

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Berdasarkan penelitian tentang proteksi transformator yang akan dibuat ini maka penulis mengacu pada beberapa referensi untuk mempertimbangkan permasalahan yang menjadi acuan tugas akhir ini guna mendukung penyusunan skripsi ini, diantaranya:

1. Yuniarto, Arkhan Subari, and Dinda Hapsari Kusumastuti (2017) melakukan penelitian yang berjudul Setting Rele diferensial pada Gardu Induk Kaliwungu Guna Menghindari Kegagalan Proteksi. Dari penulisan yang telah mereka lakukan didapatkan kesimpulan bahwa “dalam pengaturan rele diferensial beberapa syarat yang harus dipenuhi sebagai pengaman, diantaranya:CT yang digunakan harus mempunyai ratio perbandingan yang sama sehingga $I_p = I_s$ serta sambungan dan polaritas CT1 dan CT2 sama. Yang kedua pemasangan Auxiliary CT yang terhubung Y karena harus membandingkan arus pada dua sisi tanpa perbedaan fasa. Yang terakhir adalah karakteristik kejenuhan CT1 dan CT2 harus sama. Untuk itu perlu dilakukan setting relay differential dengan perhitungan pemilihan ratio CT, perhitungan ACT, setting relay differential itu sendiri dan error mismatch. Error mismatch pada trafo arus masih dibawah batas maksimal yaitu 5% karena didapat hasil perhitungan masing-masing trafo arus baik pada sisi 150 kV dan 20 kV sebesar 1,129% dan 0,721%. sangat diperlukan guna mencegah arus gangguan yang dapat menyebabkan kerusakan peralatan dan kontinuitas penyaluran tenaga listrik yang stabil”.
2. Reimert, Donald (2006) pada buku yang berjudul Protective Relaying-Principles and Application yang diterjemahkan oleh Kunto W. (2012) dalam buku ini mampu memberikan wawasan bahwasanya buku ini mampu memberikan penjelasan secara umum mengenai cara kerja dan bagaimana

pengaplikasian rele proteksi. Dalam buku ini dapat diambil kesimpulan bahwa “mengacu pada situasi di mana satu atau lebih rele bekerja memproteksi atau beroperasi, seperti (tripping) circuit breaker (CB), namun tidak ada penyebab dapat ditemukan. Hal ini diduga bahwa banyak dari peristiwa dari hasil keterlibatan personil yang tidak dilaporkan, atau masalah berhenti untuk sementara waktu yang tidak terlihat jelas selama pengujian investigasi.”

3. Aji Setiyawan (2017) telah melakukan penelitian mengenai bagaimana Analisa dari Koordinasi Proteksi Pada PT. PLN (PERSERO) Gardu Induk Wonosobo dengan menggunakan perangkat lunak Aplikasi ETAP. Dari penelitian ini didapatkan kesimpulan bahwa untuk arus hubung singkat, panjangnya jarak berpengaruh terhadap nilai dari arus hubung singkat. Semakin panjang jarak sehingga semakin kecil pula nilai arus hubung singkat yang terjadi pada titik tersebut begitu pula sebaliknya.
4. Yuniarto, Subari, dan Kusumastuti (2017) melakukan penelitian tentang Setting Differential Relay pada Gardu Induk Kaliwungu Untuk Menghindari Kegagalan Proteksi. Dari penulisan tersebut diperoleh kesimpulan bahwa, setting differential relay sangat diperlukan guna mencegah adanya arus gangguan yang dapat menyebabkan kerusakan peralatan dan kontinuitas penyaluran tenaga listrik yang lebih stabil.
5. Yugi Supanggah (2017) telah melakukan penelitian tentang analisis koordinasi proteksi Overcurrent relay pada sistem power plant 8 dari kelistrikan PT.Indocement Tunggal Prakarsa, Tbk.Dari penelitian ini diketahui bahwa pada plant 8 mempunyai 2 penyulang yang masing-masing menggunakan pengaman proteksi rele arus lebih yang digunakan untuk mengamankan beberapa penyulang yang sebagian besar bebannya adalah motor induksi.Dari simulasinya ditunjukkan bahwa koordinasi proteksi yang baik ketika terjadi gangguan maka rele yang terletak paling dekat akan

