

SKRIPSI

**STUDI KOORDINASI RELAI ARUS LEBIH PADA SISTEM PROTEKSI
GENERATOR DAN TRANSFORMATOR PLTA BAKARU**

Disusun oleh :

ABD RAHIM

D041 18 1332

Disusun untuk dipertahankan pada ujian tutup (sidang) pada Program Strata-1
Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin



**PROGRAM STUDI S1 TEKNIK ELEKTRO
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN**

2023

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI**STUDI KOORDINASI RELAI ARUS LEBIH PADA SISTEM PROTEKSI
GENERATOR DAN TRANSFORMATOR PLTA BAKARU**

Disusun dan diajukan oleh:

ABD RAHIM


D041 18 1332

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada Tanggal 16 Februari 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,



Dr. Indar Chaerah Gunadin, S.T., M.T.
NIP. 197311181998031001



Dr. Ir. Yustinus Upa Sombolayuk, M.T.
NIP. 195907081988021001

Ketua Departemen Teknik Elektro,



Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T.
NIP. 19691026 199412 2 001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini

Nama : Abd Rahim
NIM : D041181332
Program Studi : Teknik Elektro
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

STUDI KOORDINASI RELAI ARUS LEBIH PADA SISTEM PROTEKSI GENERATOR DAN TRANSFORMATOR PLTA BAKARU

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 20 Februari 2023

Yang menyatakan



Abd Rahim

ABSTRAK

ABD RAHIM, *Studi Koordinasi Relai Arus Lebih pada Sistem Proteksi Generator dan Transformator PLTA Bakar* (dibimbing oleh Indar Chaerah Gunadin dan Yustinus Upa Sombolayuk)

Saat ini kebutuhan masyarakat akan ketersediaan listrik sangatlah penting. Oleh karena itu, negara berkewajiban untuk memenuhi ketersediaan listrik bagi masyarakat dengan cara membangun pembangkit yang handal agar dapat memasok kebutuhan listrik dengan baik. Seiring berjalannya waktu, pertumbuhan beban pada sistem tentu akan mempengaruhi tingkat keandalan dari peralatan proteksi. Oleh sebab itu, pada suatu titik peralatan proteksi tersebut harus diperbaharui agar mendapatkan sistem proteksi yang memiliki tingkat keandalan yang tinggi. Pada penelitian ini memiliki tujuan untuk mendapatkan settingan dan koordinasi relai arus lebih yang tepat pada sistem kelistrikan khususnya generator dan transformator PLTA Bakar. Berdasarkan hasil dari plot kurva relai arus lebih pada generator dan transformator masih terdapat kekurangan yaitu mengalami *overlap*, untuk mengatasi hal tersebut maka perlu dilakukan adanya reseting. Setelah dilakukan reseting, plot kurva relai arus lebih pada generator dan transformator sudah tidak mengalami *overlap*. Hasil simulasi menggunakan *software* setelah dilakukan *resetting* menunjukkan bahwa koordinasi antara relai arus lebih pada generator dan transformator utama serta beban pemakaian sendiri PLTA Bakar sudah bekerja dengan baik, dimana ketika terjadi gangguan di dalam zona transformator utama maka koordinasi relai yang bekerja terlebih dahulu yaitu relai yang paling dekat dengan gangguan disebut relai pertama.

Kata kunci: PLTA, Sistem Proteksi, Keandalan, Koordinasi, Relai arus lebih.

ABSTRACT

ABD RAHIM, *Study of Coordination of Overcurrent Relays in the Generator and Transformer Protection Systems of the Bakaru Hydroelectric Power Plant* (supervised by Indar Chaerah Gunadin and Yustinus Upa Sombolayuk)

At present the community's need for the availability of electricity is very important. Therefore, the state is obliged to fulfill the availability of electricity for the community by building reliable generators so that they can supply electricity properly. Over time, the load growth on the system will certainly affect the level of reliability of the protection equipment. Therefore, at some point, the protective equipment must be updated in order to get a protection system that has a high level of reliability. In this study, the aim was to obtain the correct overcurrent relay settings and coordination in the electrical system, especially the generators and transformers of the Bakaru hydropower plant. Based on the results of the plot of the overcurrent relay curve on the generator and transformer there are still deficiencies, namely experiencing overlap, to overcome this it is necessary to do resetting. After resetting, the plot of the overcurrent relay curve on the generator and transformer is no longer overlapping. The simulation results using the software after resetting show that the coordination between the overcurrent relays on the generator and the main transformer as well as the self-loading of the Bakaru hydropower plant is working properly, where when there is a disturbance in the main transformer zone, the relay coordination works first i.e. the relay closest to the fault is called the first relay.

Keywords: hydropower, protection system, reliability, coordination, overcurrent relay.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	vii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR LAMPIRAN	x
KATA PENGANTAR.....	xi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)	5
2.2 Generator	5
2.3 Transformator.....	8
2.4 Sistem Proteksi Tenaga Listrik	9
2.5 Gangguan Sistem Tenaga Listrik	12
2.6 Proteksi Generator.....	21
2.7 Gangguan Pada Transformator.....	23
2.8 Penggunaan <i>Software</i> ETAP	24
2.9 Penelitian Terdahulu	25
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	27
3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian.....	27
3.2 Metode Penelitian.....	27
3.3 Metode Pengambilan Data	28

3.4	Metode Analisis Data	28
3.5	Kerangka Konsep Penelitian	28
3.6	Alir Penelitian	29
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		30
4.1	Sistem Kelistrikan PLTA Bakaru.....	30
4.2	Data Generator PLTA Bakaru.....	30
4.3	Data Transformator PLTA Bakaru.....	31
4.4	Data Relai Arus Lebih Pada Generator	31
4.5	Data Relai Arus Lebih Pada Transformator Utama	32
4.6	Data Relai Arus Lebih Pada Transformator Pemakaian Sendiri.....	32
4.7	Perhitungan Arus Nominal Generator dan Transformator (I_n).....	33
4.8	Perhitungan Arus Nominal Transformator Pemakaian Sendiri.....	33
4.9	Perhitungan Arus <i>Setting</i> Generator (I_s).....	34
4.10	Perhitungan Arus <i>Setting</i> Transformator Utama (I_s).....	34
4.11	Perhitungan Arus <i>Setting</i> Transformator Pemakaian Sendiri (I_s)	35
4.12	Perhitungan Waktu Operasi Relai Generator (T_{op})	35
4.13	Perhitungan Waktu Operasi Relai Transformator (T_{op})	45
4.14	Perhitungan Waktu Operasi Relai Transformator Pemakaian Sendiri (T_{op})	54
4.15	Pemodelan <i>Single Line Diagram</i> Menggunakan ETAP 19.0.1.....	63
4.16	Koordinasi Relai Arus Lebih Gangguan Fasa.....	65
4.17	Pemilihan Zona Koordinasi Pada Unit 1 dan 2	65
4.18	Koordinasi Relai Arus Lebih Gangguan Fasa Unit 1 dan 2.....	67
4.19	Hasil Simulasi Koordinasi Relai Arus Lebih Menggunakan Etap	81
BAB V SIMPULAN DAN SARAN		90
5.1	Simpulan.....	90
5.2	Saran.....	91
DAFTAR PUSTAKA		92

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Proses Konversi Energi PLTA	5
Gambar 2.2 Generator Sinkron	6
Gambar 2.3 Tempat Generator Listrik pada PLTA	7
Gambar 2.4 Turbin pada PLTA	7
Gambar 2.5 Proses Pembangkitan Energi Listrik pada Generator Sinkron.....	8
Gambar 2.6 Transformator Daya	9
Gambar 2.7 Komponen-Komponen Sistem Proteksi.....	11
Gambar 2.8 Daerah Asuhan Proteksi.....	11
Gambar 2.9 Karakteristik Relai Waktu Seketika (<i>Instantaneous Relay</i>).....	17
Gambar 2.10 Karakteristik Relai Waktu Tertentu (<i>Definite Time Relay</i>).....	18
Gambar 2.11 Karakteristik Relai Waktu Terbalik (<i>Inverse Relay</i>).....	18
Gambar 2.12 Karakteristik Kerja Relai Arus Lebih.....	19
Gambar 3.1 Diagram Alur Penelitian.....	29
Gambar 4.1 Perbandingan Waktu Kerja Relai pada Fasa Uji R Generator	38
Gambar 4.2 Perbandingan Waktu Kerja Relai pada Fasa Uji S Generator.....	41
Gambar 4.3 Perbandingan Waktu Kerja Relai pada Fasa Uji T Generator	44
Gambar 4.4 Perbandingan Waktu Kerja Relai pada Fasa Uji R Trafo Utama.....	47
Gambar 4.5 Perbandingan Waktu Kerja Relai pada Fasa Uji S Trafo Utama	50
Gambar 4.6 Perbandingan Waktu Kerja Relai pada Fasa Uji T Trafo Utama.....	53
Gambar 4.7 Perbandingan Waktu Kerja Relai pada Fasa Uji R Trafo PS.....	57
Gambar 4.8 Perbandingan Waktu Kerja Relai pada Fasa Uji S Trafo PS	60
Gambar 4.9 Perbandingan Waktu Kerja Relai pada Fasa Uji T Trafo PS	63
Gambar 4.10 Pemodelan <i>Single Line Diagram</i> Unit 1 dan 2 PLTA Bakar	64
Gambar 4.11 Zona Koordinasi 1 dan 2 pada Unit 1	66
Gambar 4.12 Zona Koordinasi 1 dan 2 pada Unit 2	66
Gambar 4.13 Hasil Plot Setelan Relai <i>Existing</i> Zona 1 Unit 1	68
Gambar 4.14 Hasil Plot Setelan Relai <i>Existing</i> Zona 1 Unit 2	68
Gambar 4.15 Hasil Plot Setelan Relai <i>Resetting</i> Zona 1 Unit 1.....	73
Gambar 4.16 Hasil Plot Setelan Relai <i>Resetting</i> Zona 1 Unit 2.....	73

