

SKRIPSI

**STUDI *SETTING* RELAI ARUS LEBIH SISTEM PROTEKSI
GENERATOR DAN TRANSFORMATOR PLTA BAKARU
SEBELUM DAN SETELAH MASUKNYA PLTA MALEA**

Disusun dan diajukan oleh :

AISYA NURJIHAN

D041 18 1007



PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2023

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI**STUDI SETTING RELAI ARUS LEBIH SISTEM PROTEKSI
GENERATOR DAN TRANSFORMATOR PLTA BAKARU SEBELUM
DAN SETELAH MASUKNYA PLTA MALEA**

Disusun dan diajukan oleh:

AISYA NURJIHAN
D041 18 1007

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian
Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada Tanggal 15 September 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,

Prof. Dr. Ir. Indar Chaerah Gunadin, S.T., M.T., IPM.
NIP. 197311181998032001

Dr. Ir. Hj. Zaenab Muslimin, M.T.
NIP. 196602011992022002



Departemen Teknik Elektro,

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

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Aisya Nurjihan
NIM : D041181007
Program Studi : Teknik Elektro
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Studi setting relai arus lebih sistem proteksi generator dan transformator PLTA

Bakaru sebelum dan setelah masuknya PLTA Malea

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilalihan tulisan orang lain 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 mana pun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala risiko.

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 skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 15 September 2023

Yang Menyatakan,



D6FAKX704640026 Aisya Nurjihan

ABSTRAK

AISYA NURJIHAN. Studi Setting Relai Arus Lebih Sistem Proteksi Generator dan Transformator PLTA Bakaru Sebelum dan Setelah Masuknya PLTA Malea (dibimbing oleh Indar Chaerah Gunadin dan Zaenab Muslimin)

Sistem proteksi dengan relay pengaman dimaksudkan untuk mencegah kerusakan pada peralatan sistem tenaga listrik akibat adanya gangguan. Adanya penambahan pembangkit baru menyebabkan perubahan arus hubung singkat saat terjadi gangguan pada sistem tenaga listrik. Hal ini membutuhkan peningkatan kinerja dari sistem proteksi, salah satunya dengan melakukan perhitungan pengaturan kembali terhadap setting relai pengaman khususnya pada relai arus lebih (overcurrent relay). Penelitian ini bertujuan untuk menentukan arus hubung singkat dan setting relai arus lebih sistem proteksi generator PLTA Bakaru sebelum dan setelah masuknya PLTA Malea dengan daya 2×45 MW yang terinterkoneksi ke sistem SULBAGSEL. Hal ini dilakukan untuk memberikan informasi arus hubung singkat dan memberikan setting relai arus lebih sistem proteksi generator PLTA Bakaru sebelum dan setelah masuknya PLTA Malea. Data yang digunakan dalam penelitian ini berupa data sistem kelistrikan PT. PLN (Persero) UP2B Makassar, PT. PLN (Persero) UIKL Sulawesi dan ULPLTA Bakaru. Analisis data dilakukan pada simulasi aliran daya dan hubung singkat sistem sulbagsel pada busbar Bakaru 150 kV sebelum dan setelah masuknya PLTA Malea dengan dua skenario kasus. Kasus pertama membandingkan hasil nilai arus nominal dan arus setting relai arus lebih pada generator. Kasus kedua membandingkan hasil nilai arus hubung singkat pada busbar. Berdasarkan hasil simulasi dan perhitungan gangguan hubung singkat, diperoleh nilai arus hubung singkat pada busbar Bakaru 150 kV sebelum dan setelah masuknya PLTA Malea berturut-turut sebesar 4,395 kA dan 4,421 kA. Selanjutnya diperoleh arus setting relai arus lebih generator PLTA Bakaru unit 1 dan unit 2 sebelum masuknya PLTA Malea berturut-turut sebesar 3,34 kA dan 3,14 A, dengan setelah masuknya PLTA Malea berkurang menjadi sebesar 3,15 A dan 2,97 A.

Kata kunci : PLTA Bakaru, PLTA Malea, Relai arus lebih, Sistem Proteksi.