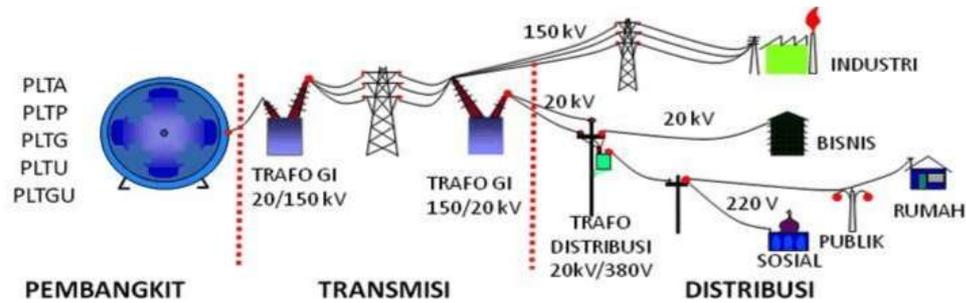
bekerja dahulu dan rele incomingnya menjadi *backup* yang kemudian akan memberi perintah kepada Pemutus tenaga (PMT) untuk trip.

6. Saiful dan Zulkarnaini (2016) telah melakukan penelitian berjudul Analisa Perhitungan Setting Over Current Relay pada Transformator Daya Area Lukit di Emp Malacca Strait Sa. Dalam perhitungan nilai waktu delay maka digunakan arus hubung singkat, sedangkan untuk perhitungan nilai arus setting digunakan nilai arus nominal. Pengaturan rele arus lebih yang terpasang pada transformator daya tersebut dianggap sangat efektif dalam mengamankan transformator dari gangguan.
7. Turner (2009) melakukan penelitian berjudul Testing Numerical Transformer Differential Relay. Pada penelitian tersebut didapatkan kesimpulan bahwa, praktik commissioning yang umum adalah menguji semua setting rele numerik untuk memastikan inputan yang akurat. Untuk menjalankan serangkaian tes, menggunakan *software* pada sebuah komputer seperti pada ETAP dan dilakukan secara otomatis karena keseluruhan praktik commissioning dapat terdiri dari beberapa ratus pengujian numerical relay. Walaupun test pada sebuah transformator ini adalah pemeriksaan yang sangat baik, tetap perlu dilakukan untuk memastikan bahwa transformator benar-benar terlindungi dari semua jenis gangguan baik eksternal maupun internal.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan sistem penyaluran energi listrik dari sumber menuju beban, Adapun sistem ini terdiri dari beberapa rangkaian instalasi utama untuk penyaluran energi listrik yang diantaranya yaitu pembangkit, transmisi, distribusi, dan konsumen atau beban.



Gambar 2. 1 Sistem Tenaga Listrik

(sumber: <https://www.warriornux.com>)

Berdasarkan gambar 2.1 diatas diketahui bahwa sumber listrik utama berasal dari Pembangkit yaitu proses dimana listrik dibangkitkan, cara pembangkitan energi listrik dengan prinsip medan magnet dan penghantar listrik yaitu energi mekanik yang berasal dari energi potensial pembangkit digunakan untuk memutar turbin yang telah dihubungkan dengan generator yang selanjutnya mengaktifkan generator listrik, pada tahap akhir generator akan mengkonversikan energi mekanik yang menghasilkan energi listrik. Adapun tegangan yang dibangkitkan pada generator pembangkit adalah rentang 12kV–20kV kemudian disalurkan ke Jaringan Transmisi, dan sebelum menuju ke Jaringan Transmisi tegangan di naikkan oleh trafo step up. Energi listrik ini dihasilkan dari hasil perubahan energi, yang mana metode pembangkitanya dapat dengan berbagai cara seperti pembangkit-pembangkit yang ada contohnya PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap) dari uap panas, PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air) berasal dari energi air, PLTD (Pembangkit Listrik Tenaga Diesel) memakai bahan bakar minyak sebagai penghasil energi, dan lain sebagainya dimana semuanya akan menghasilkan energi gerak untuk memutar turbin generator.