Gambar 4.17 Hasil Plot Setelan Relai <i>Existing</i> Zona 2 Unit 1	75
Gambar 4.18 Hasil Plot Setelan Relai <i>Existing</i> Zona 2 Unit 2	75
Gambar 4.19 Hasil Plot Setelan Relai <i>Resetting</i> Zona 2 Unit 1.....	80
Gambar 4.20 Hasil Plot Setelan Relai <i>Resetting</i> Zona 2 Unit 2.....	80
Gambar 4.21 Hasil Koordinasi Zona 1 Unit 1 (Gangguan pada Trafo).....	81
Gambar 4.22 Waktu Kerja Relai Zona 1 Unit 1 Sebelum <i>Resetting</i> (Gangguan pada Trafo)	82
Gambar 4.23 Waktu Kerja Relai Zona 1 Unit 1 Setelah <i>Resetting</i> (Gangguan pada Trafo).....	82
Gambar 4.24 Hasil Koordinasi Zona 2 Unit 1 (Gangguan pada PS)	83
Gambar 4.25 Waktu Kerja Relai Zona 2 Unit 1 Sebelum <i>Resetting</i>	84
Gambar 4.26 Waktu Kerja Relai Zona 2 Unit 1 Setelah <i>Resetting</i>	84
Gambar 4.27 Hasil Koordinasi Zona 1 Unit 2 (Gangguan pada Trafo).....	85
Gambar 4.28 Waktu Kerja Relai Zona 1 Unit 2 Sebelum <i>Resetting</i> (Gangguan pada Trafo)	86
Gambar 4.29 Waktu Kerja Relai Zona 1 Unit 1 Setelah <i>Resetting</i> (Gangguan pada Trafo).....	86
Gambar 4.30 Hasil Koordinasi Zona 2 Unit 2 (Gangguan pada PS)	86
Gambar 4.31 Waktu Kerja Relai Zona 2 Unit 2 Sebelum <i>Resetting</i>	88
Gambar 4.32 Waktu Kerja Relai Zona 2 Unit 2 Setelah <i>Resetting</i>	88

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Konstanta Karakteristik <i>Setting</i> Waktu Sesuai Standar PLN 2005.....	19
Tabel 3.1 Kerangka Konsep Penelitian.....	29
Tabel 4.1 Perbandingan Data Pengujian dan Hasil Perhitungan Generator.....	44
Tabel 4.2 Perbandingan Data Pengujian dan Hasil Perhitungan Trafo Utama.....	54
Tabel 4.3 Perbandingan Data Pengujian dan Hasil Perhitungan Trafo PS	63
Tabel 4.4 Data Relai <i>Existing</i> Zona 1	67
Tabel 4.5 Data Relai <i>Existing</i> Zona 2	74
Tabel 4.6 Koordinasi pada Setiap Titik Gangguan	89

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Hasil Uji Rele Proteksi Generator	94
Lampiran 2 Hasil Uji Rele Proteksi Transformator Utama	96
Lampiran 3 Hasil Uji Rele Proteksi <i>Station Service Transformer</i>	98
Lampiran 4 <i>Load Flow Report</i>	102
Lampiran 5 <i>Short Circuit Report</i>	102

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT, karena rahmat dan karunia-Nya lah sehingga penulisan laporan skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik. Laporan skripsi ini ditulis untuk memenuhi salah satu syarat kelulusan pada Pendidikan Strata Satu Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar. Adapun judul tugas akhir ini adalah “Studi Koordinasi Relai Arus Lebih Pada Sistem Proteksi Generator dan Transformator PLTA Bakaru”.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan, hal ini disebabkan penulis sebagai manusia biasa yang tidak luput dari kesalahan dan kekurangan. Oleh sebab itu, penulis menerima saran dan kritik, segala koreksi serta perbaikan guna menyempurnakan tulisan ini agar kelak dapat bermanfaat. Skripsi ini dapat terwujud berkat adanya bantuan, arahan dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan kali penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Dr. Indar Chaerah Gunadin, S.T., M.T. selaku pembimbing I dan bapak Dr. Ir. Yustinus Upa Sombolayuk, M.T. selaku pembimbing II yang telah memberikan bimbingan dan arahan, serta ide-ide dalam penyelesaian skripsi ini.
2. Dr. Ir. Hj. Zaenab Muslimin, M.T. dan Bapak Yusri Syam Akil, S.T., M.T., Ph.D, selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik dan saran yang membangun kepada penulis dalam mengerjakan skripsi ini.
3. Segenap Dosen dan Staf Departemen Teknik Elektro, atas segala ilmu yang bermanfaat, wawasan dan pengalaman yang telah diberikan kepada penulis.
4. Seluruh pihak PT. PLN (Persero) UPDK Bakaru, Unit Layanan Pusat Listrik Tenaga Air (ULPLTA) Bakaru khususnya bapak Kenno Robby Pradana atas segala waktunya dalam proses pengambilan data.
5. Ibu Dr. Eng. Ir. Dewiani, MT. selaku Ketua Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

6. Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin dan Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc. selaku Rektor Universitas Hasanuddin.
7. Kedua orang tua dan keluarga, terima kasih atas doa dan dukungan yang diberikan kepada penulis terutama pengorbanan dalam bentuk materi yang diberikan selama perkuliahan.
8. Teman-teman seperjuangan Laboratorium Riset Relay Proteksi dan Pengukuran (Caesar, Icing, Firda, dan Aisyah) yang selalu menghibur, membantu, dan menyemangati dalam mengerjakan skripsi.
9. Teman-teman BOCAH GALAU (Gentel, Rul, Adit, Cesar, Syabrian, Alba, Rio, Icing, Aping, Aso, Eri, Umar) yang selalu menghibur dan menyemangati dalam mengerjakan skripsi.
10. Seluruh teman-teman CAL18RATOR, yang menjadi teman seperjuangan selama perkuliahan.
11. Semua pihak yang tidak dapat saya sebutkan satu-persatu yang telah membantu penulis menyelesaikan skripsi ini.
12. *Last but not least, I wanna thank me, I wanna thank me for believing in me, I wanna thank me for doing all this hard work, I wanna thank me for having no days off, I wanna thank me for, for never quitting, I wanna thank me for always being a giver and tryna give more than I receive, I wanna thank me for tryna do more right than wrong, I wanna thank me for just being me at all times.*

Gowa, 18 Januari 2023

Abd Rahim

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Pasokan daya pada suatu sistem tenaga listrik di perusahaan pembangkitan tenaga listrik harus berjalan secara terus menerus. Hal ini diperlukan agar daya pada beban tidak terganggu sehingga konsumen menerima tenaga listrik sesuai kebutuhan. Apabila sistem kelistrikan tersebut mengalami gangguan maka proses penyaluran daya dari pembangkit menuju ke beban tersebut dapat berhenti dan mengalami kerugian yang cukup besar. Gangguan yang terjadi juga dapat menimbulkan terjadinya kerusakan pada peralatan yang mendukung proses produksi. Oleh karena itu diperlukan sistem proteksi yang sesuai untuk mengamankan peralatan yang terpasang dari gangguan yang mungkin terjadi. Seiring berjalannya waktu, pertumbuhan beban pada sistem tentu akan mempengaruhi tingkat keandalan dari peralatan proteksi. Oleh sebab itu, pada suatu titik peralatan proteksi tersebut harus diperbaharui agar mendapatkan sistem proteksi yang memiliki tingkat keandalan yang tinggi.

Pembangkit listrik memiliki beberapa kriteria berdasarkan sumbernya, untuk ketiga sumber yang sangat umum di masyarakat sehingga disebut konvensional yaitu tenaga uap, tenaga air dan tenaga nuklir. Pada prinsipnya PLTA mengolah air menjadi listrik dengan memanfaatkan perubahan energi, yaitu energi potensial air yang diubah menjadi energi kinetis dengan adanya *head*, kemudian energi kinetis ini berubah menjadi energi mekanis dengan adanya aliran air yang menggerakkan turbin, lalu energi mekanis berubah menjadi energi listrik melalui perputaran rotor pada generator. Jumlah energi listrik yang bisa dibangkitkan dengan sumber daya air tergantung pada dua hal, yaitu jarak tinggi air (*head*) dan berapa besar jumlah air yang mengalir (debit).

Keandalan suatu sistem tenaga listrik dapat terlihat ketika terjadinya gangguan yang dapat menyebabkan terganggunya penyaluran energi listrik ke konsumen. Dalam suatu sistem tenaga listrik tidak akan mungkin bebas dari gangguan. Gangguan yang terjadi bisa pada pembangkitan, transmisi, maupun distribusi. Salah satu contoh adalah gangguan yang terjadi pada generator.

Generator adalah komponen yang sangat penting dalam pembangkitan energi listrik. Jika terjadi gangguan pada generator akan menyebabkan terganggunya proses penyediaan energi listrik dan dapat menyebabkan kerusakan pada generator itu sendiri. Selain gangguan yang terjadi pada generator, salah satunya dapat juga dapat dialami pada transformator daya. Dalam pengoperasiannya transformator daya dapat mengalami 2 gangguan yaitu internal dan eksternal. Gangguan internal merupakan gangguan yang terjadi di dalam transformator itu sendiri. Sedangkan gangguan eksternal merupakan gangguan yang terjadi di luar transformator daya tetapi dapat menimbulkan gangguan pada transformator yang bersangkutan.

