalam daerah tersebut, sistem pengamanan yang bertanggung jawab akan bertindak untuk memisahkan semua gangguan yang berada dalam daerah itu. Karena

pemisahan dalam keadaan terganggu dilakukan oleh pemutus rangkaian, maka pada setiap titik hubungan antara peralatan di dalam daerah pengaman satu dengan bagian lainnya dari sistem harus menyisipkan pemutus rangkaian. Dengan kata lain, pemutus rangkaian membantu menentukan batas daerah pengaman.



Gambar 2.11 Daerah pengaman distribusi

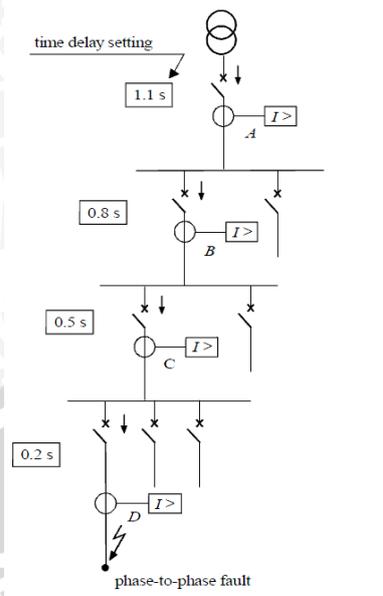
Sumber: Sarimun, W., 2012

Pada gambar 2.11 pengaman distribusi tenaga listrik sistem tegangan menengah terbagi sebagai berikut :

1. Daerah pengaman listrik mempergunakan *Recloser*, *Fuse Cut Out* atau SSO.
2. Daerah pengaman listrik lokasi di sumber listrik Gardu Induk atau pusat listrik mempergunakan rele arus lebih dan rele gangguan tanah (keluaran penyulang).
3. Daerah pengaman listrik di sumber listrik Gardu Induk atau pusat listrik mempergunakan rele arus lebih dan rele gangguan tanah (masukan penyulang).

2.9 Koordinasi Arus dan Waktu Pada Rele Arus Lebih

Dalam suatu sistem kelistrikan terdapat susunan rele pengaman yang terdiri dari rele pengaman utama dan rele pengaman *back up*. Antara rele pengaman utama dengan rele pengaman *back up* ini harus dikoordinasikan agar menghasilkan sistem proteksi yang sempurna. Adapun koordinasi ini dilakukan pada setelan *pick up* dan *time delay* dari rele tersebut. Salah satu contoh koordinasi rele pengaman dapat dilihat pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 Koordinasi setelan arus dan waktu

Sumber : (Prévé,2006)

Untuk memberikan koordinasi yang baik, setelan *pick up* rele-rele tersebut harus memenuhi syarat berikut :

$$I_{\text{set A}} > I_{\text{set B}} > I_{\text{set C}} > I_{\text{set D}}$$

Pada aplikasi praktis,, terdapat selisih waktu antara peralatan proteksi, dikenal adanya penyetelan kelambatan waktu (Δt) atau *grading time*.

2.10 Koordinasi Peralatan Proteksi Menurut Standar PLN

Pengaturan koordinasi peralatan proteksi sejatinya telah diatur di dalam beberapa standar. Untuk di Indonesia, standar yang sering digunakan adalah standar PLN (SPLN). SPLN yang mengatur tentang koordinasi proteksi pada jaringan distribusi adalah SPLN 52-3 : 1983, Pola Pengamanan Sistem, Bagian Tiga : Sistem Distribusi 6 kV dan 20 kV.

2.11 Pengaruh Pembangkit Tersebar Pada Sistem Proteksi

Sistem proteksi arus lebih konvensional pada penyulang selama ini berdasar pada skema radial dari jaringan distribusi. Jaringan radial memiliki karakter berupa letak sumber pada sisi hulu dan beban atau gardu induk pada sisi hilir. Aliran arus gangguan berasal dari satu sumber, dan memiliki arah dari titik sumber ke titik gangguan.

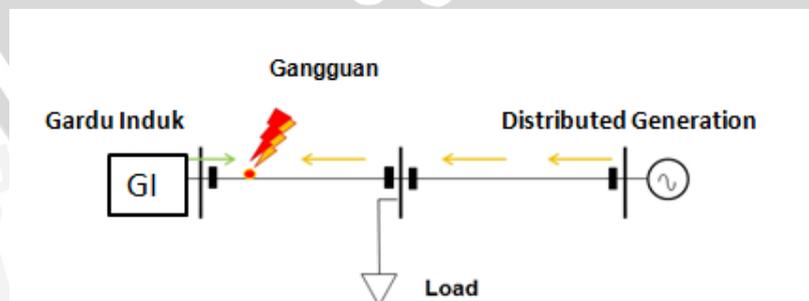
Pada jaringan radial, selektivitas proteksi gangguan berasal dari koordinasi waktu dan arus dari rele arus lebih. Koordinasi berdasarkan fakta pada sistem radial, yaitu rele yang paling dekat dengan gangguan akan merasakan arus gangguan terbesar daripada rele yang lain. Pada gangguan tertentu, semua rele yang terhubung dalam jaringan radial akan merasakan arus gangguan, tetapi setiap rele diatur untuk beroperasi pada waktu yang berbeda-beda, dengan memilih karakteristik arus dan waktu yang berbeda pada saat dilakukan penyetingan rele.

Pembangkit tersebar umumnya berupa sistem energi terbarukan atau sistem energi berkarbon rendah yang berskala kecil menengah, yang terletak di dekat pusat beban. Berbagai macam keuntungan dari pembangkit tersebar telah didiskusikan dalam literatur riset, seperti menyuplai beban pada area yang terpencil dan tanpa akses jaringan listrik, menambah fasilitas pembangkit, membangkitkan energi bersih, mengurangi rugi transmisi, meremajakan fasilitas infrastruktur dan memberikan dukungan tambahan seperti tegangan, kualitas daya, keandalan, dan lain-lain.

Menambahkan pembangkit tersebar ke sebuah jaringan radial akan memberikan pengaruh pada jaringan tersebut, yaitu akan mempengaruhi distribusi arus gangguan. Oleh sebab itu, penambahan pembangkit tersebar ini akan mempengaruhi operasi dan koordinasi dari peralatan proteksi dan *Recloser*.