Setelah dihasilkan energi listrik dari pembangkit kemudian disalurkan ke jaringan transmisi yaitu proses penyaluran energi listrik yang tegangannya dari pembangkit dinaikan dahulu menjadi tegangan standar transmisi dinegara Indonesia yaitu ada yang 70 kV, 150 kV dikategorikan Tegangan Tinggi (TT) dan

500 kV dikategorikan Tegangan Ekstra Tinggi (TET). Menaikan tegangan bertujuan untuk mengurangi rugi-rugi daya pengaruh panjangnya saluran, karena semakin tinggi tegangannya sehingga akan semakin berkurang rugi-rugi daya yang akan terjadi. Pada saluran transmisi terdiri saluran udara yang sering disebut SUTET/SUTT dan saluran kabel tanah yang dipasang bawah tanah yang sering disebut SKTT.

Pada jaringan distribusi merupakan proses penyaluran energi listrik dari transmisi menuju kekonsumen, jaringan distribusi dibagi menjadi distribusi primer dan sekunder. Distribusi primer yaitu proses penyaluran energi listrik dari transmisi diturunkan dengan trafo step-down tegangannya menjadi 20 kV yang dikategorikan tegangan menengah (TM), dan kemudian disalurkan melalui penyulang (feeder). Saluran distribusi primer terdiri dari saluran udara (SUTM) dan saluran Kabel tanah (SKTM). Saluran udara tegangan menengah sering ditemui dipinggir jalan terdapat pada tiang dengan tiga kawat konduktor dibagian atasnya. Sebelum menuju ke saluran distribusi sekunder energi listrik diturunkan kembali tegangannya dengan trafo step-down menjadi tegangan konsumen yang mana akan didistribusikan hingga ke kWh pelanggan atau konsumen, adapun tegangannya pada saluran distribusi sekunder yaitu 220/380 Volt yang dikategorikan tegangan rendah (TR).

Konsumen adalah pengguna dari jasa tenaga listrik, dan tegangan yang digunakan terbagi menjadi beberapa bagian sesuai dengan kebutuhan konsumen tersebut. Pemakaian energi listrik untuk industri, mall, hotel biasanya memakai listrik tegangan menengah yang sering disebut TM yang mana mendapat sumber listrik langsung dari penyulang distribusi primer. Pada industri besar seperti pabrik pupuk, semen dan sebagainya membutuhkan daya yang lebih besar biasanya menggunakan listrik tegangan tinggi yang sering disebut konsumen TT, sumber listrik didapatkan langsung dari saluran transmisi tegangan tinggi, sedangkan pemakai listrik konsumen biasa seperti rumah tinggal atau kantor menggunakan listrik tegangan rendah yang sering disebut konsumen TR dengan pemakaian tegangan 220/380 V, sumber listrik didapatkan dari saluran distribusi sekunder

2.2.2 Gardu Induk

Gardu Induk yaitu sebuah subsistem dari sistem peyaluran transmisi tenaga listrik, yang juga merupakan sekumpulan peralatan listrik dari suatu instalasi yang telah disusun dengan konsep tertentu dengan mempertimbangkan teknis, keindahan, efektif, serta ekonomis. Adapun gardu induk memiliki beberapa fungsi adalah sebagai berikut:

- a. Mentransformasikan daya listrik dengan cara mengubah taraf tegangan untuk penyaluran energi listrik ke beban dengan frekuensi yang tetap.
- b. Sebagai sarana untuk melakukan pengukuran, pengawasan operasi dan untuk pengamanan pada sistem tenaga listrik
- c. Sebagai sarana untuk pengaturan daya yang menuju ke Gardu Induk lainnya melalui saluran tegangan tinggi dan ke gardu distribusi, setelah melalui proses perubahan taraf tegangan melewati penyulang (feeder) tegangan menengah.
- d. Sebagai sarana telekomunikasi/penghubung yang pada umumnya untuk masalah antar sistem yang akan menunjang satu sama lain dan internal dari PLN.



Gambar 2. 2 Gardu Induk

(sumber: <https://www.warriornux.com>)

2.2.2.1 Kompartemen listrik utama pada Gardu Induk

Pada sebuah gardu induk dalam menjalankan serta memenuhi tujuan dan fungsinya dengan baik, maka gardu induk dilengkapi oleh peralatan-peralatan listrik untuk mendukung dalam pengoperasian gardu induk tersebut yaitu sebagai berikut:

1. Transformator daya

Transformator merupakan suatu peralatan listrik yang dipergunakan untuk mengubah taraf tegangan listrik ac menjadi lebih rendah atau lebih tinggi dan digunakan untuk menyalurkan tenaga atau daya energi listrik dari suatu rangkaian listrik ke rangkaian lainnya tanpa merubah frekuensi dan bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik.