Pemeliharaan secara berkala terhadap sistem proteksi generator dan transformator mutlak diperlukan untuk memvalidasi sistem proteksi generator maupun transformator apakah bekerja dengan semestinya. Selain itu juga direkomendasikan untuk dilakukan *troubleshooting testing* dengan mengumpulkan data dan status dari semua peralatan proteksi, sehingga keandalan dari sistem proteksi dapat dievaluasi menggunakan parameter pengaman yaitu sistem proteksi tidak beroperasi saat tidak dibutuhkan dan parameter kehandalan yaitu sistem proteksi beroperasi saat dibutuhkan. Dengan bantuan relai proteksi yang saling berkoordinasi dapat memonitor kondisi operasi generator dan transformator secara terus menerus setiap saat dengan cermat dan tepat, sehingga pada saat terjadi gangguan maka relai proteksi tersebut dapat memberikan perintah lepas sinkron untuk mengamankan generator maupun transformator.

Dilihat dari daerah kerja dan kecepatan operasinya, proteksi generator dibedakan dalam dua kelompok. Pertama, proteksi yang daerah kerjanya terbatas hanya mencakup peralatan tertentu dan tidak responsif terhadap yang terjadi di luar daerah kerjanya serta bekerja seketika. Proteksi dengan sifat ini biasa disebut sebagai proteksi unit (*unit protection*). Kelompok kedua adalah proteksi yang mempunyai daerah kerja lebih luas dan dapat bekerja (responsif) oleh pengaruh kondisi abnormal yang berasal dari luar generator. Proteksi kelompok ini bekerja lebih lambat (tidak seketika).

Untuk memperoleh keandalan sistem cara yang bisa dilakukan adalah proteksi dengan menggunakan relai pengaman. Oleh sebab itu, agar menambah kinerja dari sistem proteksi tersebut harus dilakukan perhitungan pengaturan kembali

terhadap setting-an relai pengaman khususnya pada relai arus lebih (*over current relay*). Karena relai arus lebih berguna untuk mengidentifikasi adanya kondisi abnormal (arus) saat terjadi gangguan hubung singkat dan menyampaikan perintah peralatan pemutus agar memisahkan saluran yang terganggu dari sistem guna mencegah atau membatasi kerusakan jaringan beserta peralatannya yang dekat dengan gangguan dan menghindari terputusnya suplai daya listrik untuk daerah yang tidak terjadi gangguan.

Pusat Listrik Tenaga Air (PLTA) Bakaru merupakan pusat listrik tenaga air yang memiliki desain mesin poros tegak dengan tipe turbin Francis, dengan kapasitas 2×63 MW. PLTA Bakaru menjadi pembangkit yang sangat diharapkan keandalannya untuk menyuplai listrik ke sistem interkoneksi 150 kV Sulawesi Selatan dan Sulawesi Barat. PLTA Bakaru memanfaatkan potensi air dari sungai Mamasa, yang merupakan anak sungai Saddang yang dikembangkan menjadi tenaga listrik sebesar 2×63 MW. Dimana air sungai dialihkan dengan menggunakan dam yang dibangun memotong aliran sungai. Air sungai ini kemudian disalurkan ke bangunan air PLTA. PLTA Bakaru merupakan PLTA yang menggunakan bendungan tipe run of river yang terdiri atas 2 (dua) unit turbin air tipe Francis dan memanfaatkan aliran sungai Mamasa dengan elevasi 615,50 mdpl, serta dilengkapi dengan pengatur waduk harian untuk mengatur limpasan harian dari sungai Mamasa.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka dapat di rumuskan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana setting sistem proteksi relai arus lebih pada generator dan transformator PLTA Bakaru untuk dapat mengamankan ketika terjadinya gangguan?
2. Bagaimana memodelkan dan mensimulasikan settingan koordinasi relai arus lebih pada generator dan transformator PLTA Bakaru?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah:

1. Untuk mendapatkan setting relai arus lebih yang tepat pada generator dan transformator PLTA Bakaru untuk dapat mengamankan ketika terjadi gangguan.
2. Untuk mendapatkan koordinasi relai arus lebih yang tepat pada sistem kelistrikan khususnya generator dan transformator di PLTA Bakaru ketika terjadi gangguan

1.4 Batasan Masalah

1. Peralatan pengaman yang dilakukan penyetelan dan koordinasi adalah relai arus lebih.
2. Koordinasi relai arus lebih sistem proteksi difokuskan pada generator dan transformator unit 1 dan 2 serta pada beban pemakaian sendiri
3. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software* ETAP 19.0.1
4. Koordinasi dilakukan berdasarkan tipikal yang mewakili *single line diagram*.

1.5 Manfaat Penelitian

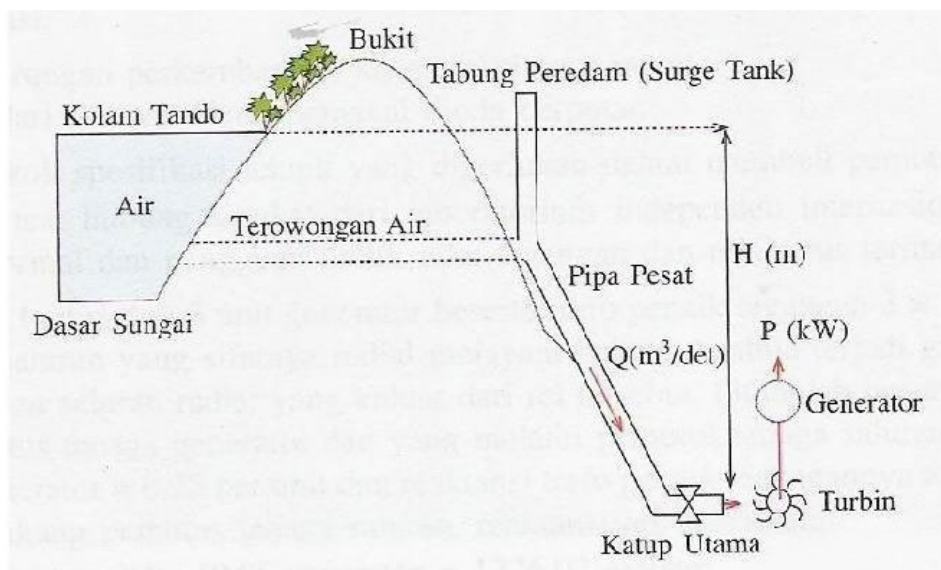
Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Memberikan informasi mengenai setting sistem proteksi *overcurrent relay* pada generator PLTA Bakaru untuk dapat mengamankan ketika terjadi gangguan.
2. Memberikan informasi mengenai koordinasi *overcurrent relay* pada generator dan transformator unit 1 dan 2 di PLTA Bakaru ketika terjadi gangguan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)

Pembangkitan tenaga air (PLTA) adalah sebuah pembangkitan energi listrik yang mengubah energi potensial dari air menjadi energi mekanik oleh turbin dan kemudian diubah menjadi energi listrik oleh generator yang memanfaatkan ketinggian dan kecepatan aliran air. Pengertian potensi disini adalah gambaran besaran kapasitas pembangkit listrik yang mungkin dapat dikembangkan di suatu rencana lokasi tertentu. Sesuai dengan sifat dasar dan proses/mechanisme dari terbangkitkannya energi listrik yang bersumber dari tenaga air, ada 2 (dua) komponen utama yang menjadi dasar dari terjadinya proses pembangkitan tersebut. Dua komponen tersebut adalah: Debit air dan tinggi jatuh air (*head*). Proses konversi energi dapat dilihat pada Gambar 2.1 (Marsudi, 2005).



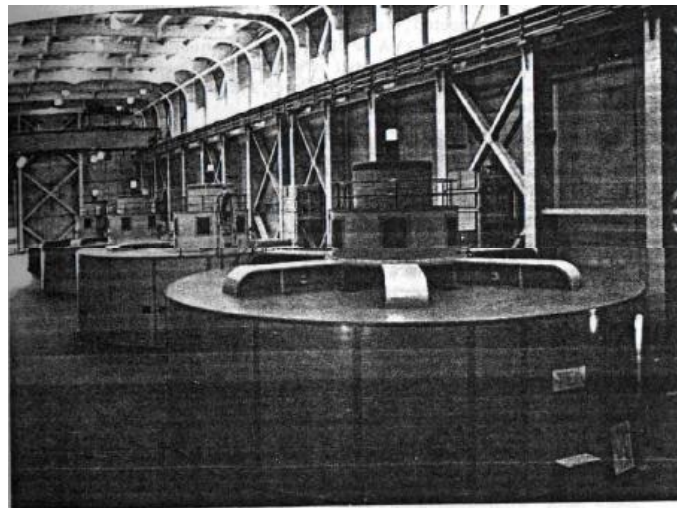
Gambar 2.1 Proses Konversi Energi PLTA.

2.2 Generator

Generator sinkron (sering disebut alternator) adalah mesin listrik arus bolak balik yang menghasilkan tegangan dan arus bolak balik (*alternating current, AC*) yang bekerja dengan cara merubah energi mekanik (gerak) menjadi energi listrik dengan adanya induksi medan magnet. Perubahan energi ini terjadi karena adanya

pergerakan relatif antara medan magnet dengan kumparan generator. Pergerakan relatif adalah terjadinya perubahan medan magnet pada kumparan jangkar (tempat terbangkitnya tegangan pada generator) karena pergerakan medan magnet terhadap kumparan jangkar atau sebaliknya. Alternator ini disebut generator sinkron (sinkron = serempak) karena kecepatan perputaran medan magnet yang terjadi sama dengan kecepatan perputaran rotor generator. Alternator ini menghasilkan energi listrik bolak balik (*alternating current, AC*) dan biasa diproduksi untuk menghasilkan listrik AC 1-fasa atau 3-fasa. (Zuriman Anthony, 2018).