ABSTRACT

AISYA NURJIHAN. Study of Overcurrent Relay Settings for Generator and Transformer Protection Systems of Bakaru Hydropower Before and After the Entry of Malea Hydropower (supervised by Indar Chaerah Gunadin and Zaenab Muslimin)

The protection system with a safety relay is intended to prevent damage to the electric power system equipment due to disturbances. The addition of a new generator causes a change in the short circuit current when a disturbance occurs in the power system. This requires an increase in the performance of the protection system, one of which is by calculating the resetting of the safety relay settings, especially for overcurrent relays. This study aims to determine the short circuit current and overcurrent relay settings for the Bakaru hydropower generator protection system before and after the entry of the Malea hydropower plant with a power of 2 x 45 MW which is interconnected to the SULBAGSEL system. This is done to provide information on short circuit currents and to provide overcurrent relay settings for the Bakaru hydropower generator protection system before and after the entry of the Malea hydropower plant. The data used in this study is the electrical system data of PT. PLN (Persero) UP2B Makassar, PT. PLN (Persero) UIKL Sulawesi and ULPLTA Bakaru. Data analysis was carried out on the simulation of power flow and short circuit of the Sulbagsel system on the Bakaru 150 kV busbar before and after the entry of the Malea hydropower plant with two case scenarios. The first case compares the results of the nominal current value and the overcurrent relay setting current on the generator. The second case compares the results of the short circuit current values on the busbars. Based on the simulation results and short circuit fault calculations, the value of the short circuit current on the Bakaru 150 kV busbar before and after the entry of the Malea hydropower plant was 4.395 kA and 4.421 kA, respectively. Furthermore, the overcurrent relay settings for the Bakaru PLTA generator unit 1 and unit 2 before the Malea PLTA entered were respectively 3.34 kA and 3.14 A, with after the Malea PLTA entered it decreased to 3.15 A and 2.97 A .

Keywords : PLTA Bakaru, PLTA Malea, overcurrent relay, protection system.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT.....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR LAMPIRAN.....	ix
KATA PENGANTAR	x
BAB I PENDAHULUAN	1
1. 1 Latar Belakang	1
1. 2 Rumusan Masalah	3
1. 3 Tujuan Penelitian.....	4
1. 4 Manfaat Penelitian.....	4
1. 5 Batasan Masalah.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2. 1 Sistem Tenaga Listrik.....	5
2. 2 Pembangkit Listrik Tenaga Air	5
2. 3 Generator	6
2. 4 Sistem Proteksi Tenaga Listrik	7
2. 5 Gangguan Sistem Tenaga Listrik	10
2. 6 Proteksi Generator.....	20
2. 7 Penggunaan Software DigSilent.....	21
BAB III METODE PENELITIAN.....	23
3. 1 Judul Penelitian	23
3. 2 Lokasi dan Waktu Penelitian.....	23
3. 3 Alat dan Bahan	23
3. 4 Metode Pengambilan Data	23
3. 5 Metode Analisis Data	24

3. 6	Alur Penelitian.....	24
BAB IV HASIL PENELITIAN		26
4. 1	Tinjauan Sistem Proteksi Generator dan Transformator pada PLTA Bakaru.....	26
4. 2	Data Relai Arus Lebih Pada Generator dan Transformator	27
4. 3	Tinjauan PLTA Malea.....	28
4. 4	Hasil Simulasi Aliran Daya.....	28
4. 5	Perhitungan Arus Setting (<i>I_s</i>).....	30
4. 6	Simulasi Gangguan Hubung Singkat	32
4. 7	Perhitungan Waktu Operasi Relai	34
4. 8	Perubahan Daya Aktif PLTA Bakaru.....	37
4. 9	Perbandingan Nilai Arus <i>Setting</i> Relai Arus Lebih pada Generator dan Transformator PLTA Bakaru Sebelum dan Setelah Masuknya PLTA Malea.....	38
BAB V PENUTUP.....		40
5. 1	Kesimpulan.....	40
5. 2	Saran.....	40
DAFTAR PUSTAKA		42