Beberapa akibat penambahan pembangkit tersebar yang tercatat adalah :

- Adanya aliran daya balik dari pembangkit tersebar, menuju gangguan di hulu pada sisi sumber. Sementara seharusnya aliran daya normal mengalir menuju beban di area lokal pembangkit tersebar.



Gambar 2.13 Aliran daya balik saat gangguan pada sistem tenaga listrik akibat penambahan pembangkit tersebar

Sumber : Penulis

- b) Kesalahan pemutusan daya pada penyulang yang normal karena gangguan, yang diakibatkan penambahan pembangkit tersebar pada jaringan tersebut.
- c) Gangguan pada pemutusan daya penyulang yang diakibatkan karena *transien* atau arus *inrush* dari komponen elektrikal sistem pembangkit tersebar.
- d) Hilangnya koordinasi dari peralatan proteksi arus lebih seperti koordinasi *fuse-fuse*, koordinasi *fuse-rele* dan koordinasi *rele-rele* yang diakibatkan karena penempatan pembangkit tersebar dalam jaringan distribusi radial.

2.12 Pembangkit Tersebar Mikrohidro

Pembangkit tersebar mikrohidro adalah pembangkit listrik skala kecil yang menggunakan energi air sebagai penggerakannya, misalnya saluran irigasi, sungai, atau air terjun dengan cara memanfaatkan tinggi terjunnya (*head*) dan jumlah debit airnya yang terhubung dengan jaringan distribusi 20 kV. Kondisi energi air yang dimanfaatkan sebagai sumber daya penghasil listrik memiliki kapasitas aliran maupun ketinggian tertentu. Semakin besar kapasitas aliran maupun ketinggiannya maka semakin besar energi yang dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik. Pembangkit listrik tenaga mikrohidro bekerja dengan cara memanfaatkan semaksimal mungkin energi potensial air. Energi ini secara perlahan diubah menjadi energi mekanik untuk memutar sudut-sudut turbin. Energi mekanis dari putaran turbin akhirnya diubah menjadi energi listrik melalui putaran generator (repository.usu.ac.id,8/5/2014).

Untuk menghitung daya mekanik yang dibangkitkan oleh turbin adalah (Utomo, 2010) :

$$P = 9,8 \eta H Q \quad (2.40)$$

Keterangan :

P = daya terbangkit (kW)

H = tinggi terjun air (m)

Q = debit air (m³/detik)

η = efisiensi turbin generator

2.13 Transformator Daya Pada Pembangkit Tersebar Mikrohidro

Generator sinkron tiga fasa pada PLTMH Desa Bendosari menghasilkan tegangan 220 V/380 V . Generator sinkron ini akan dihubungkan dengan jaringan distribusi 20 kV.

Hal ini membutuhkan transformator tiga fasa agar generator sinkron dapat terhubung dengan jaringan distribusi 20 kV penyulang Pujon. Tabel 2.2 di bawah ini merupakan data dari transformator tiga fasa yang akan dipasangkan untuk menghubungkan PLTMH Desa Bendosari dan penyulang Pujon.

Tabel 2.2 Data Transformator PLTMH Desa Bendosari

Tegangan	380 V/20 kV
Daya	25 kVA
Impedansi	10 %
Tahanan Pentanahan	5 Ω
Hubungan	Y- Δ

Sumber : Penulis

Peralatan pengaman pada transformator PLTMH :

1) Pengaman lebur (Fuse Cut Out)

Pengaman lebur adalah peralatan proteksi yang bekerja apabila terjadi gangguan arus lebih. Alat ini akan memutuskan rangkaian listrik yang satu dengan yang lain apabila dilewati arus yang melewati kapasitas kerjanya. Fungsi peralatan pelindung arus lebih pada suatu sistem jaringan adalah mendeteksi gangguan dalam rangkaian dan memutuskan arus lebih pada harga rating pemutusannya. Pengaman lebur digunakan sebagai pengaman dan pemisah daerah yang terkena gangguan agar daerah pemadaman tidak terlalu luas. Namun ada kelemahan pengaman jenis ini yaitu penggunaannya terbatas pada penyaluran daya yang kecil saerta tidak dilengkapi dengan alat peredam busur api yang timbul pada saat terjadi gangguan hubung singkat.

2) NH Fuse

NH Fuse adalah pengaman trafo terhadap arus lebih yang terpasang di sisi tegangan rendah 220 V disebabkan karena hubung singkat di jaringan tegangan rendah maupun karena beban lebih. NH Fuse umumnya dipasang pada panel hubung bagi transformator yang berfungsi sebagai pemutus atau pengaman terhadap arus lebih.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Untuk menyelesaikan rumusan masalah dan merealisasikan tujuan penelitian, maka diperlukan metodologi untuk menyelesaikan masalah tersebut.

3.1 Studi Literatur

Studi literatur yang dilakukan adalah untuk mempelajari dan memahami konsep yang terkait dengan masalah analisis impedansi urutan sistem, perhitungan arus hubung singkat, dan pengaturan rele arus lebih. Besar perhitungan arus hubung singkat tiga fasa, satu fasa ke tanah, antar fasa, dan dua fasa ke tanah berpengaruh terhadap setelan rele arus lebih.

3.2 Pengambilan Data

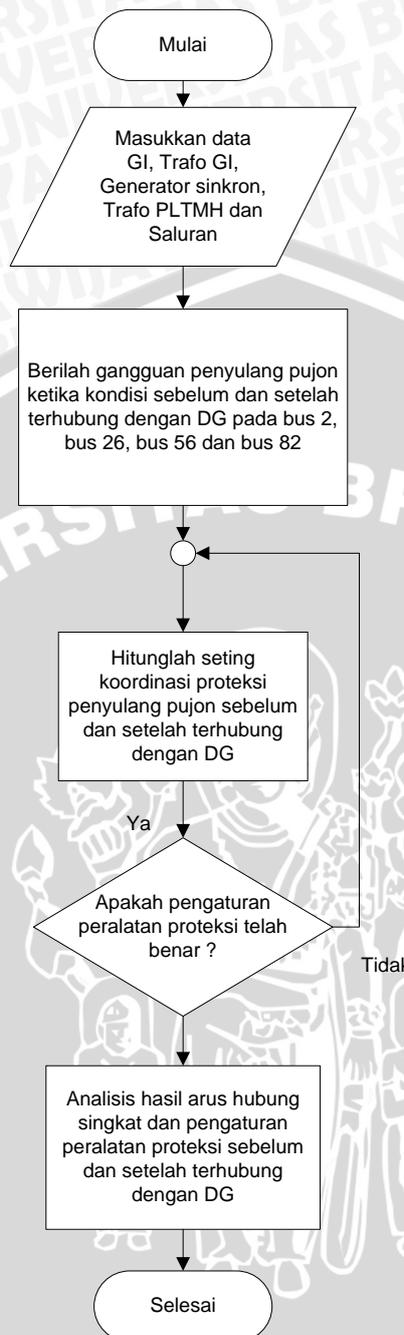
Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder yang berasal dari buku referensi, jurnal, dan penelitian yang relevan dengan pembahasan skripsi ini. Data tersebut meliputi :

- a) Gambar *single line diagram*.
- b) Spesifikasi peralatan (generator, transformator dan kabel).
- c) Saluran dan beban.
- d) Daya pembangkit tersebar.
- e) Data peralatan proteksi.