Gambar 2. 3 Bentuk Fisik Transformator Daya

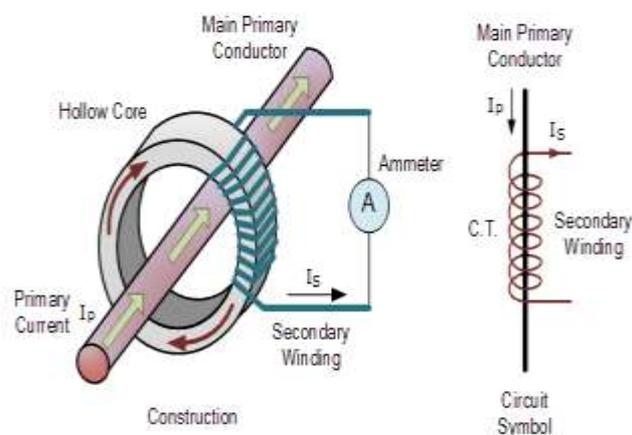
Transformator terdiri 3 komponen utama yaitu kumparan kawat primer, kumparan kawat sekunder, dan inti besi dimana kumparan kawat ini dililitkan pada sebuah inti besi tersebut. Adapun prinsip kerja dari transformator daya sebagai berikut yaitu ketika kumparan primer transformator dihubungkan dan dialiri oleh sumber tegangan arus bolak-balik, kemudian terjadi perubahan arus listrik pada kumparan primer yang akan menimbulkan medan magnet yang berubah atau fluks magnetik disekitarnya. Medan magnet yang berubah tersebut diperkuat dengan adanya

inti besi serta dihantarkan oleh inti besi kekumparan sekunder, sehingga pada ujung-ujung kumparan sekunder akan timbul gaya gerak listrik (GGL) induksi. Inti besi juga digunakan untuk mempermudah jalannya fluks magnetik dan mengurangi suhu panas yang ditimbulkan.

Transformator daya juga memiliki fungsi untuk pengaturan tegangan dan juga dilengkapi dengan transformator pertanahan yang berguna untuk mendapatkan titik netral dari trafo daya. Peralatan ini sering juga disebut NCT atau *Neutral Current Transformer* dan ada juga peralatan lainnya NGR atau *Neutral Grounding Resistance* hal ini bertujuan untuk memperkecil arus gangguan yang terjadi pada transformator.

2. Transformator Arus

Trafo arus merupakan suatu piranti untuk menurunkan arus yang dilakukan untuk proses pengukuran. Penurunan arus dalam pengukuran sangat penting karena pada suatu sistem tenaga listrik yang memiliki arus yang tinggi, alat-alat pengukur tidak mampu membaca secara langsung arus yang melewati suatu penghantar, karena peralatan pengukur diproduksi untuk kapasitas arus yang kecil, oleh karena itu maka nilai arus perlu diturunkan dengan rasio tertentu untuk mendapatkan hasil pengukuran. Trafo arus dipasang seri terhadap beban, berbeda pada trafo pada umumnya.



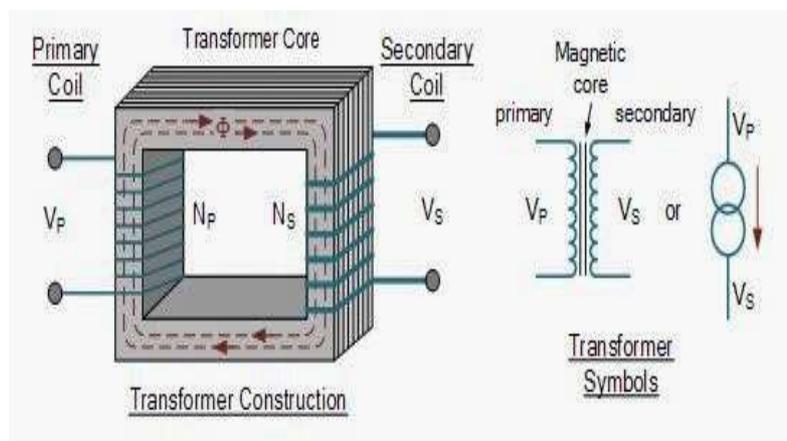
Gambar 2. 4 Prinsip Kerja Trafo Arus

(sumber: <http://www.info-elektro.com>)