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Sistem Tenaga Listrik	5
Gambar 2 Proses Konversi Energi PLTA	6
Gambar 3 Komponen-Komponen Sistem Proteksi	9
Gambar 4 Daerah Asuhan Proteksi	9
Gambar 5 Karakteristik Relai Waktu Seketika (<i>Instantaneous Relay</i>).....	15
Gambar 6 Karakteristik Relai Waktu Tertentu (<i>Definite time relay</i>).....	16
Gambar 7 Karakteristik Relai Waktu Terbalik (<i>Inverse relay</i>).....	16
Gambar 8 Karakteristik Kerja Relai Arus Lebih.....	17
Gambar 9 Kurva Saturasi/ Kejenuhan CT	20
Gambar 10 Diagram Alur Penelitian.....	25
Gambar 11 Simulasi output daya aktif PLTA Malea.....	28
Gambar 12 Simulasi aliran daya sebelum masuknya PLTA Malea.....	29
Gambar 13 Simulasi aliran daya setelah masuknya PLTA Malea.....	30
Gambar 14 Simulasi gangguan hubung singkat pada busbar Bakaru 150 kV sebelum masuknya PLTA Malea	33
Gambar 15 Simulasi gangguan hubung singkat pada busbar Bakaru 150 kV setelah masuknya PLTA Malea.....	34
Gambar 16 Simulasi perubahan daya aktif PLTA Bakaru sebelum masuknya PLTA Malea.....	37
Gambar 17 Simulasi perubahan daya aktif PLTA Bakaru setelah masuknya PLTA Malea.....	38

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Konstanta Karakteristik <i>Setting</i> Waktu Sesuai Standar PLN 2005.....	17
Tabel 2 Perbandingan nilai arus <i>setting</i> relai arus lebih pada generator PLTA Bakaru sebelum dan setelah masuknya PLTA Malea.....	38

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 <i>Single Line Diagram</i> Sistem Sulbagsel September 2022.....	45
Lampiran 2 Data Tegangan dan Arus Saluran Transmisi Sistem Sulbagsel.....	46
Lampiran 3 Data Impedansi Saluran Transmisi Sistem Sulbagsel	51
Lampiran 4 Data Pembangkit Sistem Sulbagsel	55
Lampiran 5 Data Transformator Distribusi Sistem Sulbagsel	58
Lampiran 6 Data Transformator IBT Sistem Sulbagsel.....	62
Lampiran 7 Data Daya Bangkitan Sistem Sulbagsel	63
Lampiran 8 Data Beban Sistem Sulbagsel.....	65

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT Sang Maha Segalanya, atas seluruh curahan rahmat dan hidayatNya sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi yang berjudul “Studi *setting* relai arus lebih sistem proteksi generator dan transformator PLTA Bakar sebelum dan setelah masuknya PLTA Malea” ini tepat pada waktunya. Skripsi ini ditulis dalam rangka memenuhi syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik di Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Dalam penyelesaian studi dan penulisan skripsi ini, penulis banyak memperoleh bantuan baik pengajaran, bimbingan dan arahan dari berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Untuk itu penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih yang tak terhingga kepada:

1. Cinta Pertama, Panutan dan Pintu surgaku, Ayahanda Ibrahim.H dan Ibunda Gusri, untuk beliau berdualah skripsi ini penulis persembahkan. Terimakasih atas segala kasih sayang yang diberikan dalam membesarkan dan membimbing penulis selama ini sehingga penulis dapat terus berjuang dalam meraih mimpi dan cita-cita. Kesuksesan dan segala hal baik yang kedepannya akan penulis dapatkan adalah karena dan untuk kalian berdua.
2. Ibu Dr. Eng. Ir. Dewiani, MT., IPM. selaku Ketua Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Indar Chaerah Gunadin, ST., MT., IPM. selaku dosen pembimbing I dan Ibu Dr. Ir. Hj. Zaenab Muslimin, MT. selaku dosen pembimbing II, selaku Dosen Pembimbing yang telah meluangkan waktu ditengah kesibukan beliau, memberikan kritik, saran dan pengarahan kepada Penulis dalam proses penulisan skripsi ini.
4. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Ansar Suyuti, MT. IPU, ASEAN. Eng dan Ibu Dr. Ir. Sri Mawar Said, MT. selaku dosen penguji skripsi yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan arahan dalam penulisan skripsi ini serta untuk menguji Skripsi ini serta untuk menguji Skripsi penulis.