Generator adalah sebuah objek yang memiliki potensi bahaya yang sangat banyak, untuk itu dibutuhkan atensi dan perhatian lebih dalam hal proteksi. Potensi bahaya/masalah dalam generator dapat dikelompokkan dalam dua kategori, yaitu: 1). Gangguan internal dalam daerah proteksi, dan 2). Kondisi sistem tidak normal dan atau operasi tidak normal. Diskusi mengenai proteksi yang dikemukakan dalam buku ini diutamakan untuk generator yang terpisah dari penggerak mulanya. Jadi pada dasarnya proteksi generator akan sama, baik untuk generator dengan penggerak mula hydro, batubara, gas atau nuklir.

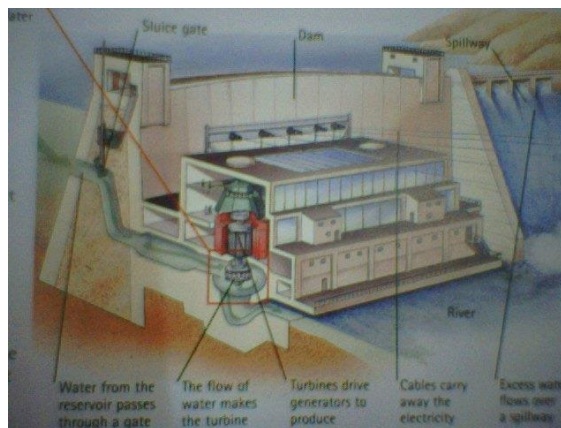


Gambar 2.2 Generator Sinkron.

Ukuran generator sangat bervariasi dan lokasi generator pada gardu atau pusat pembangkit umumnya dekat atau pada suplai penggerak mulanya dan atau sedekat mungkin dengan pusat beban. Tipikal generator dengan penggerak mula

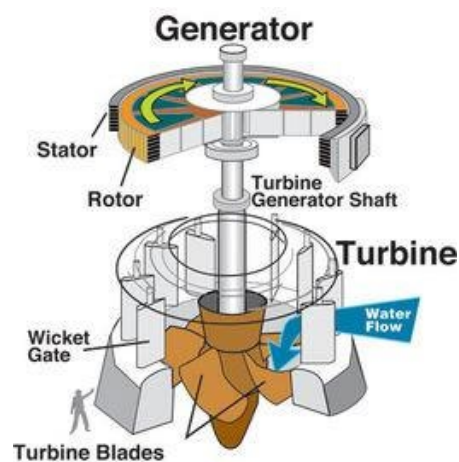
berupa PLTA diperlihatkan dalam Gambar 2.2. Pada umumnya, untuk tipe ini digunakan shaft vertikal, atau ada juga yang menggunakan horizontal shaft.

Generator sinkron banyak digunakan sebagai pembangkit energi listrik berkapasitas besar, seperti yang diterapkan pada PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air), PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap), PLTG (Pembangkit Listrik Tenaga Gas), PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir), dan pembangkit listrik lainnya (Hendra Martha, 2008).



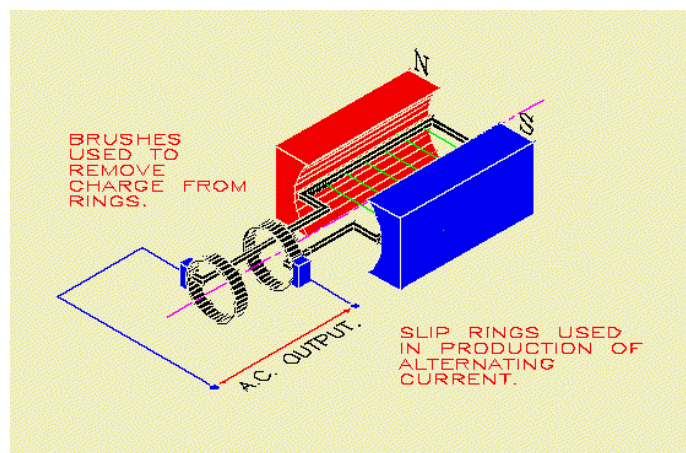
Gambar 2.3 Tempat Generator Listrik pada PLTA

Pada PLTA, generator digerakkan oleh tenaga air. Air ini ditampung pada sebuah dam dan dialirkan melalui pipa ke turbin generator untuk memutar turbin tersebut, sehingga rotor generator berputar. Akibat perputaran rotor pada generator ini, maka timbul tegangan pada kumparan jangkar generator. Bentuk gambaran tempat penggunaan generator pada PLTA ini diperlihatkan pada Gambar 2.3 dan Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Turbin

Generator dapat menghasilkan energi listrik karena adanya pergerakan relatif antara medan magnet homogen terhadap kumparan jangkar pada generator (magnet yang bergerak dan kumparan jangkar diam, atau sebaliknya magnet diam sedangkan kumparan jangkar bergerak). Jadi, jika sebuah kumparan diputar pada kecepatan konstan pada medan magnet homogen, maka akan terinduksi tegangan sinusoidal pada kumparan tersebut. Medan magnet homogen ini bisa dihasilkan oleh kumparan yang dialiri arus DC atau oleh magnet tetap. Contoh bentuk gambaran sederhana proses pembangkitan energi listrik pada generator sinkron dapat diperlihatkan seperti pada Gambar 2.5 (Zuriman, 2018).



Gambar 2.5 Proses Pembangkitan Energi Listrik pada Generator Sinkron

2.3 Transformator

Transformator merupakan suatu alat listrik statis, yang dipergunakan untuk memindahkan daya dari satu rangkaian ke rangkaian lain, dengan mengubah tegangan, tanpa mengubah frekuensi. Dalam bentuknya yang paling sederhana transformator terdiri atas dua kumparan dan satu induktansi mutual. Kumparan primer adalah yang menerima daya, dan kumparan sekunder tersambung pada beban. Kedua kumparan dibelit pada suatu inti yang terdiri atas material magnetic berlaminasi. Transformator yang digunakan pada sebuah pembangkit dapat dilihat pada Gambar 2.6 (Fernandez, 2020).



Gambar 2.6 Transformator Daya

2.4 Sistem Proteksi Tenaga Listrik

Proteksi mempunyai fungsi untuk mengamankan alat atau mesin yang digunakan pada suatu sistem tenaga listrik khususnya mengamankan dari arus gangguan yang dapat menyebabkan alat menjadi rusak. Sistem proteksi juga harus dapat menjaga keandalan sistem maupun kualitas penyaluran daya yang terdapat di bagian yang tidak terganggu (Fitrizawati, Nurhadiyono, & Efendi, 2018).

a. Filosofi dan Kualitas Sistem Proteksi

Filosofi dasar dari sistem proteksi adalah bagaimana melindungi sistem tenaga listrik dari akses gangguan yang terjadi pada sistem, dengan cara memisahkan gangguan tersebut dari sistem lainnya dengan cepat dan tepat.

Kualitas dari sistem proteksi yang diinginkan adalah cepat, sensitif, selektif, dan andal:

Cepat berarti, reaksi sistem proteksi tersebut harus secepat mungkin memisahkan daerah yang terganggu dari sistem lainnya, tanpa menimbulkan hal-hal lain yang menimbulkan bentuk gangguan baru pada sistem.

Sensitif berarti, sistem proteksi tersebut harus bereaksi terhadap gangguan yang bagaimanapun kecilnya selama gangguan tersebut termasuk dalam tugasnya.

Selektif berarti, sistem proteksi tersebut harus bereaksi dengan tepat, sehingga yang dipisahkan dari sistem hanya bagian yang terganggu, tanpa menyebabkan bagian lain yang tidak seharusnya terpisah dari sistem turut dipisahkan dari sistem.

Andal berarti, sistem proteksi tersebut akan bekerja sesuai dengan apa yang diharapkan, dimana keandalan dapat mengacu pada konsep “*security*” atau “*dependability*”.

Keandalan dengan konsep *security* berarti, suatu kepastian bahwa sistem proteksi tidak akan salah operasi, yang berarti sistem proteksi tidak akan bereaksi terhadap gangguan yang bukan diperuntukkan kepadanya, bagaimanapun besarnya gangguan tersebut; sedangkan **keandalan dengan konsep *dependability*** berarti suatu kepastian bahwa sistem proteksi pasti bereaksi untuk kondisi yang dirasakan sebagai gangguan. Dalam banyak sistem kedua hal diatas tidak mungkin kedua duanya dipenuhi 100%, sehingga banyak sistem yang merupakan sistem kompromi antara keduanya.

Kesederhanaan, dimana digunakan peralatan dan rangkaian yang sederhana akan tetapi tujuan tercapai.