3.3 Pemodelan dan Simulasi

Setelah mendapatkan data-data dan setelan rele arus lebih maka dilakukan perhitungan arus hubung singkat dan penyetelan waktu rele arus lebih. Dalam penelitian ini dilakukan permodelan sistem distribusi 20 kV pada penyulang Pujon dalam bentuk *single line diagram*.

3.4 Diagram Alir Metode Penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir metode penelitian

3.5 Pengambilan Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan diambil berdasarkan analisis perhitungan sistem proteksi dengan metode dan tinjauan pustaka yang digunakan serta pembahasan yang mengacu pada rumusan masalah. Setelah kesimpulan diambil maka saran akan digunakan untuk memperbaiki penelitian dan skripsi ini untuk perbaikan dan pengembangan selanjutnya.

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Gardu Induk Sengkaling

Gardu Induk (GI) Sengkaling adalah salah satu dari 16 GI yang ada di wilayah Unit Pelayanan Transmisi Malang. Gardu Induk Sengkaling memiliki 4 buah transformator yang menerima suplai tegangan 150 kV. Transformator I dan transformator II berfungsi untuk menurunkan tegangan dari 150 kV menjadi 70 kV, dan dua transformator lainnya, yaitu transformator III dan transformator IV berfungsi untuk menurunkan tegangan 150 kV menjadi 20 kV. Dari transformator III dan IV disalurkan ke penyulang-penyulang, kemudian transformator distribusi yang ada di penyulang-penyulang tersebut menurunkan tegangan dari 20 kV menjadi 380/220 V sesuai dengan kebutuhan dari konsumen. Diagram satu garis penyulang Pujon ditunjukkan pada lampiran 1.

Pengaturan beban Gardu Induk Sengkaling adalah sebagai berikut :

- a. Transformator III dengan kapasitas 30 MVA menyalurkan energi ke penyulang Pujon, Pujon, Karang Ploso dan Wastra Indah.
- b. Transformator IV dengan kapasitas 60 MVA menyalurkan energi ke penyulang Batu, Dinoyo, Seleкта dan Tegal Gondo.

Tabel 4.1 Data Transformator Daya III Gardu Induk Sengkaling Malang

Merk	UNINDO
Tipe	TTUB 150/30000
Daya	30 MVA
Impedansi	12,5%
Tegangan	150/20 Kv
Tahanan Pentanahan	500 ohm
Hub. Belitan	Ynyn0 (dl)

Sumber: PT. PLN (Persero) APP Malang, 2010

4.2 Sistem Distribusi Daya

Sistem distribusi pada penyulang Pujon adalah sistem distribusi tipe radial tegangan 20 kV dengan panjang saluran 59,64 km. Pada bab 2 telah dijelaskan bahwa keuntungan saluran distribusi tipe radial adalah tipe ini tidak rumit dan lebih murah dibanding dengan sistem yang lain. Namun, keandalan sistem ini lebih rendah dibanding dengan sistem lainnya. Kurangnya keandalan disebabkan karena hanya terdapat satu jalur utama yang menyuplai gardu distribusi, sehingga apabila jalur utama tersebut mengalami gangguan, maka seluruh gardu akan ikut padam. Kerugian lain yaitu mutu tegangan pada gardu

distribusi yang paling ujung kurang baik, hal ini dikarenakan jatuh tegangan terbesar ada diujung saluran. Besarnya jatuh tegangan di ujung saluran itulah sehingga perlu dilakukan penyambungan DG untuk memperbaiki level tegangan di ujung saluran. Terdapat beberapa data yang diperlukan pada penelitian ini untuk mensimulasikan saluran distribusi diantaranya data generator, data saluran, dan data pembebanan transformator.

4.2.1 Data Gardu Induk

Pada GI Sengkaling MVA hubung singkat diperoleh dari jaringan distribusi yang dipasang dari tegangan tinggi dengan menggunakan transformator daya 3. Pada tabel 4.1 diketahui besar tegangan dasar, yaitu 20 kV sedangkan untuk MVA hubung singkat terlebih dahulu harus diketahui nilai arus hubung singkat pada busbar sisi tegangan tinggi yang mewakili semua unit pembangkit beroperasi, menurut data sekunder yang ditunjukkan pada tabel di lampiran 2, nilai arus hubung singkat pada busbar sisi tegangan tinggi 150 kV yang menjadi suplai Gardu Induk Sengkaling Malang sebesar 9,73581 kA. Dengan menggunakan persamaan (2.22) didapat nilai MVA hubung singkat sebagai berikut:

$$\begin{aligned} MVA_{hs} &= \sqrt{3} \times 150 \text{ kV} \times 9,73581 \text{ kA} \\ &= 2529,44 \text{ MVA} \end{aligned}$$

4.2.2 Data Saluran

Saluran distribusi penyulang Pujon memiliki total panjang 59,654 kilometer. Data kode saluran dan panjang saluran didapatkan dari *software* ArcGis berdasarkan koordinat yang telah diberikan oleh instansi terkait yaitu PT.PLN (persero). Jenis kabel yang digunakan dapat dilihat pada lampiran 3.