5. Seluruh dosen dan staf pengajar serta pegawai Departemen Teknik Elektro atas segala ilmu, bantuan dan kemudahan yang diberikan selama penulis menempuh proses perkuliahan.
6. Seluruh pihak PT. PLN (Persero) Unit Induk Pembangkitan dan Penyaluran Sulawesi dan PT. PLN (Persero) Unit Pelayanan Penganturan Beban Makassar serta Unit Layanan PLTA Bakar yang telah membantu dalam memperoleh data-data yang diperlukan dan memberikan masukan mengenai penelitian yang dilakukan.
7. Teman-teman seperjuangan Laboratorium Riset Relay Proteksi dan Pengukuran, Firda Fajryani Kamil, Abd.Rahim, Caesar William Alexander dan Irsan Sadri terima kasih selalu siap mendengarkan apapun curhatan penulis, terima kasih atas segala bantuan, waktu, support dan kebaikan yang diberikan kepada penulis disaat masa sulit mengerjakan skripsi ini.
8. Seluruh teman-teman CAL18RATOR terimakasih atas kenangan luar biasa berharga selama lima tahun kebersamaan di kampus.
9. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu yang telah membantu dan mendukung dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Sebagai manusia biasa Penulis menyadari penyusunan skripsi ini jauh dari kata sempurna karena keterbatasan kemampuan dan ilmu pengetahuan yang dimiliki oleh Penulis. Oleh karenanya atas kesalahan dan kekurangan dalam penulisan skripsi ini, Penulis memohon maaf dan bersedia menerima kritikan yang membangun.

Terakhir, harapan Penulis, semoga Skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi siapa saja yang membacanya.

Gowa, 25 Juli 2023

Aisya Nurjihan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

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 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.

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 dapat terjadi 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 keandalan 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 jadi cara yang dapat dilakukan adalah proteksi dengan menggunakan relai pengaman. Oleh sebab itu, agar menambah kinerja dari sistem proteksi tersebut harus dilakukan perhitungan pengaturan kembali terhadap setting relai pengaman khususnya pada relai arus lebih (*overcurrent relay*). Karena relai arus lebih berguna untuk mengidentifikasi adanya kondisi abnormal 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) Bakarlu 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.

Sistem proteksi yang dimaksudkan adalah sistem perlindungan atau pengamanan yang bertujuan untuk mencegah kerusakan pada peralatan sistem tenaga listrik akibat adanya gangguan. Gangguan yang dimaksud adalah besar perubahan arus hubung singkat yang disebabkan adanya penambahan pembangkit baru yaitu PLTA Malea dengan daya 2×45 MW yang terinterkoneksi ke sistem SULBAGSEL (RUPTL PLN 2021-2030). Melihat potensi tersebut maka dilakukan studi setting relai arus lebih sistem proteksi pada generator khususnya PLTA Bakaru. Hal ini menjadikan dasar dalam penulisan tugas akhir yang berjudul **“Studi setting relai arus lebih sistem proteksi generator dan transformator PLTA Bakaru sebelum dan setelah masuknya PLTA Malea”**.

1.2 Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana menentukan arus hubung singkat PLTA Bakaru sebelum dan setelah masuknya PLTA Malea?
2. Bagaimana menentukan *setting* relai arus lebih sistem proteksi pada generator dan transformator PLTA Bakaru sebelum dan setelah masuknya PLTA Malea?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah :

1. Menentukan arus hubung singkat PLTA Bakaru sebelum dan setelah masuknya PLTA Malea.
2. Menentukan *setting* relai arus lebih sistem proteksi generator dan transformator PLTA Bakaru sebelum dan setelah masuknya PLTA Malea.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah :

1. Memberikan informasi arus hubung singkat PLTA Bakaru sebelum dan setelah masuknya PLTA Malea
2. Memberikan *setting* relai arus lebih sistem proteksi generator dan transformator PLTA Bakaru sebelum dan setelah masuknya PLTA Malea.