Ekonomis, dimana dengan biaya yang minimum dapat dicapai fungsi proteksi yang maksimum.

b. Komponen yang terdapat pada sistem proteksi

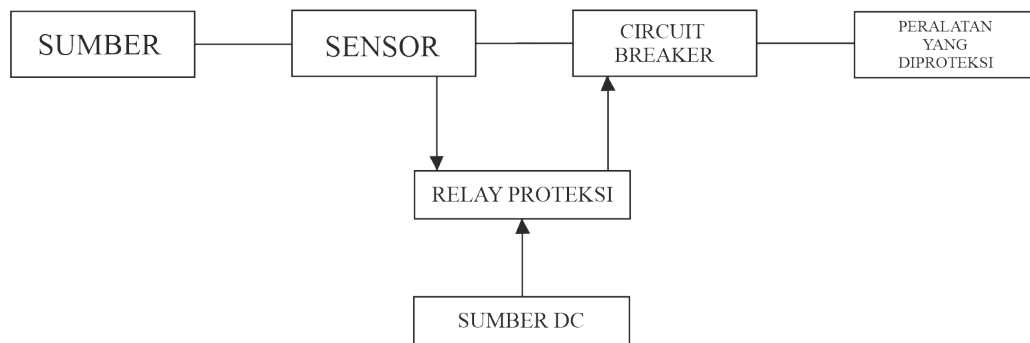
Komponen yang terdapat dalam sistem proteksi adalah:

1. Peralatan yang diproteksi.
2. *Sensor*, yang mendeteksi perubahan parameter sistem dari peralatan yang diproteksi.
3. Relai Proteksi, yang merupakan otak yang mengevaluasi apakah perubahan parameter tersebut sudah dapat diklasifikasikan sebagai kondisi gangguan atau tidak, dan apabila hasil evaluasi tersebut dianggap sebagai gangguan maka rele proteksi tersebut akan mengeluarkan pertanda bahwa ada kondisi gangguan atau perintah eksekusi trip (membuka) *circuit breaker* yang terkait.
4. *Circuit Breaker* adalah alat untuk menghubungkan atau memisahkan peralatan yang diproteksi dari sistem. Sumber DC, pada *static relay*, *digital relay* dan *numeric relay*, sumber DC merupakan sumber daya untuk mengaktifkan rangkaian operasi dari rele, sedangkan pada rele elektromekanik, hal ini tidak dibutuhkan. Sumber DC ini pun, pada umumnya dipakai sebagai sumber daya untuk *closing* dan *tripping coil*

pada CB, meskipun ada juga CB yang masih memakai sumber AC untuk kebutuhan tersebut.

5. Kawat penghantar, merupakan penghantar informasi antara peralatan-peralatan tersebut.

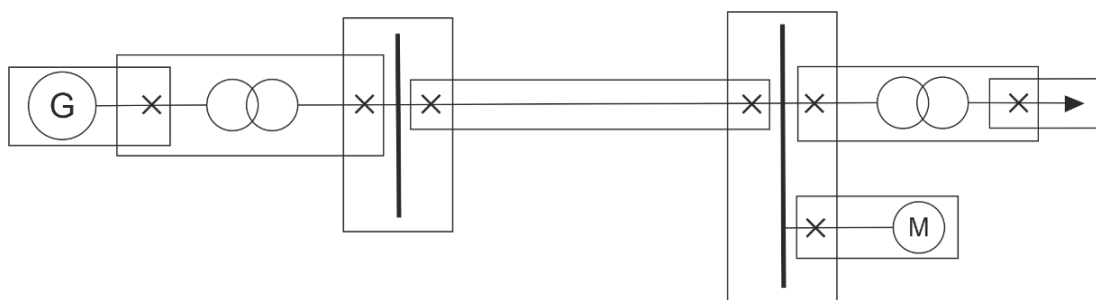
Komponen-komponen yang terdapat dalam sistem proteksi dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Komponen-Komponen Sistem Proteksi

c. Daerah Asuhan Proteksi (*Protection Zone*)

Kualitas sistem proteksi salah satunya adalah selektifitas, untuk memenuhi hal tersebut sistem tenaga listrik dibagi atas daerah-daerah asuhan proteksi, dimana pada setiap daerah asuhan proteksi tersebut terdapat relai proteksi yang berfungsi untuk mendeteksi dan memisahkan bagian tersebut dari sistem lainnya apabila terjadi gangguan pada daerah tersebut. Cara yang umum dikenal dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Daerah Asuhan Proteksi

d. Proteksi utama dan proteksi penyanggah

Pada umumnya, dalam suatu daerah asuhan proteksi terdapat sistem proteksi yang berfungsi sebagai proteksi utama dan proteksi penyanggah. Proteksi utama (*main protection*), adalah sistem proteksi yang pertama kali bereaksi apabila

terjadi gangguan di dalam daerah asuhan proteksinya, dialah yang memberikan perintah untuk melakukan pengisoliran sistem yang terganggu, yang berada di dalam daerah proteksi tersebut dari sistem lainnya secara sempurna. Hal ini dilakukan dengan membuka semua CB yang berada di dalam daerah asuhannya, baik yang dialiri arus hubung singkat.

Proteksi penyanggah (*back-up protection*), adalah sistem proteksi yang harus bereaksi untuk mengisolir sistem yang terganggu tersebut, apabila proteksi utama gagal mengisolir gangguan tersebut. Dimana pengisolasian tersebut dilakukan dengan hanya membuka CB yang dilewati oleh arus hubung singkat. Proteksi penyanggah ada yang berada pada daerah asuhan proteksi yang sama (*local back-up*), atau pada daerah asuhan proteksi yang lain (*remote back-up*). Apabila *local back-up* yang berfungsi, maka daerah yang di-isolir sama dengan daerah yang di-isolir oleh proteksi utama, sedangkan bila *remote back-up* yang berfungsi maka daerah yang akan terisolir selain daerah proteksi dimana gangguan itu terjadi, bagian dari sistem yang dialiri oleh arus hubung singkat yang berada pada sisi hilir *remote back-up* tersebut akan turut terisolir (Sonny & Sarma, 2015).

Di saat gangguan terjadi pada sistem tenaga listrik maka relai yang digunakan kinerjanya harus selektif dan cepat dalam memutuskan arus gangguan. Relai yang akan bekerja adalah relai yang terdekat dari titik gangguan. Apabila relai tersebut tidak berhasil maka relai *backup* yang kemudian akan dioperasikan. Oleh karena itu, maka perlu koordinasi yang baik antar relai yang digunakan oleh sistem tersebut (Itsna Nurul Rahmani, 2020).

2.5 Gangguan Sistem Tenaga Listrik

Terjadinya gangguan pada sistem tenaga listrik disebabkan oleh arus yang mengalir mempunyai nilai yang lebih besar melebihi kapasitas nilai arus maksimum yang diizinkan menuju ke titik gangguan yang kemudian akan menyebabkan kerusakan peralatan karena panas berlebih.

Terdapat beberapa jenis gangguan sistem tenaga listrik yaitu gangguan elektris, gangguan mekanis, gangguan sistem dan gangguan akibat operasi sistem. Gangguan elektris adalah jenis gangguan yang ditimbulkan oleh aliran listrik itu sendiri, contohnya gangguan hubung singkat pada fasa-fasanya, gangguan *overload* atau beban berlebih, dan gangguan *overvoltage* atau tegangan berlebih.

Sedangkan gangguan mekanis adalah jenis gangguan yang disebabkan oleh adanya peralatan yang rusak atau bisa juga yang berhubungan dengan ketahanan fisiknya yang berkurang.

a. Gangguan Beban Lebih

Gangguan beban lebih bisa terjadi diakibatkan oleh arus yang melebihi arus nominalnya ($>I_n$). Gangguan ini mengakibatkan naiknya temperatur pada peralatan yang terpasang kemudian menjadi *overheating* (panas berlebih), dan jika dibiarkan terus menerus maka peralatan listrik tersebut akan mengalami kerusakan.

b. Gangguan Hubung Singkat

Jenis gangguan hubung singkat bisa diklasifikasikan menjadi dua yaitu hubung singkat simetris atau seimbang (*balances fault*) dan hubung singkat asimetris atau tidak seimbang (*unbalance fault*). Gangguan tersebut akan menyebabkan arus lebih mengalir menuju fasa dan akan terjadi tegangannya bertambah besar. Ada beberapa jenis gangguan asimetris yaitu gangguan hubung singkat antara fasa dan gangguan hubung singkat antar fasa dengan tanah.

Ketika arus hubung singkat terjadi akan mengalir arus yang sangat besar secara tiba-tiba dan cepat menuju ke titik gangguan. Besarnya nilai reaktansi rangkaian dan reaktansi sumber di titik gangguan akan mempengaruhi besarnya nilai arus yang mengalir. Terjadinya gangguan hubung singkat dapat mengakibatkan peralatan listrik akan menjadi rusak, stabilitas daya akan berkurang dan terganggunya penyaluran daya yang diakibatkan karena PMT atau CB (*circuit breaker*) terbuka. Analisa hubung singkat biasa digunakan untuk mengidentifikasi dan menetapkan nilai standar dari peralatan yang digunakan pada sistem kelistrikan pada pembangkit maupun industri. Selain itu analisa hubung singkat juga digunakan untuk acuan menentukan koordinasi pada sistem proteksi. Contoh peralatan tersebut adalah PMT atau *circuit breaker*, busbar, kabel, generator, transformator dan lainnya.

c. Sumber Arus Hubung Singkat

Sumber arus hubung singkat dapat disebabkan oleh peralatan atau mesin yang digunakan, seperti contoh generator, motor dan sistem *utility*. Salah satu sumber terjadinya arus hubung singkat adalah generator dimana saat terjadi hubung

singkat *prime mover* terus beroperasi dan eksitasi juga beroperasi untuk mempertahankan kecepatan putar dari *prime mover* tersebut. Hal tersebut akan menyebabkan pengaruh yang besar terhadap gangguan hubung singkat.

d. Perhitungan Arus Hubung Singkat

Pada sistem tenaga listrik saat terjadi arus hubung singkat maka dapat mengakibatkan peralatan pada sistem tenaga listrik tersebut mengalami kerusakan. Seringkali nilai arus hubung singkat lebih besar daripada nilai arus bebannya. Karena nilai *magnitude* besar maka mengakibatkan rusaknya operasi sistem tenaga listrik pada keadaan normal. Dimulai dengan arus hubung singkat yang mengalir pada sistem konduktor kemudian timbul panas, akan tetapi sistem tersebut tidak didesain untuk mempertahankan dari kondisi seperti ini. Arus tersebut menyebabkan konduktor mengalami kerusakan mekanis misalnya isolatornya bocor, kumparan transformator terdistorsi, atau kerusakan fisik yang lain. Apabila arus hubung singkat yang tinggi ini mengalir menuju sistem impedansi maka akan menyebabkan tegangan rendah yang abnormal, yang jika dibiarkan akan berakibat harus menonaktifkan secara paksa peralatan lain yang sedang bekerja. Sehingga arus hubung singkat juga didefinisikan sebagai energi lepas yang berbentuk api jika dibiarkan terus menerus akan menyebabkan penyebaran titik kebakaran menjauh dari titik awalnya (Itsna Nurul Rahmani, 2020).