Prinsip kerja trafo arus dijelaskan ketika arus primer (I_p) mengalir pada kumparan primer, maka akan muncul medan magnet disekeliling kumparan primer tersebut, medan magnet tersebut akan terkumpul lebih banyak pada inti besi. Medan magnet yang berputar di dalam inti besi karena arus AC menghasilkan perubahan fluks primer dan memotong lilitan sekunder sehingga menginduksi tegangan pada lilitan sekunder sesuai hukum faraday. Karena lilitan sekunder membentuk loop tertutup, maka akan mengalir arus sekunder (I_s) yang akan membangkitkan medan magnet untuk melawan flux magnet yang dihasilkan oleh belitan primer sesuai hukum lenz.

3. Transformator Tegangan

Trafo tegangan merupakan sebuah piranti yang digunakan untuk menurunkan tegangan yang dilakukan untuk proses pengukuran. Penurunan nilai tegangan dalam pengukuran sangat penting karena pada suatu sistem tenaga listrik yang memiliki tegangan yang tinggi, alat-alat pengukur tidak mampu membaca secara langsung, karena peralatan pengukur diproduksi untuk tegangan yang kecil, oleh karena itu maka nilai tegangan perlu diturunkan dengan rasio tertentu untuk mendapatkan hasil pengukuran. Trafo tegangan dipasang paralel terhadap beban, berbeda dengan trafo arus yang dipasang secara seri.



Gambar 2. 5 Prinsip Kerja Trafo Tegangan

(Sumber: (sumber: <http://www.info-elektro.com>)

Prinsip kerja dari trafo tegangan diketahui bahwa pada saat ada arus AC mengalir I_p pada kumparan coil primer maka akan menimbulkan gaya gerak magnet yang akan menghasilkan fluks pada inti besinya yang mana setelah itu akan membentuk gaya gerak listrik (ggl) pada kumparan coil sekunder, dan apabila rangkaian pada kumparan sekunder tertutup maka arus akan mengalir I_s dan menghasilkan gaya gerak listrik pada kumparan coil sekunder.

4. Pemutus Tenaga (PMT)

Menurut International Electrotechnical Vocabulary Pemutus Tenaga atau disebut juga Circuit Breaker ialah suatu alat sakelar atau switching mekanis yang mampu memutuskan arus listrik secara otomatis ketika terjadi kondisi tidak normal akibat gangguan dikarenakan lebihnya arus yang melewati circuit breaker tersebut. Dan juga berfungsi selain memutuskan juga bisa menghubungkan rangkaian listrik yang terhubung ke beban secara aman.



Gambar 2. 6 Bentuk fisik Pemutus Tenaga

Pada suatu peralatan listrik untuk menjadi pemutus tenaga memiliki syarat-syarat yang harus dipenuhi yaitu sebagai berikut:

- Dapat menyalurkan arus maksimum sistem secara kontinyu.
- Dapat memutuskan atau menutup jaringan dalam keadaan berbeban ataupun dalam keadaan hubung singkat tanpa menimbulkan kerusakan pada pemutus daya itu sendiri.
- Dapat memutuskan arus hubung singkat dengan kecepatan tinggi.

5. Pemisah (PMS)

Pemisah (PMS) atau disebut juga dengan Disconnecting Switch (DS) merupakan sebuah peralatan dari sistem tenaga listrik yang fungsinya tidak jauh beda dengan PMT yang berfungsi sebagai saklar pemisah pada rangkaian listrik tanpa memisahkan peralatan listrik dari peralatan lain yang bertegangan dimana pembukaan maupun penutupan PMS hanya dapat dilakukan pada kondisi tanpa beban, perbedaannya adalah pada PMS tidak mampu memutus jaringan apabila terjadi arus gangguan sedangkan PMT mampu memutus jaringan jika terjadi arus gangguan.