1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

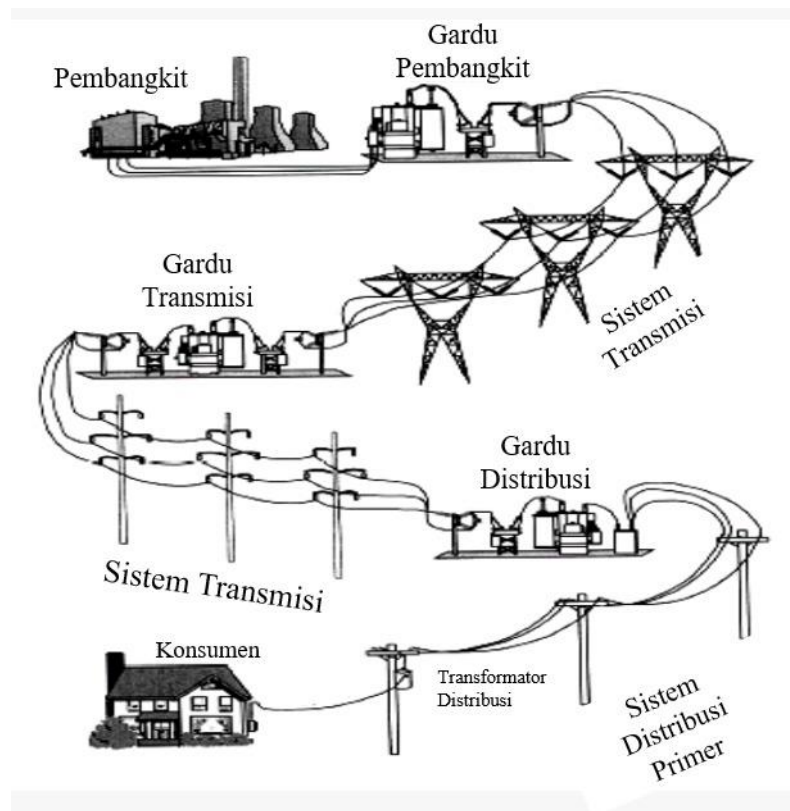
1. Berfokus pada gangguan yang terjadi pada busbar Bakaru 150 kV.
2. Relai yang digunakan pada penelitian ini yaitu Relai arus lebih.
3. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software* DigSilent .

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan salah satu bentuk energi yang paling populer dan paling penting dalam kehidupan manusia, karena dapat dengan mudah ditransformasikan menjadi bentuk energi yang lain dengan efisiensi tinggi, tetapi masih dalam batas biaya yang wajar. Sistem tenaga listrik saat ini adalah jaringan interkoneksi yang kompleks seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. (Saadat, 1999)

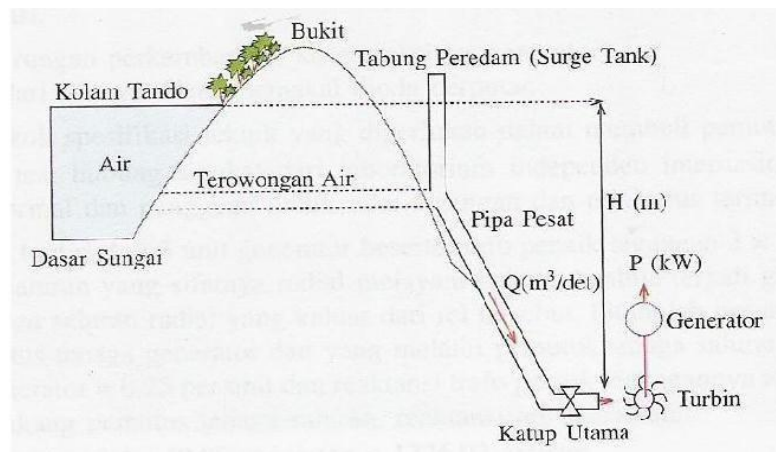


Gambar 1 Sistem Tenaga Listrik

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Air

Pembangkit listrik 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. (Marsudi, 2005).



Gambar 2 Proses Konversi Energi PLTA

2.3 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).

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.