Arus hubung singkat adalah arus lebih yang dihasilkan oleh gangguan dengan mengabaikan impedansi antara titik-titik pada potensial yang berbeda, dalam kondisi layanan normal. Arus ini bertujuan untuk menentukan besarnya arus pendek yang dapat timbul pada suatu sistem tenaga listrik, sehingga mampu memberikan aksi terhadap persamaan besarnya arus yang dapat melewati pada suatu sistem dengan ranting ketahanan peralatan di dalam sistem tersebut melalui suatu alat proteksi arus lebih sehingga terhindar dari arus yang dapat merusaknya.

Arus hubung singkat merupakan arus lebih yang disebabkan oleh gangguan impedansi yang sangat kecil mendekati nol antara dua penghantar aktif yang dalam kondisi normal berbeda potensialnya. Nilai reaktansi sumber dan nilai reaktansi saluran yang dialirinya sangat mempengaruhi terjadinya arus hubung singkat. Cycle pertama kali disebut reaktansi subtransien (X''_d) dimana nilai

reaktansinya sangat kecil dan arus hubung singkat sangat tinggi. Kemudian cycle kedua adalah reaktansi transien ($X'd$) dimana arus hubung singkat mulai menurun. Cycle yang terakhir disebut reaktansi sinkron (X_d) dimana arus sudah mencapai steady state. Gangguan arus hubung singkat yang dapat terjadi pada generator adalah sebagai berikut (Rachmawan, 2020).

Hubung Singkat 3 Fasa

Terjadinya gangguan hubung singkat 3 fasa simetris akan menyebabkan kenaikan arus pada generator. Arus gangguan mengakibatkan terbakarnya isolasi yang pada akhirnya menimbulkan kerusakan yang fatal pada mesin. Besarnya arus gangguan ini tidak saja dipengaruhi oleh besarnya reaktansi-reaktansi generator tetapi juga oleh impedansi dari sistem tenaga, dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.1 berikut:

$$I_{hs} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_f} \dots\dots\dots (2.1)$$

Hubung Singkat 2 Fasa

Arus hubung singkat antar fasa tanpa dihubungkan ke tanah dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.2 berikut:

$$I_{hs} = \frac{\sqrt{3} E_a}{Z_1 + Z_2} \dots\dots\dots (2.2)$$

Hubung Singkat Satu Fasa Dengan Tanah

Gangguan ini karena satu buah fasa pada sistem tenaga listrik hubung singkat dengan tanah. Dapat dihitung dengan Persamaan 2.3 berikut:

$$I_{hs} = \frac{3E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan:

I_{hs} = Arus hubung singkat

E_a = Tegangan fasa netral

Z_0 = Impedansi urutan nol

Z_1 = Impedansi urutan positif

Z_2 = Impedansi urutan negatif

Z_f = Impedansi gangguan hubung singkat

e. Trafo Arus (*Current Transformer*)

Transformator arus adalah salah satu komponen proteksi yang dikenal sebagai sensor, yang fungsinya adalah:

1. Mengkonversi arus primer ke arus sekunder yang besarnya sesuai dengan standar arus untuk pengukuran dan proteksi, yang dikenal secara umum adalah 5 A, 1 A, dan 0,5 A.
2. Mengisolir peralatan pengukuran dan peralatan proteksi dari tegangan primer (Sonny & Sarma, 2015).

f. Relai Proteksi

Relai adalah peralatan proteksi sistem tenaga listrik yang fungsinya untuk memberikan sinyal kepada PMT atau CB supaya memutus atau menyalurkan daya listrik saat terjadi gangguan. Rele tersebut akan memberikan sinyal terhadap PMT agar memutus bagian tertentu. Oleh sebab itu tidak menimbulkan pengaruh terhadap kerja sistem tenaga listrik secara keseluruhan. Rele pengaman ini terdiri dari sebuah elemen operasi dan seperangkat kontak. Elemen ini berguna agar memperoleh inputan dari transformator CT maupun PT.

Untuk beberapa kasus, relai berfungsi untuk mengukur atau membandingkan operasi dasar masukan kemudian mengubah ke dalam bentuk gerakan kontak. Keluaran dari relai ini yaitu close dan menahan. Apabila kondisi CB menutup maka relai akan mengirimkan sinyal agar melakukan proses pembukaan dari circuit breaker dimana pada waktunya akan mengamankan gangguan dari daerah sistem tenaga listrik lain yang normal (Itsna Nurul Rahmani, 2020).

Relai Arus Lebih

Relai arus lebih merupakan rangkaian peralatan relai pengamanan yang dapat memberikan respon terhadap kenaikan arus yang melewati nilai arus yang telah ditentukan rangkaian yang diamankan. Relai arus lebih merupakan relai pekerja yang tertuju pada arus lebih dan relai ini bekerja jika arus yang mengalir melewati nilai settingnya dari ambang batas. Ambang batas adalah arus yang ditetapkan dimana relai tidak boleh beroperasi di bawah settingannya dan di atasnya harus beroperasi (Uma & Onwuka, 2014).

Prinsip kerja relai arus lebih ini bekerja pada arus lebih, relai akan bekerja apabila arus yang mengalir melewati nilai settingannya (I_s) (Timotius, 2016).

Relai akan bekerja apabila memenuhi kondisi sebagai berikut:

$I_f > I_p$ relai bekerja (*trip*)

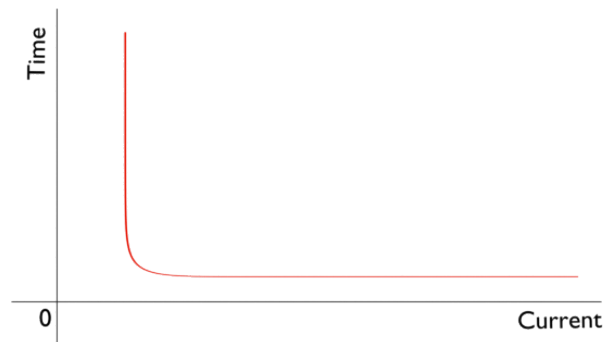
$I_f < I_p$ tidak bekerja (*block*)

I_p adalah arus kerja yang didapatkan dengan berdasarkan kumparan sekunder dari transformator arus (CT). Sedangkan I_f adalah arus gangguan yang juga didapatkan dengan berdasarkan kumparan sekunder CT. Relai arus lebih ini akan melindungi seluruh bagian pada sistem tenaga listrik misalnya jaringan transmisi, motor, generator, dan transformator. Relai arus lebih terbagi menjadi beberapa yaitu relai arus lebih waktu instan, relai arus lebih waktu invers, dan relai arus lebih waktu tertentu (Itsna Nurul Rahmani, 2020).

Jenis karakteristik relai arus lebih antara lain:

a. Relai waktu seketika (*Instantaneous relay*)

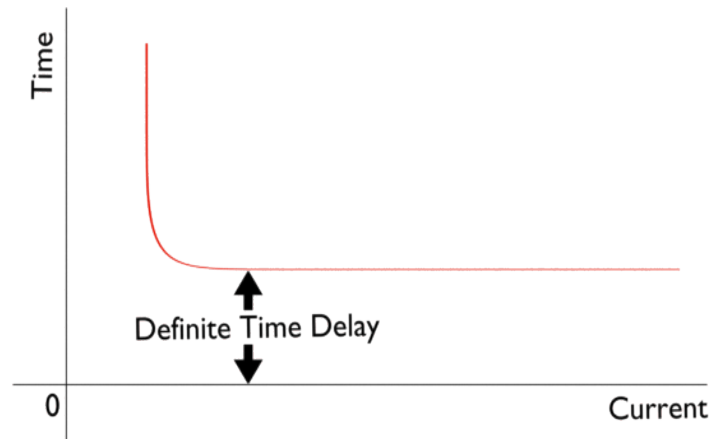
Relai akan beroperasi seketika (tanpa waktu tunda) ketika arus yang mengalir melebihi nilai settingnya maka relai akan bekerja dalam waktu beberapa mili detik (10 – 20 ms). Kurva karakteristik relai *instantaneous* dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Karakteristik Relai Waktu Seketika (*Instantaneous Relay*).

b. Relai arus lebih waktu tertentu (*Definite time relay*)