Tabel 4.2 Data Saluran penyulang Pujon

Dari	Ke	Kode Saluran	Jarak Saluran (km)
G1	BUS-1	M104	7,112
BUS-1	BUS-2	M104	0,026
BUS-1	BUS-4	M103	0,513
BUS-2	BUS-3	M104	0,03
BUS-4	BUS-5	M104	0,43
BUS-4	BUS-6	M103	0,604
BUS-6	BUS-7	M104	0,304
BUS-6	BUS-8	M103	0,513

Dari	Ke	Kode Saluran	Jarak Saluran (km)
BUS-8	BUS-9	M103	0,733
BUS-9	BUS-10	M107	0,11
BUS-9	BUS-12	M104	0,183
BUS-9	BUS-17	M103	0,507
BUS-10	BUS-11	M106	0,097
BUS-10	BUS-14	M107	0,616
BUS-12	BUS-13	M104	0,234
BUS-14	BUS-15	M107	0,553
BUS-15	BUS-16	M107	0,774
BUS-17	BUS-18	M103	0,138
BUS-18	BUS-19	M103	0,067
BUS-18	BUS-20	M104	0,936
BUS-19	BUS-21	M104	0,305
BUS-19	BUS-27	M104	0,708
BUS-20	BUS-30	M104	0,581
BUS-20	BUS-32	M104	0,048
BUS-21	BUS-22	M104	0,038
BUS-22	BUS-23	M104	0,133
BUS-22	BUS-24	M104	0,623
BUS-24	BUS-25	M104	0,233
BUS-25	BUS-26	M104	0,252
BUS-27	BUS-29	M104	0,295
BUS-30	BUS-31	M104	0,101
BUS-32	BUS-33	M107	0,308
BUS-32	BUS-35	M104	0,951
BUS-33	BUS-34	M107	0,066
BUS-35	BUS-36	M107	0,145
BUS-35	BUS-37	M104	0,047
BUS-37	BUS-38	M104	0,044
BUS-37	BUS-39	M104	0,434
BUS-39	BUS-40	M104	0,395
BUS-39	BUS-42	M104	0,1
BUS-40	BUS-41	M104	0,039
BUS-42	BUS-43	M104	0,767
BUS-42	BUS-66	M104	0,198
BUS-43	BUS-44	M104	0,341
BUS-44	BUS-45	M104	0,947
BUS-45	BUS-46	M104	0,571
BUS-46	BUS-47	M104	0,03
BUS-47	BUS-48	M104	0,448
BUS-47	BUS-49	M104	0,4

Dari	Ke	Kode Saluran	Jarak Saluran (km)
BUS-49	BUS-50	M104	0,806
BUS-49	BUS-51	M104	0,076
BUS-51	BUS-52	M104	0,128
BUS-51	BUS-54	M104	0,498
BUS-54	BUS-55	M104	0,468
BUS-52	BUS-53	M104	0,047
BUS-55	BUS-56	M104	1,689
BUS-56	BUS-57	M104	1,085
BUS-57	BUS-58	M104	1,163
BUS-58	BUS-59	M102	0,527
BUS-58	BUS-62	M104	0,909
BUS-59	BUS-60	M102	0,294
BUS-60	BUS-61	M102	0,145
BUS-62	BUS-63	M104	1,405
BUS-63	BUS-64	M104	1,205
BUS-64	BUS-65	M104	0,769
BUS-66	BUS-67	M104	0,7
BUS-66	BUS-73	M104	0,238
BUS-67	BUS-68	M104	0,912
BUS-68	BUS-69	M104	0,684
BUS-69	BUS-72	M104	2,203
BUS-70	BUS-71	M104	0,052
BUS-73	BUS-74	M104	0,949
BUS-74	BUS-75	M104	0,618
BUS-75	BUS-76	M104	0,059
BUS-76	BUS-77	M107	0,286
BUS-76	BUS-79	M104	0,204
BUS-77	BUS-78	M107	0,024
BUS-79	BUS-80	M104	0,247
BUS-80	BUS-81	M107	1,56
BUS-80	BUS-93	M104	0,057
BUS-81	BUS-82	M107	0,39

Sumber : Penulis

4.2.3 Data Transformator Distribusi

Saluran distribusi penyulang Pujon memiliki 67 transformator dengan berbagai jenis beban, diantaranya adalah beban industri, beban perumahan, dan juga beban komersil. Data pembebanan transformator pada penyulang Pujon ditunjukkan dalam Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Data pembebanan transformator pada penyulang Pujon

No	No Gardu	Daya Trafo (kVA)	Pembebanan Trafo (kVA)	
			Max	Min
1	D0031	75	23,2	10,8
2	D0126	150	116,2	21,7
3	D0189	160	76,6	23,1
4	D0180	100	32,7	14,4
5	D0032	200	92	28,9
6	D0009	250	196,036	36,1
7	D0046	200	132,9	28,9
8	D0119	150	150	73,1
9	D0078	160	109,5	23,1
10	D0025	75	27,6	10,8
11	D0129	160	84,8	23,1

12	D0099	100	66,776	14,4
13	D0200	50	24,7	7,2
14	D0201	100	14,4	1,8
15	D0202	100	55,9	14,4
16	D0030	160	59,123	23,1
17	D0174	160	101,5	23,1
18	D0175	100	14,5	14,4
19	D0016	200	108,3	28,9
20	D0168	25	4,3	3,6
21	D0206	200	70,8	28,9
22	D0212	50	35,3	7,2
23	D0057	150	100,8	21,7
24	D0153	160	78,7	23,1

25	D0059	160	76	23,1
26	D0087	100	23,2	14,4
27	D0266	200	54,8	28,9
28	D0088	100	5,025	20,1
29	D0124	50	27,5	7,2
30	D0089	160	98,2	23,1
31	D0101	100	46,5	14,4
32	D0102	160	96,9	23,1
33	D0103	100	40,1	14,4
34	D0167	50	15,5	7,2
35	D0104	100	56,6	14,4
36	D0166	50	25,8	7,2
37	D0213	100	45,3	14,4

38	D0058	100	60,1	14,4
39	D0060	160	116,043	23,25
40	D0217	50	28,575	7,2
41	D0036	75	44,7	10,8
42	D0145	160	96,8	23,3
43	D0019	160	113,4	23,15
44	D0198	160	116,556	23,1
45	D0123	150	124,1	21,7
46	D0098	160	92,925	23,1
47	D0236	160	81,2	23,1
48	D0079	200	148,6	28,9
49	D0094	150	71,8	23,694
50	D0216	50	30,7	7,2

51	D0094	100	59,5	14,4
52	D0216	160	79,8	23,1
53	D0195	160	47,458	23,15
54	D0061	160	105,2	23,1
55	D0064	100	52,3	14,4
56	D0147	50	38,8	7,2
57	D0196	50	20,5	7,2
58	D0063	100	52,9	14,4
59	D0065	160	108,9	23,1
60	D0066	100	58,9	14,4
61	D0219	100	52,2	14,4
62	D0076	75	41,33	10,8
63	D0077	160	103,8	23,1