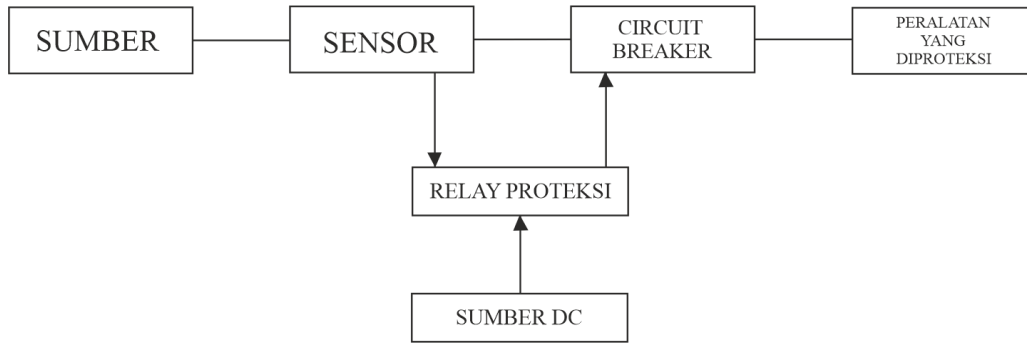
Ekonomis, dimana dengan biaya yang minimum dapat dicapai fungsi proteksi yang maksimum.

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.

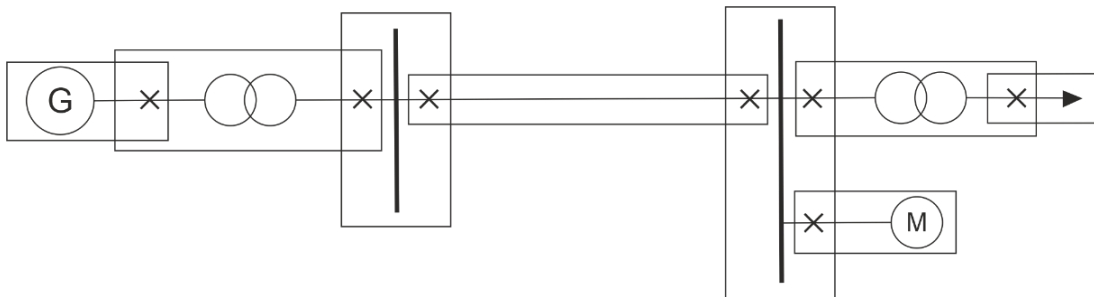
Komponen-komponen yang terdapat dalam sistem proteksi dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 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 4.



Gambar 4 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 aliran dayanya ($>I_n$). 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).

g. 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:

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

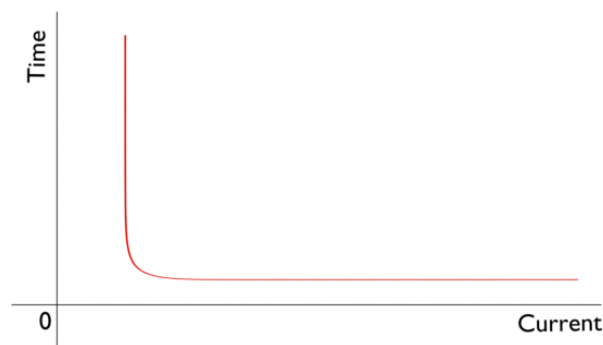
If $< I_p$ tidak bekerja (*block*)

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*)

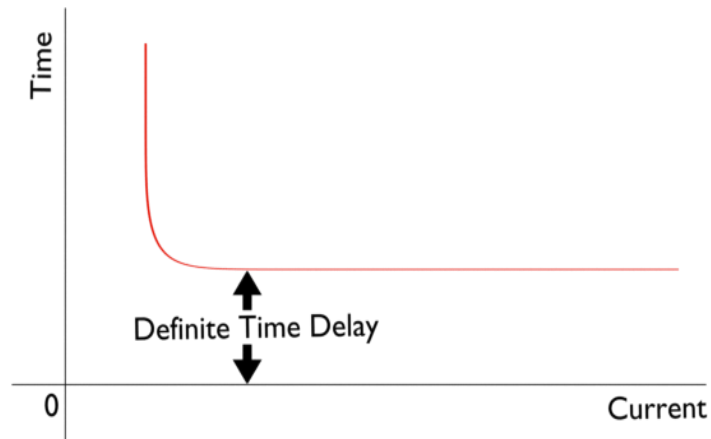
Relai akan beroperasi seketika (tanpa waktu tunda) ketika arus yang mengalir melebihi nilai settingnya maka relai akan bekerja dalam waktu beberapa mili detik (10 – 20 ms). Kurva karakteristik relai *instantaneous* dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5 Karakteristik Relai Waktu Seketika (*Instantaneous Relay*).