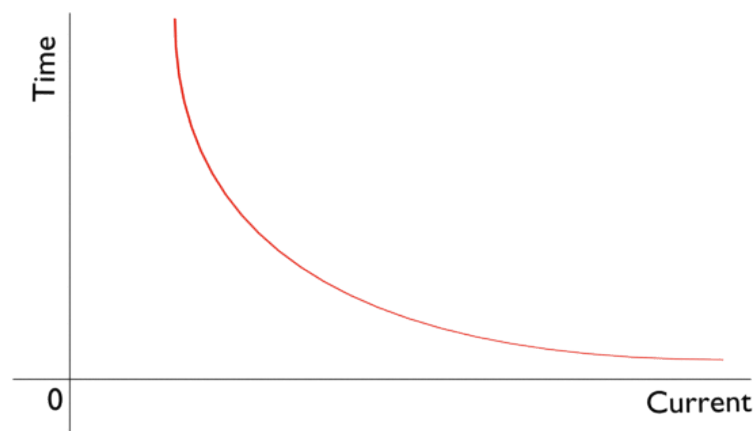
Relai akan memberikan perintah pada PMT ketika saat terjadinya gangguan hubung singkat dan besarnya arus gangguan melebihi nilai settingnya (I_s), dan jangka waktu kerja relai mulai pick up sampai kerja relai diperpanjang dengan waktu tertentu tidak tergantung besarnya arus yang mengerjakan rel. Kurva karakteristik relai *definite* dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Karakteristik Relai Waktu Tertentu (*Definite time relay*)

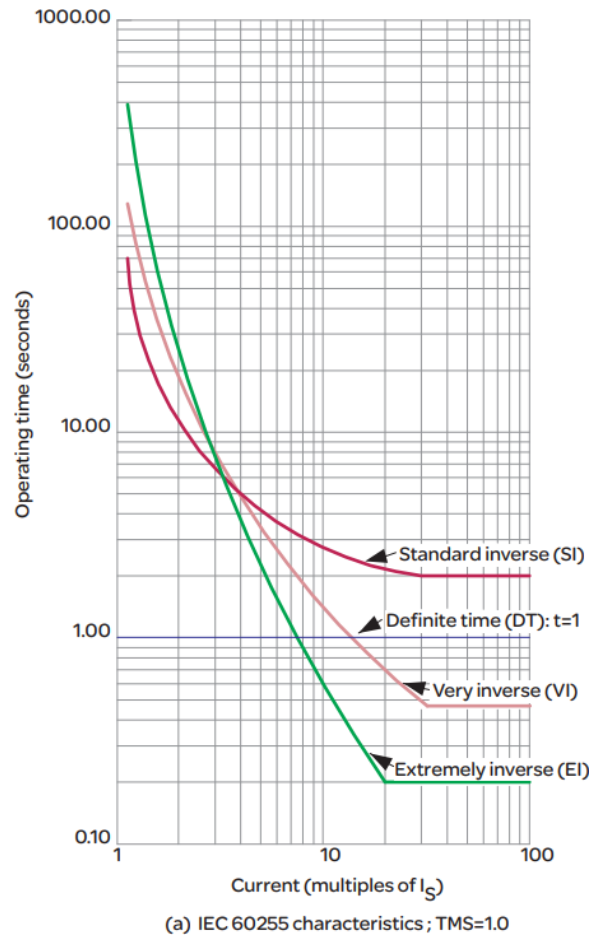
c. Relai arus lebih waktu terbalik (*Inverse relay*)

Relai akan beroperasi dengan waktu tunda yang tergantung dari besarnya arus secara terbalik (*inverse time*), semakin besar arus maka semakin kecil waktu tundanya. Karakteristik waktunya dibedakan dalam tiga kelompok yaitu *standar invers*, *very inverse*, dan *extremely inverse*. Kurva karakteristik relai invers dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Karakteristik Relai Waktu Terbalik (*Inverse relay*)

Berdasarkan standar IEC 60255 dengan TMS 1, gambar kurva yang ditunjukkan pada Gambar 2.12 merupakan kurva hubung singkat berdasarkan waktu kerjanya.



Gambar 2.12 Karakteristik Kerja Relai Arus Lebih

Tabel 2.1 Konstanta Karakteristik *Setting* Waktu Sesuai Standar PLN 2005

No	Deskripsi	K	E	C
1	<i>Definite time</i>			0-100
2	<i>Standar inverse</i>	0,14	0,02	0
3	<i>Very inverse</i>	13,5	1	0
4	<i>Extremely inverse</i>	80	2	0

Maka *setting* waktunya dapat dilihat pada Persamaan 2.4 berikut:

$$t = TMS \times \frac{K}{\left[\frac{I_f}{I_s}\right]^E - 1} \dots\dots\dots (2.4)$$

Sehingga untuk

a) *Standar inverse*

Untuk *setting* waktu menggunakan *standar inverse* pada Persamaan 2.5 berikut:

$$t = TMS \times \frac{0,14}{\left[\frac{I_f}{I_s}\right]^{0,02} - 1} \dots\dots\dots (2.5)$$

b) *Very inverse*

Untuk setting waktu menggunakan *very inverse* pada Persamaan 2.6 berikut:

$$t = TMS \times \frac{13,5}{\left[\frac{I_f}{I_s}\right]^{-1}} \dots\dots\dots (2.6)$$

c) *Extremely Inverse*

Untuk setting waktu menggunakan *extremely inverse* pada Persamaan 2.7 berikut:

$$t = TMS \times \frac{80}{\left[\frac{I_f}{I_s}\right]^2 - 1} \dots\dots\dots (2.7)$$

Keterangan:

- t = waktu sebenarnya *relay* beroperasi
 Tms = setting waktu untuk *relay* beroperasi
 E dan K = konstanta (pada Tabel 2.1)
 I_f (*fault*) = arus gangguan
 I_s = arus setting

Setting Arus

Setting arus input yaitu untuk menentukan seberapa besarnya arus (I). arus input berasal dari trafo arus (CT) yang bersangkutan dan nilainya tergantung terhadap keadaan sistem apakah keadaan normal atau ada gangguan. Pada saat ada gangguan besarnya arus bervariasi antara arus hubung singkat minimum atau arus hubung singkat maksimum. Setting arus input dipilih pada nilai arus (I_s). Jika besar arus melebihi I_s maka *relay* akan trip – Arus setting bisa diperoleh dengan memilih salah satu posisi sadapan arus (*current tap*) yang tersedia di *relay*.

Batas penyetelan relai arus lebih adalah relai tidak bekerja pada saat beban maksimum. Oleh karena itu, setting arusnya harus lebih besar dari arus beban maksimum. Bila dilihat dari kurva yaitu relai sebaiknya relai berada disebelah kanan kurva beban maksimum. Relai arus lebih memiliki setelan pickup dan setelan time dial. Pada relai arus lebih, besarnya arus pickup ini ditentukan dengan pemilihan tap. Adapun untuk menentukan besarnya tap yang digunakan dapat menggunakan rumus pada Persamaan 2.8 berikut:

$$Tap = \frac{I_{set}}{CT\ primer} \dots\dots\dots (2.8)$$

Arus pick up atau arus kerja adalah nilai arus dimana *relay* harus bekerja dan menutup kontakannya sehingga waktu *relay* trip (bekerja) Menurut standar British BS 142 batas penyetelannya adalah 1.05-1.3 Iset. Koordinasi antara relai

pengaman utama dan relai pengaman cadangan (*backup*) tidak boleh bekerja secara bersamaan. Untuk itu, diperlukan adanya time delay antara relai utama dan relai cadangan (*backup*). Time delay ini sering dikenal sebagai setelan setting kelambatan waktu (Δt) atau *grading time*. Perbedaan waktu kerja minimal antara relai utama dan relai backup Berdasarkan standar IEEE Std 242-1986 (batas waktu kerja antara dua buah relai: 0,2 s – 0,4 s). Perhitungan setting *relay* arus lebih dapat dilihat pada Persamaan 2.9, 2.10, 2.11 di bawah ini (Rahardani, 2015):

$$I_n = \frac{S}{V\sqrt{3}} \dots\dots\dots (2.9)$$

$$I_s \text{ Primer} = 1,1 \times I_n \dots\dots\dots (2.10)$$

$$I_s \text{ Sekunder} = I_s \text{ primer} \times \frac{CT \text{ Sekunder}}{CT \text{ Primer}} \dots\dots\dots (2.11)$$

Keterangan:

I_n = Arus Nominal (A)

S = Daya (KVA)

V = Tegangan (KV)

I_s = Arus seting relai(A)

2.6 Proteksi Generator

Untuk menjelaskan bentuk dan keadaan gangguan yang ada pada generator, maka perlu diketahui bahwa generator pada pembangkit mempunyai fungsi menghasilkan energi listrik. Untuk melakukan fungsinya akan sangat mungkin terjadi gangguan dari luar ataupun dari bagian dalam generator. Gangguan yang mungkin terjadi pada generator bisa disebabkan oleh hal-hal seperti hubung singkat antar fasa, hubung singkat fasa ke tanah, hubung singkat berbalikan dalam satu fasa, hubung singkat kumparan rotor ke tanah, beban lebih, panas berlebihan pada kumparan, hilangnya medan penguat, atau bisa terjadi karena yang bekerja pada generator tersebut hanya satu fasa saja (Bachtiar, 2006).