64	D0197	25	17,7	3,6
65	D0262	100	38,027	12,55
66	D0033	250	153,219	50,562
67	D0265	100	73,928	24,39

Sumber : Penulis

4.3 Pembangkit Tersebar Mikrohidro

Lokasi penelitian mikrohidro berada di Desa Bendosari Kecamatan Pujon yang telah dibangun oleh Universitas Brawijaya. Penelitian ini menggunakan generator sinkron dengan spesifikasi ditunjukkan dalam Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Spesifikasi Generator

<i>Synchronous Generator</i>	<i>Three phase</i>
	380/220 V
	50 Hz
	1500 rpm
	15 kVA
	p.f 0,85 - 0,9

Sumber : Nameplate

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai daya elektrik generator adalah 8,7 kW, dengan *power factor* sebesar 0,9 maka nilai daya reaktif dapat diketahui dengan persamaan:

$$S = \frac{P}{\cos \theta}$$

$$= \frac{8700}{0,9}$$

$$S = 9.666,67 \text{ VA}$$

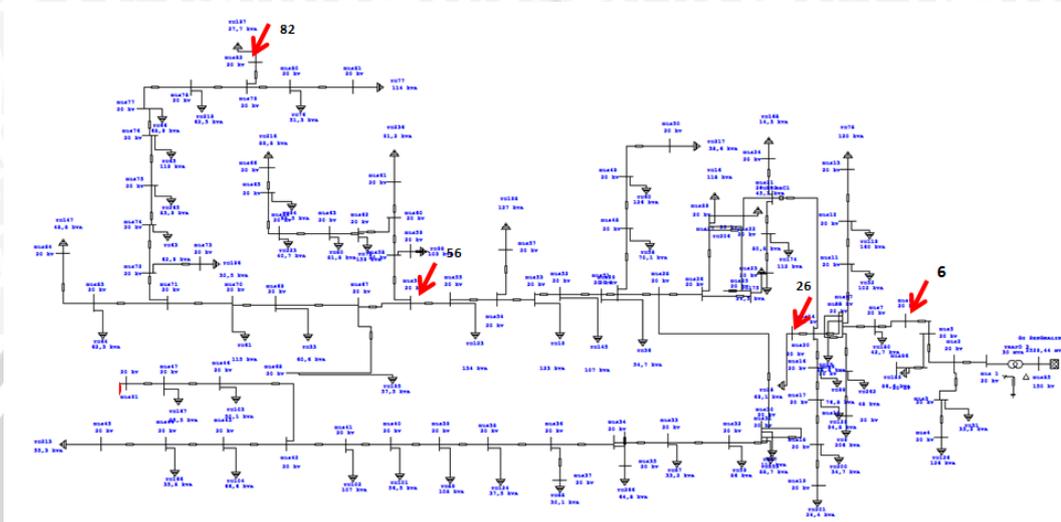
$$Q = \sqrt{s^2 - p^2}$$

$$= \sqrt{(9666,67)^2 - (8700)^2}$$

$$= 4.213,61 \text{ VAR}$$

4.3 Simulasi Gangguan Hubung Singkat Penyulang Pujon Pada ETAP

4.3.1 Tanpa PLTMH



Gambar 4.1 Penyulang Pujon dan lokasi pemberian gangguan pada ETAP 7.0

Sumber : Penulis

Pada Gambar 4.1 menunjukkan penyulang Pujon pada simulasi etap 7.0. Tanda panah merah merupakan lokasi pemberian gangguan tiga fasa, dua fasa, dua fasa ke tanah dan satu fasa ke tanah yaitu meliputi bus 6, bus 26, bus 56 dan bus 82. Bus-bus ini dipilih karena panjang mewakili panjang saluran penyulang Pujon dari GI sampai ujung saluran. Bus 2 memiliki panjang 25 % dari panjang saluran, bus 26 memiliki panjang 50 % dari panjang saluran, bus 56 memiliki panjang 75 % dari panjang saluran dan bus 82 memiliki panjang 100 % dari panjang saluran.

Tabel 4.3 Arus gangguan hubung singkat tanpa PLTMH

Lokasi Gangguan	Arus Gangguan Hubung Singkat			
	3 fasa (A)	2 fasa (A)	2 fasa ke tanah (A)	1 fasa ke tanah (A)
Bus 6	2076	1798	1814	82
Bus 26	1480	1282	1296	81
Bus 56	1259	1090	1104	80
Bus 82	903	782	795	78

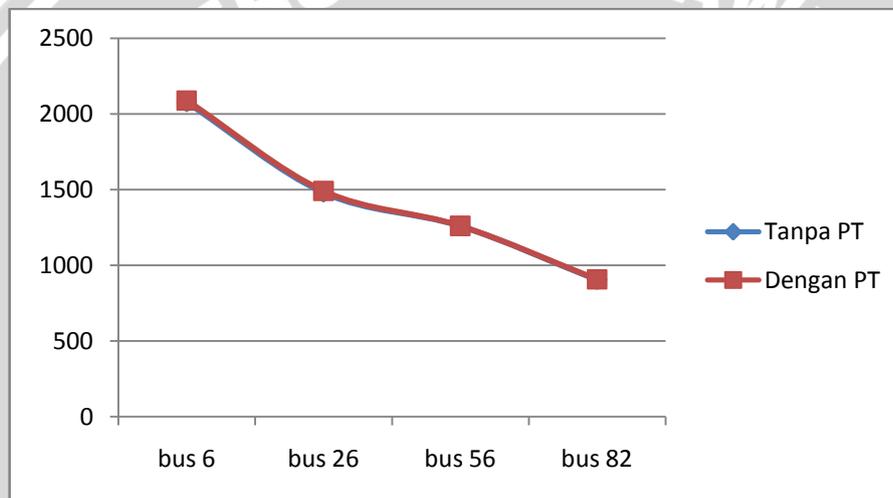
Sumber : Penulis

Tabel 4.4 Arus gangguan hubung singkat dengan PLTMH

Lokasi Gangguan	Arus Gangguan Hubung Singkat			
	3 fasa (A)	2 fasa (A)	2 fasa ke tanah (A)	1 fasa ke tanah (A)
Bus 6	2087	1808	1821	104
Bus 26	1490	1291	1302	103
Bus 56	1260	1097	1107	101
Bus 82	907	786	797	97