Gambar 2. 7 Bentuk Fisik Pemisah

6. *Control Panel Device*

Control panel device ini berfungsi untuk mengetahui serta mengontrol kondisi pengoperasian yang terjadi pada gardu induk tersebut dan juga merupakan pusat pengendalian local gardu induk. Pada control panel device ini berisi sakelar, indicator, meter, tombol untuk operasional PMS, PMT, alat ukur besaran listrik seperti rele, serta annunciator yang berada dalam sebuah ruangan.



Gambar 2. 8 Contoh Bentuk fisik *control panel device*

7. Lightning Arrester (LA)

Lightning Arrester(LA) merupakan suatu peralatan listrik yang digunakan sebagai penangkap petir, untuk melindungi peralatan listrik dari tegangan lebih akibat terjadinya sambaran petir atau dikenal dengan istilah *lightning surge* pada kawat transmisi, maupun disebabkan oleh *switching surge*, sehingga petir bisa langsung dibumikan oleh LA agar tidak merusak peralatan listrik. Pada saat keadaan normal LA bekerja sebagai isolator sedangkan ketika keadaan tidak normal terjadi gangguan, maka LA bersifat konduktif dan akan menyalurkan arus listrik lebih keground atau tanah.



Gambar 2. 9 Bentuk Fisik Lightning Arrester

(Sumber: <http://www.arresterworks.com>)

8. Relai Proteksi

Relai proteksi merupakan suatu dari susunan peralatan yang telah dirancang khusus untuk merasakan dan mengukur ketika adanya suatu gangguan pada peralatan listrik. Adapun relai proteksi memiliki kegunaan sebagai sistem pengaman yang mana terdiri dari beberapa macam diantaranya Distance relay, differential relay, overcurrent relay (OCR), dan masih banyak lainnya. Contoh fungsi relai proteksi ini adalah OCR untuk mendeteksi adanya arus lebih, dengan cara membaca arus yang masuk ke relai yang untuk pembacaannya sudah diturunkan oleh CT sesuai arus untuk pengukuran yang dibutuhkan relai begitupun tegangannya dengan pengaturan yang baik sehingga relai akan bekerja dan memberi perintah PMT untuk trip sebagai pengamanan. Relay proteksi dapat mengetahui adanya gangguan pada peralatan yang perlu diamankan dengan mengukur atau membandingkan besaran-besaran yang diterima dengan nilai besaran yang telah ditentukan. Besaran-besaran tersebut adalah arus, tegangan dan lain sebagainya. Relai pengaman ini sangat diperlukan agar kelangsungan

kerja suatu sistem tenaga listrik bisa berjalan dengan baik dan bisa mengisolir daerah yang mengalami gangguan agar tidak menyebar luas.



Gambar 2. 10 Contoh bentuk fisik relay proteksi (OCR)

9. Transformator Pemakaian Sendiri (PS)

Transformator Pemakaian sendiri merupakan suatu transformator yang digunakan untuk mentransformasikan daya listrik menjadi daya konsumen biasa standar pelanggan 220/380 V untuk pemakaian pada lingkungan gardu induk itu sendiri.



Gambar 2. 11 Transformator PS

(Sumber: <https://eprints.ums.ac.id>)

10. Busbar dan Kabel listrik

Busbar merupakan suatu susunan konduktor yang biasanya berupa plat tembaga ataupun aluminium yang berguna dalam sebuah panel kelistrikan sehingga bisa mendistribusikan atau menghantarkan energi listrik sesuai dengan kebutuhan dan juga berfungsi sebagai tempat titik pertemuan atau hubungan antara trafo daya , SKTT, SUTT serta komponen lainnya yang terdapat pada switchyard. Komponen rel busbar diantaranya konduktor(BC, HDCC, HAL, THAL, AAAC) serta Insulator ,tension clamp, suspension clamp, socket eye, anchor sagle,space, fitting dan lain-lain.



Gambar 2. 12 Bentuk Fisik Rel Busbar

(Sumber: <https://scadaku.wordpress.com>)

Kabel listrik adalah suatu media yang digunakan untuk menyalurkan energi listrik, sebuah kabel listrik biasanya terdiri dari isolator dan konduktor. Adapun pengawatan wiring pada sistem proteksi tenaga listrik digunakan untuk menghubungkan antar komponen sistem proteksi yang satu dengan lainnya sehingga semua peralatan dapat bekerja dengan

semestinya. Pengawatan (wiring) pada sistem proteksi terdiri dari sirkuit sekunder (arus dan tegangan), sirkuit tripping dan sirkuit peralatan bantu.