Ada beberapa jenis proteksi yang digunakan untuk mengamankan generator, antara lain:

a. Proteksi Diferensial

Proteksi ini adalah proteksi utama pada peralatan yang bekerja berdasarkan perbandingan besar dan fasa arus yang masuk dan meninggalkan rangkaian atau peralatan yang diproteksi. Pada generator proteksi ini dipakai untuk

mengisolir gangguan hubung singkat antara fasa dengan fasa. Proteksi ini mampu bekerja dengan cara mendeteksi perbedaan arus yang timbul pada titik netral dan pada terminal generator.

b. Proteksi Arus Lebih

Dinamakan proteksi arus lebih dikarenakan proteksi akan bekerja apabila pada rangkaian tersebut terjadi kenaikan arus atau arus berlebih yang mengalir melebihi arus setting. Karena keandalan kerja yang baik proteksi ini banyak digunakan terutama untuk melindungi generator akibat gangguan hubung singkat yang menyebabkan arus lebih. Proteksi arus lebih pada generator juga digunakan untuk mengamankan akibat beban lebih yang bisa menyebabkan arus yang mengalir ke stator menjadi besar yang akan membahayakan kinerja generator.

c. Proteksi Beban Lebih

Proteksi ini sering digunakan untuk melindungi generator dari gangguan beban lebih, dikarenakan proteksi ini akan bekerja apabila pada 20-25% arus beban lebih diatas arus nominal dan hanya ditempatkan pada satu fasa.

d. Proteksi Tegangan Lebih

Proteksi tegangan lebih dipakai pada generator untuk pemakaian generator yang ada di pusat pembangkit yang menggunakan tenaga air sebagai penggerak mulanya, jika beban diputuskan dari generator maka putaran penggerak akan berputar dengan sangat cepat menyebabkan tegangan menjadi besar.

e. Proteksi *Loss of Field*

suatu proteksi yang bekerja jika dilalui arus dan tegangan listrik yang mendeteksi terjadinya hilang atau berkurangnya medan magnet pada stator generator.

f. Proteksi Frekuensi Lebih

Proteksi frekuensi lebih merupakan proteksi yang bekerja jika dilalui tegangan listrik nominalnya dengan frekuensi melebihi batas setting frekuensi yang telah ditentukan.

g. Proteksi *Negative Phase Sequence*

Negative phase sequence merupakan proteksi yang bekerja jika dilalui arus dengan urutan fasa berlawanan sehingga melebihi batas setting arus yang telah ditentukan (Itsna Nurul Rahmani, 2020).

2.7 Gangguan Pada Transformator

Gangguan Dalam

- Gangguan pada sistem pendingin

Transformator daya mempergunakan minyak transformator sebagai isolasi yang sekaligus merupakan bahan pendingin. Jika terjadi gangguan atau kerusakan di dalam transformator, maka dalam minyak transformator akan terbentuk sejumlah gas.

- Arus sirkulasi pada transformator
- Gangguan hubung singkat

Pada umumnya gangguan ini dapat dideteksi karena akan selalu timbul arus maupun tegangan yang tidak normal/tidak seimbang. Jenis gangguan ini antara lain yaitu, Gangguan hubung singkat antara fasa dengan tanah, gangguan hubung singkat antara fasa dengan fasa, dan kerusakan pada isolator transformator.

Gangguan Luar

Jenis gangguan luar (*external fault*) ini dapat dibedakan menjadi dua macam, yaitu:

- Hubung singkat luar

Jenis hubung singkat jenis ini terjadi di luar transformator daya, misalnya: hubung singkat di bus, hubung singkat di feeder dan gangguan hubung singkat di sistem yang merupakan sumber bagi transformator daya tersebut. Gangguan ini dapat dideteksi karena timbulnya arus yang sangat besar, mencapai beberapa kali arus nominalnya

- Beban luar (*overload*)

Transformator daya dapat beroperasi secara terus menerus pada beban nominalnya. Apabila beban yang dilayani lebih besar dari kapasitas transformator daya maka akan terjadi pemanasan lebih. Kondisi ini memungkinkan tidak segera menimbulkan kerusakan pada

transformator daya, tetapi apabila berlangsung secara terus-menerus akan mengakibatkan umur isolasi menjadi pendek.

- Keadaan beban lebih berbeda dengan keadaan arus lebih

Pada beban lebih, besar arus hanya kira-kira 10% di atas nominal dan dapat diputuskan setelah berlangsung beberapa puluh menit. Sedangkan pada arus lebih, besar arus mencapai beberapa kali arus nominal dan harus secepat mungkin diputuskan (Fernandez, 2020).

2.8 Penggunaan *Software* ETAP

Perangkat lunak ETAP (*Electric Transient and Analysis Program*) merupakan suatu perangkat lunak yang digunakan untuk mendukung menyelesaikan permasalahan pada sistem tenaga listrik. ETAP merupakan piranti (*tools*) analisis yang paling komprehensif untuk desain dan pengujian sistem tenaga listrik. Perangkat ini mampu bekerja dalam keadaan offline maupun online. Kondisi offline dapat digunakan untuk berbagai simulasi tenaga listrik. Sedangkan kondisi online digunakan untuk pengelolaan data real-time atau untuk mengendalikan sistem secara real-time. Dengan menggunakan modul standar pada simulasi offline, ETAP dapat memanfaatkan data operasi real-time untuk pemantauan lanjutan, simulasi real-time, Optimasi, sistem manajemen energi, dan pelepasan beban secara cepat.

ETAP telah dirancang dan dikembangkan untuk menangani beragam sistem tenaga listrik yang berbeda dalam satu paket terintegrasi dengan berbagai tampilan antarmuka. ETAP memungkinkan Anda untuk dengan mudah membuat dan mengedit diagram garis tunggal (SLD), sistem kabel bawah tanah, sistem kabel tiga dimensi, dan skema sistem informasi geografis. Program ini dirancang untuk menggabungkan tiga konsep utama yaitu: *Software* ETAP dapat digunakan untuk menganalisis beberapa permasalahan di bidang sistem tenaga listrik diantaranya:

- Analisa aliran daya
- Analisa hubung singkat
- *Arc Flash Analysis*
- Starting motor
- Koordinasi proteksi

- Analisa kestabilan transien, dll. (Sukisno, 2020)

2.9 Penelitian Terdahulu

Dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Sherdian Sukma Rahardani pada tahun 2015 yang berjudul Studi Koordinasi Sistem Proteksi Pada PLTA PT. PJB Unit Pembangkitan Cirata dapat diambil kesimpulan bahwa pada pengaturan relai arus lebih gangguan fasa tipikal 1, relai 14 dan relai 9 bekerja secara bersama maka perlu diatur ulang untuk mendapatkan koordinasi yang lebih baik dengan menjadikan relai 9 untuk backup dari relai 14. Nilai dari high set pada tipikal 1 juga harus diatur untuk menjauhi titik inrush dari transformator HTR1, oleh karena itu saat trip terjadi di daerah gangguan yang terdeteksi tidak terlalu luas. Rele 15 dan 28 perlu diperhatikan time delay untuk menjaga kontinuitas daya jika gangguan terjadi. Rele 28 nilai time delay lebih kecil dari nilai time delay relai 15, hal tersebut tidak sesuai dengan koordinasi proteksi yang diinginkan (Rahardani, 2015).

Pada penelitian yang dilakukan oleh Anaa Istimaroh, Nasrun Hariyanto dan Syahril pada tahun 2013 yang berjudul Penentuan Setting Relai Arus Lebih Generator dan Relai Diferensial Transformator Unit 4 PLTA Cirata II membahas tentang bagaimana cara mengamankan generator unit 7 dan 8 dari gangguan arus lebih dan mengamankan transformator unit 4 dari gangguan hubung singkat yang mungkin terjadi di Cirata II. Agar perhitungan dan analisa gangguan menjadi mudah, maka sistem tersebut disimulasikan memakai software dan perhitungan manual. Relai pengaman yang terpasang dan disetting adalah relai arus lebih dan relai diferensial. Relai ini fungsinya untuk mengamankan arus gangguan fasa-tanah dan antar fasa. Apabila mengetahui arus gangguan tersebut maka diperoleh setting relai arus lebih generator untuk arus yang melewati relai 2,65 A dan waktu delay 0,068 detik. Untuk rele diferensial transformator menggunakan cara yang sama diperoleh arus diferensial sebesar 14,01 A (Istimaroh, Hariyanto, & Syahril, 2013).

Dari penelitian yang telah dilakukan oleh Aji Pranata pada tahun 2019 yang berjudul Analisis Sistem Proteksi *Relay* Arus Lebih Pada Generator Di Pusat PLTA Kedung Ombo dapat disimpulkan bahwa menghindari gangguan arus hubung singkat bisa dilakukan menggunakan penyetelan relai dan menetapkan

penyetelan relai arus lebih pada generator agar mempertahankan keandalan dan stabilitas sistem tenaga listrik serta untuk perlindungan dari kerusakan generator. Ketika melakukan pengujian perhitungan dan pengkajian data yang telah diambil, hasil akan diperbandingkan agar bisa mendapatkan hasil yang lebih baik serta aman untuk proteksi arus lebih pada generator. Tujuan dari penelitian ini agar dapat membandingkan *setting* hasil perhitungan dengan *setting* existing dari PLTA Kedung Ombo. Metode yang digunakan yaitu melakukan perhitungan secara manual, sehingga hasil perhitungan akan diperbandingkan dengan data existing yang diperoleh dari PLTA Kedung Ombo sendiri. Hasil dari perhitungan menunjukkan In (Arus Nominal) memiliki selisih sebesar 0,076%, Is (Arus *Setting*) memiliki selisih sebesar 40%, TMS (*Time Multiplier Setting*) memiliki selisih sebesar 60%, dan top (*Time Operation*) memiliki selisih sebesar 5%. (Pranata, 2019).

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Fitrizawati, Siswanto Nurhadiyono dan Nur Efendi pada tahun 2018 yang berjudul Analisis *Setting Relay* Proteksi Pengaman Arus Lebih Pada Generator (Studi Kasus di PLTU 2X300 MW CiIacap) dapat disimpulkan besar arus gangguan yang terjadi 1 fasa ke tanah sebesar 71465 A dan gangguan fasanya sebesar 53847 A oleh karena itu arus gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah yang dipakai dalam menghitung *setting* relai pengaman arus lebih supaya memperoleh sensitivitas dan keandalan relai, maka dari itu gangguan tersebut dapat terdeteksi dengan arus gangguan terkecil relai pengaman. Untuk *setting over current relay* pada generator unit 1 dengan arus *pickup* yang sama sebesar 6,14 A dan *setting* waktu 0,21 detik (Fitrizawati, Nurhadiyono, & Efendi, 2018).