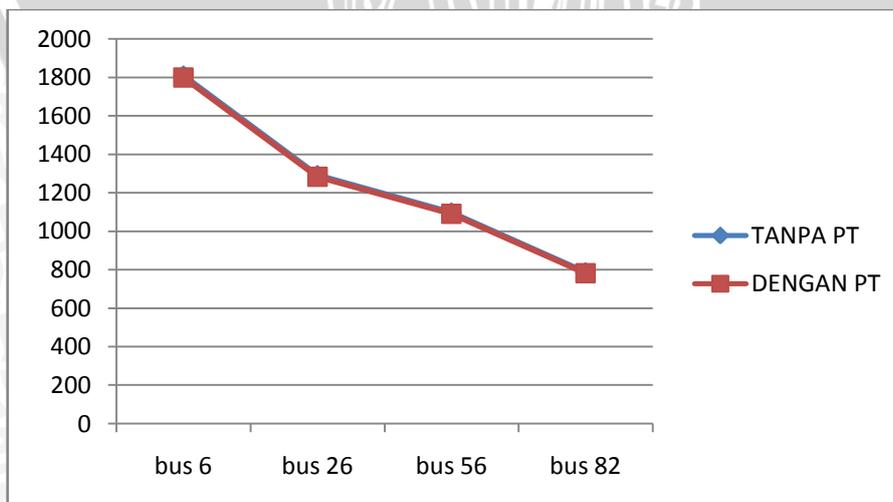
Sumber : Penulis

Gambar 4.3 Perbandingan arus gangguan hubung singkat tiga fasa pada penyulang Pujon tanpa PLTMH dan dengan PLTMH



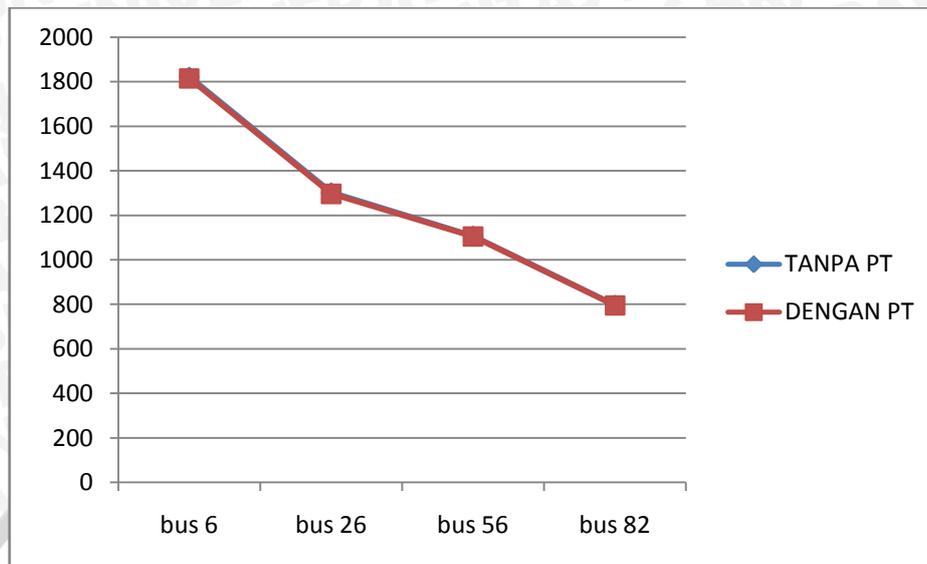
Sumber : Penulis

Gambar 4.4 Perbandingan arus gangguan hubung singkat dua fasa pada penyulang Pujon tanpa PLTMH dan dengan PLTMH



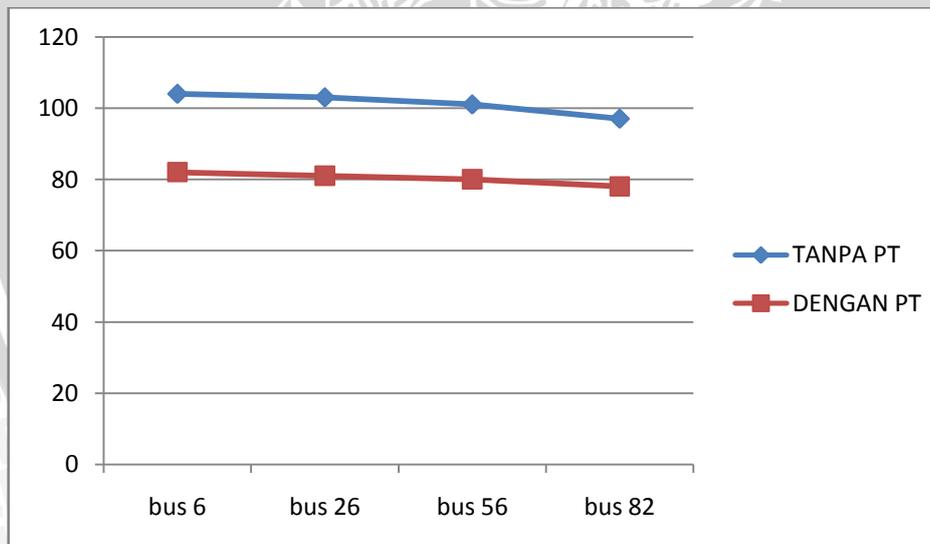
Sumber : Penulis

Gambar 4.5 Perbandingan arus gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah pada penyulang Pujon tanpa PLTMH dan dengan PLTMH



Sumber : Penulis

Gambar 4.6 Perbandingan arus gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah pada penyulang Pujon tanpa PLTMH dan dengan PLTMH



Sumber : Penulis

Pada gambar 4.3 sampai 4.6 menunjukkan bahwa arus gangguan meningkat ketika penyulang Pujon terhubung dengan PLTMH. Hal ini dikarenakan PLTMH ikut memberikan arus hubung singkat ketika terjadi gangguan di bus 2, bus 26, bus 56 dan bus 82.