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

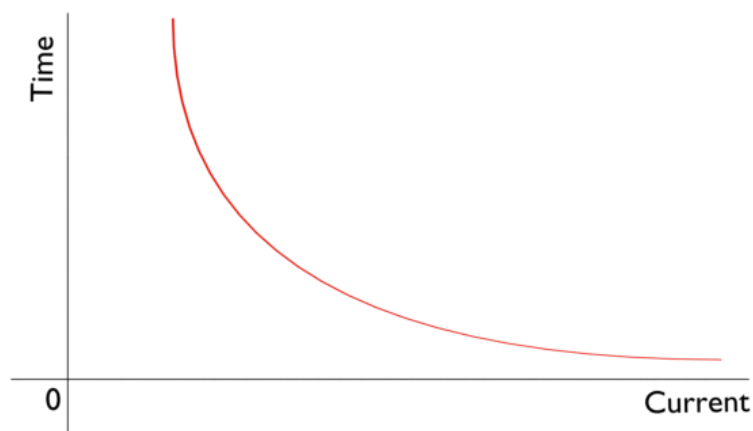
Relai akan memberikan perintah pada PMT ketika saat terjadinya gangguan hubung singkat dan besarnya arus gangguan melebihi nilai settingnya (I_s), dan jangka waktu kerja relai mulai pick up sampai kerja relai diperpanjang dengan waktu tertentu tidak tergantung besarnya arus yang mengerjakan rel. Kurva karakteristik relai *definite* dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6 Karakteristik Relai Waktu Tertentu (*Definite time relay*)

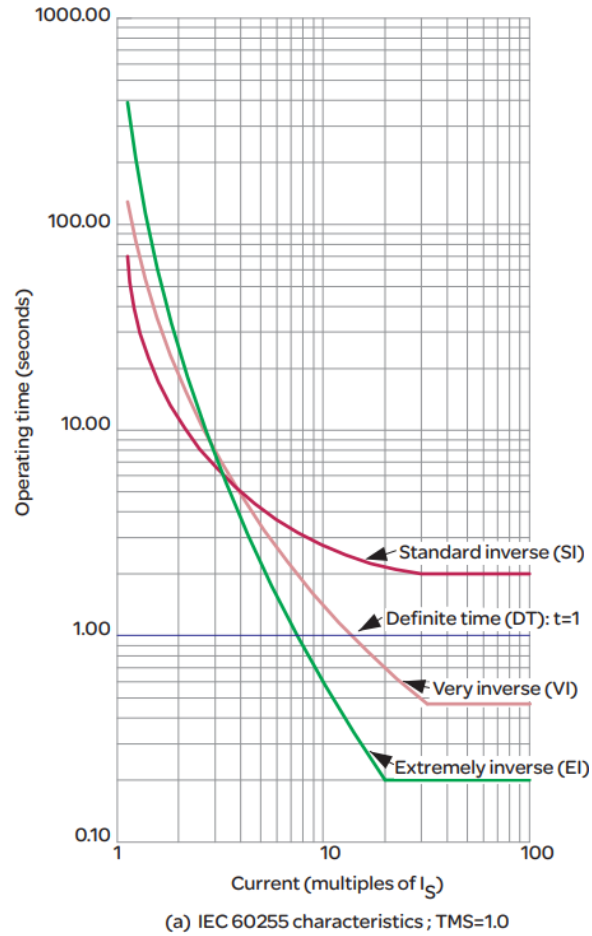
c. Relai arus lebih waktu terbalik (*Inverse relay*)

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 7.



Gambar 7 Karakteristik Relai Waktu Terbalik (*Inverse relay*)

Berdasarkan standar IEC 60255 dengan TMS 1, Gambar kurva yang ditunjukkan pada Gambar 8 merupakan kurva hubung singkat berdasarkan waktu kerjanya.