4.4 Koordinasi Rele Arus Lebih Pada Penyulang Pujon

4.4.1 Tanpa PLTMH

Tabel 4.7 Data rele arus lebih masukan GI Sengkaling

Merk	GEC
Tipe	MCGG 82
Nomer Serie	793468 D
Setelan Arus (I>)	1000 A
Time Dial>	0,2 (SI)
Rasio CT	2000/5
Karakteristik	<i>Standart Inverse</i>
Arus Nominal (In)	5 A

Sumber: PT. PLN (Persero) APP Malang, 2010

Tabel 4.8 Data rele arus lebih penyulang Pujon

Merk	MICOM
Tipe	P127
Nomer Serie	36007937
Setelan Arus (I>)	320
Time Dial >	0,05 (SI)
Setelan Arus Instan (I>>)	2000 A
Time Dial >>	Instan
Rasio CT	400/5
Karakteristik	<i>Standart Inverse</i>
Arus Nominal (In)	5 A

Sumber: PT. PLN (Persero) APJ Malang, 2014

Perhitungan Penyetelan Rele Arus Lebih :

- Penyetelan Rele Arus Lebih Waktu Terbalik Biasa Penyulang Pujon

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{2076}{320} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times \text{TMS}$$

$$0,3 = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{2076}{320} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times \text{TMS}$$

$$\text{TMS} = 0,082$$

- Penyetelan Rele Arus Lebih Waktu Terbalik Biasa Masukan GI Sengkaling

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{2076}{1000} \right)^{0,02} \right] - 1} \times \text{TMS}$$

$$0,7 = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{2076}{320} \right)^{0,02} \right] - 1} \times \text{TMS}$$

$$\text{TMS} = 0,0735$$

Perhitungan Penyetelan Rele Gangguan Tanah :

- Penyetelan Rele Gangguan Tanah Waktu Terbalik Biasa Penyulang Pujon :

Arus hubung singkat diambil dari 6%-12% arus gangguan satu fasa ke tanah yang paling kecil atau yang paling jauh titiknya dari GI. Nilai ini untuk mengantisipasi jika penghantar tersentuh pohon yang dimana tahanan pohon cukup besar (26 Ohm – 52 Ohm) yang dapat memperkecil besarnya arus gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah.

$$\begin{aligned} I_{\text{seting rele gangguan tanah}} &= 10 \% \times I_{\text{hs 1 fasa ke tanah bus 82}} \\ &= 10 \% \times 78 \text{ A} \\ &= 7,8 \text{ A} \end{aligned}$$

$$0,3 = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{78}{7,8} \right)^{0,02} \right] - 1} \times \text{TMS}$$

$$\text{TMS} = 0,101$$

- Penyetelan Rele Gangguan Tanah Waktu Terbalik Biasa Masukan GI Sengkaling :
Setelan arus gangguan tanah pada masukan 20 kV harus lebih sensitif, hal ini berfungsi sebagai cadangan bagi rele di penyulang 20 kV dibuat 6 % x arus hubung singkat satu fasa ke tanah terkecil.

$$\begin{aligned} I_{\text{seting rele gangguan tanah}} &= 6 \% \times I_{\text{hs 1 fasa ke tanah bus 82}} \\ &= 6 \% \times 78 \text{ A} \\ &= 4,68 \text{ A} \end{aligned}$$

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{78}{4,68} \right)^{0,02} \right] - 1} \times \text{TMS}$$

$$0,7 = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{78}{4,68} \right)^{0,02} \right] - 1} \times \text{TMS}$$

$$\text{TMS} = 0,124$$

4.4.2 Dengan PLTMH

Pada PLTMH Bendosari dipasang satu buah Rele Arus Lebih Waktu Terbalik Biasa sebagai pengaman dari generator sinkron dan transformator tiga fasa. Trafo Arus (CT) yang digunakan mempunyai rasio 50:1.

Untuk menghitung arus nominal transformator daya menggunakan persamaan sebagai berikut:

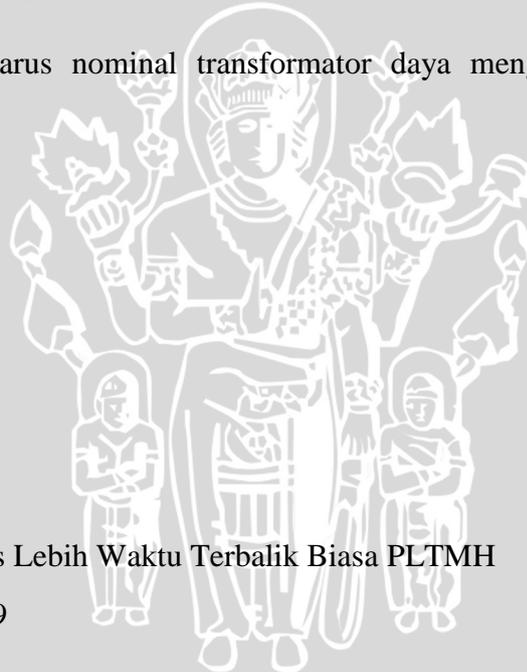
$$\begin{aligned} I_{n \text{ trafo}} &= \frac{\text{kVA}}{\sqrt{3} \times \text{kV}_{L-L}} \\ &= \frac{100}{\sqrt{3} \times 20} \\ &= 2,89 \text{ A} \end{aligned}$$

- Penyetelan Rele Arus Lebih Waktu Terbalik Biasa PLTMH

$$\begin{aligned} I_{\text{set primer}} &= 1,05 \times 2,89 \\ &= 3,03 \text{ A} \end{aligned}$$

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{786}{3,03} \right)^{0,02} \right] - 1} \times \text{TMS}$$

$$0,3 = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{786}{3,03} \right)^{0,02} \right] - 1} \times \text{TMS}$$



$$TMS = 0,25$$

- Penyetelan Rele Gangguan Tanah Waktu Terbalik Biasa PLTMH

$$\begin{aligned} I_{\text{seting rele gangguan tanah}} &= 10 \% \times I_{\text{hs 1 fasa ke tanah bus 82}} \\ &= 10 \% \times 97 \text{ A} \\ &= 9,7 \text{ A} \end{aligned}$$

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{97}{9,7} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times TMS$$

$$0,3 = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{97}{9,7} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times TMS$$

$$TMS = 0,1007$$

- Penyetelan Rele Arus Lebih Waktu Terbalik Biasa Penyulang Pujon

Pada gambar 4.3 sampai 4.6 menunjukkan bahwa arus gangguan meningkat ketika penyulang Pujon terhubung dengan PLTMH. Hal ini dikarenakan PLTMH ikut memberikan arus hubung singkat. Penambahan arus hubung singkat ini menimbulkan masalah dalam sistem proteksi sehingga penyetelan ulang sistem proteksi.

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{2087}{320} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times TMS$$

$$0,3 = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{2087}{320} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times TMS$$

$$TMS = 0,083$$

- Penyetelan Rele Arus Lebih Waktu Terbalik Biasa Masukan GI Sengkaling

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{2087}{1000} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times \text{TMS}$$

$$0,7 = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{2087}{1000} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times \text{TMS}$$

$$\text{TMS} = 0,074$$

Perhitungan Penyetelan Rele Gangguan Tanah :

- Penyetelan Rele Gangguan Tanah Waktu Terbalik Biasa Penyulang Pujon :

$$I_{\text{rele gangguan tanah}} = 10 \% \times I_{\text{hs 1 fasa ke tanah bus 82}}$$

$$= 10 \% \times 97 \text{ A}$$

$$= 9,7 \text{ A}$$

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{97}{9,7} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times 0,101$$

$$= 0,3002 \text{ detik}$$

Penyetelan Rele Gangguan Tanah Waktu Terbalik Biasa penyulang Pujon tidak tepat karena melebihi penyetelan minimal 0,3 detik sehingga diperlukan penyetelan ulang.

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

$$\text{TMS} = \frac{\left[\left(\frac{97}{9,7} \right)^\alpha - 1 \right]}{0,14} \times 0,3$$

$$= 0,1001$$

- Penyetelan Rele Gangguan Tanah Waktu Terbalik Biasa Masukan GI Sengkaling :

$$\begin{aligned} I_{\text{rele gangguan tanah}} &= 10 \% \times I_{\text{hs 1 fasa ke tanah bus 82}} \\ &= 10 \% \times 97 \text{ A} \\ &= 9,7 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t &= \frac{0,14}{\left[\left(\frac{97}{9,7} \right)^{0,02} \right] - 1} \times 0,124 \\ &= 0,369 \text{ detik} \end{aligned}$$

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis pada pembahasan sebelumnya, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Penyambungan PLTMH pada penyulang Pujon dapat menyebabkan kenaikan arus hubung singkat, yaitu arus hubung singkat tiga fasa penyulang Pujon sebelum tersambung PLTMH pada bus 6, bus 26, bus 56 dan bus 82 berturut-turut adalah 2076 A, 1480 A, 1259 A dan 903 A. Arus hubung singkat tiga fasa penyulang Pujon setelah tersambung PLTMH pada bus 6, bus 26, bus 56 dan bus 82 berturut-turut adalah 2087 A, 1490 A, 1260 A dan 907 A.
2. Koordinasi pada penyulang Pujon mengalami perubahan seting waktu koordinasi namun dengan nilai yang sangat kecil dikarenakan perbedaan nilai arus hubung singkat antara sebelum dan setelah penyulang Pujon terhubung dengan PLTMH. Penyetelan pengali waktu rele arus lebih penyulang pujon yaitu 0,2 dan 0,083. Penyetelan pengali waktu rele arus lebih masukan GI Sengkaling yaitu 0,05 dan 0,074. Penyetelan pengali waktu rele arus lebih PLTMH yaitu 0,074.

5.2 Saran

Perlu dilakukan sebuah perhitungan yang teliti mengenai perhitungan koordinasi waktu proteksi dikarenakan arus hubung singkat antara sebelum dan setelah PLTMH.

DAFTAR PUSTAKA

- Davies, T, 2006, "*Protection of Industrial Power Systems 2nd Edition*", USA, Elsevier Ltd.
- Doyle, Michael T. "*Reviewing the Impacts of Distributed Generation on Distribution System Protection*", IEEE. 2002.
- Gonen, Turan. 1987. *Electrical Power Distribution System Engineering*. New York: Mc.Graw Hill Book Company.
- Horowitz, Stanley H. dan Phadke, Arum G. 2008. *Power System Relaying 3rd Edition*. England: John Wiley and Sons.
- Hutauruk, Tumpak S. 1991. *Pentanahan Titik Netral Sistem Tenaga dan Pentanahan Peralatan*. Jakarta : Penerbit Erlangga.
- IEC 60255-3 dan BS 142.
- IEEE Std 242-2001™, 2001, "*IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems*", New York, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
- Mashau, T. Kibaara, S. Chowdhury, S. Chowdhury, S.P. "*Impact of Distributed Generation on Protection Coordination in a Radial Distribution Feeder*", University of Cape Town, South Africa. 2011.
- NFPA 70E. 2003. *Electrical Safety Requirements for Employee Workplace 2003 Edition*.
- Pandjaitan, Bonar. 2012. *Proteksi Sistem Tenaga Listrik*. Yogyakarta: Andi Offset.
- Penangsang, Ontoseno. 2006. *Diktat Kuliah Analisis Sistem Tenaga Jilid 2*. Teknik Elektro ITS, Surabaya.
- Perusahaan Umum Listrik Negara. "*SPLN 52-3 : 1983, Pola Pengamanan Sistem, Bagian Tiga : Sistem Distribusi 6 kV dan 20 kV*". Indonesia. 1983.
- Prévé, Christophe. 2006. *Protection of Electrical Network*. Great Britain. United States: ISTE Ltd.

- Ravindranath, B. 1976. *Power System Protection and Switchgear*. Singapore: John Wiley & Sons.
- Saksomo, Setiyo. Tanpa Tahun. *Diktat Proteksi Sistem Tenaga Listrik*. Malang: Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
- Sarimun, Wahyudi. September 2011. *Buku Saku Pelayanan Teknik Edisi Kedua*. Depok: Garamond.
- Sarimun N., Wahyudi dan Pribadi. 2010. *Proteksi Sistem Distribusi Tegangan Menengah*. PT.PLN (Persero), Jakarta.
- Sarimun, Wahyudi. "*Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik*", Garamod. 2012.
- Stevenson, Jr. William D. 1996. *Analisis Sistem Tenaga Listrik*. Cetakan kelima. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Stevenson, Jr., William D. 1994. *Analisis Sistem Tenaga Listrik*. Jakarta: Erlangga.
- Universitas Sumatra Utara. _____. *Sistem Distribusi Tenaga Listrik*. (repository.usu.ac.id,).
- Utomo, Teguh. 2010. *Diktat Kuliah Pembangkit Daya Elektrik*. Malang.
- Vijeta, K. Siva Sarma, D.V.S.S. "*Protection of Distributed Generation Connected Distribution System*", Department of Electrical Engineering, NIT Warangal, India. 2012.
- Wang Bo, Lan Ka. 2011. *Analysis of the Distributed Generation System and the Influence on Power Losses*. Korean: IEEE CONFERENCE PUBLICATIONS.