Gambar 8 Karakteristik Kerja Relai Arus Lebih

Tabel 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:

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

Sehingga untuk

a) *Standar inverse*

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

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

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 relai beroperasi
 Tms = *setting* waktu untuk relai beroperasi
 E dan K = konstanta (pada Tabel 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 relai akan trip – Arus setting bisa diperoleh dengan memilih salah satu posisi sadapan arus (*current tap*) yang tersedia di relai.

Batas penyetulan 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:

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

Arus *pick up* atau arus kerja adalah nilai arus dimana relai harus bekerja dan menutup kontakannya sehingga waktu relai 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 relai 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 = Aliran daya (A)

S = Daya (KVA)

V = Tegangan (KV)

I_s = Arus *setting* relai(A)

Fungsi Trafo Arus

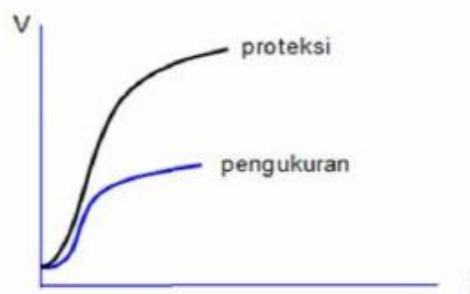
Berdasarkan penggunaannya, trafo arus dibagi menjadi dua fungsi, yaitu untuk trafo arus metering dan trafo arus proteksi.

1. Trafo Arus Pengukuran

Trafo arus jenis ini umumnya memiliki keterlitan yang tinggi pada daerah kerjanya dengan tingkat kejenuhan sampai dengan 5%- 120% arus rating tergantung dari kelasnya, hal ini untuk mengamankan meter atau alat pengukuran pada saat gangguan. Tingkat saturasi CT metering relative lebih rendah dibandingkan CT proteksi.

2. Trafo Arus Proteksi

Trafo jenis ini memiliki keterlitan yang lebih besar dibandingkan CT measurement saat terjadi gangguan dimana arus yang mengalir beberapa kali dari arus pengenal dan tingkat saturasi yang cukup tinggi. Penggunaan trafo arus proteksi biasanya digunakan untuk relay beban lebih, relay diferensial, relay daya, relay jarak, serta relay arus lebih (OCR dan GFR).



Gambar 9 Kurva Saturasi/ Kejenuhan CT

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 berlebih 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 aliran daya 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 Penggunaan Software DigSilent

Program perhitungan *DigSilent* adalah program yang digunakan untuk analisis transmisi, distribusi, dan sistem tenaga listrik industri. *DigSilent* dirancang untuk sistem tenaga listrik dan analisis kontrol agar mencapai tujuan utama dari perencanaan dan optimasi operasi.

Digsilent merupakan kependekan dari “*Digital Simulation of Electrical NeTworks*”. *DigSilent* versi 7 adalah *software* analisis sistem tenaga pertama dengan Gambar *single line* yang terintegrasi.

DigSilent dirancang dan dikembangkan oleh *engineer* dan *programmer* yang berpengalaman di bidang elektrikal analisis sistem tenaga dan pemrograman. Keakurasian dan keabsahan hasil yang diperoleh dengan *DigSilent* telah digunakan dalam jumlah besar oleh organisasi meliputi perencanaan dan operasi sistem tenaga di seluruh dunia.

Untuk mengatasi persyaratan analisis sistem tenaga, *DigSilent* dirancang sebagai peralatan *engineering* untuk menyediakan analisis fungsi sistem tenaga dengan *program single executable*. Fitur-fitur meliputi:

1. Fungsi inti merupakan definisi, modifikasi, dan kasus-kasus; *numerical routine* inti dan fungsi dokumentasi.
2. *Single line graphic* interaktif yang terintegrasi.
3. Elemen sistem tenaga dan *database* kasus.
4. Fungsi kalkulasi yang terintegrasi.
5. Konfigurasi jaring sistem tenaga interaktif dan akses dengan *Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA)*.
6. *Interface* umum untuk komputer berbasis sistem *mapping* (Samodra, 2018).