2.2.3 Proteksi

Pada dasarnya suatu sistem tenaga listrik terdiri dari susunan pembangkit, transmisi dan distribusi yang dihubungkan oleh satu sama lain guna membangkitkan, mentransmisikan dan mendistribusikan tenaga listrik hingga dapat dimanfaatkan oleh pelanggan. Sistem proteksi merupakan isolasi atau perlindungan pada zona yang memungkinkan terjadinya bahaya atau gangguan pada sebuah komponen sistem tenaga listrik baik dalam zona pembangkitan, transmisi ataupun distribusi yang dalam penggunaannya mempunyai kekhususan dan bahkan seringkali jauh berbeda.

Hal yang lebih mendasar ialah pembangkit listrik haruslah dioperasikan secara aman tanpa menimbulkan kerugian bagi manusia ataupun pada perangkat pembangkit, yaitu dengan mengoptimalkan sumber daya primer yang ada, efisiensi, faktor keandalan dan keamanan. Namun pada kenyataannya sebaik dan seideal apapun disain dari power plant system dilakukan, sistem tersebut dalam kenyataannya tidak pernah terbebas dari sebuah gangguan. Gangguan pada sistem tenaga listrik dapat terjadi pada tingkat destruksi dan level yang berbeda-beda, namun pada masing-masing pembangkit mempunyai risiko baik terhadap manusia maupun terhadap peralatan sistem tenaga listrik itu sendiri (Pandjaitan, 2012:3).¹⁰ Kebanyakan gangguan dalam sistem tenaga listrik dengan jaringan saluran udara adalah gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah (single phase-to-ground) gangguan yang dihasilkan terutama dari transmisi saluran tegangan tinggi yaitu dari petir, pohon yang tumbang dan ranting pohon. Dalam sistem distribusi saluran udara (overhead distribution), hubung singkat dengan pohon disebabkan oleh angin yang merupakan penyebab utama dari gangguan. Hujan, petir, pohon tumbang, dan angin selama badai parah dapat menjadi penyebab banyaknya gangguan pada jaringan. Presentase di bawah merupakan peristiwa hubung singkat yang sering terjadi, hal ini meliputi:

- a) Short Sircuit Single phase-to-ground : 70%–80%
- b) Short Sircuit Phase-to-phase-to ground : 17%–10%

c) Short Sircuit Phase-to-phase : 10%–8%

d) Short Sircuit Three-phase : 3%–2%

Berbagai alat proteksi (rele) haruslah dikoordinasikan dengan baik, sehingga rele utama bertugas untuk beroperasi dan melindungi pada tanda pertama dari masalah yang terjadi pada zona internal. Sistem backup harus tersedia dan dapat beroperasi untuk menyelesaikan gangguan apabila kemampuan dari rele utama berkurang. Untuk mengoptimalkan faktor keamanan, keseimbangan haruslah meningkatkan probabilitas hasil dari operasi, serta bergantung pada karakteristik maupun tujuan dari setiap aplikasi tertentu. Gangguan dapat dibedakan berdasarkan lamanya gangguan tersebut terjadi, diantaranya:

A. Gangguan temporer (transient), gangguan jenis ini hanya bersifat sementara dan dapat hilang dengan sendirinya ketika pemutus tegangan dalam posisi terbuka (open) atau terbebas dari saluran transmisi dalam waktu yang sementara. Setelah itu dihubungkan kembali (close) dengan jaringan.

B. Gangguan permanen, berbeda dengan gangguan transient yang dapat hilang dengan sendirinya, gangguan ini tidak. Jenis gangguan ini akan tetap ada apabila pemutus tenaga pada posisi terbuka (open) pada saluran transmisi pada waktu yang sementara dan setelah itu terhubung kembali (close)

Pada kasus diatas, akibat dari terbukanya (open) pemutus tenaga listrik (PMT) tidak selalu diakibatkan karena gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik itu sendiri, melainkan karena adanya pengaruh dari luar berupa ada interfensi atau induksi jaringan yang menyebabkan gangguan pada sistem. Dapat juga diakibatkan oleh kerusakan pada rele akibat keandalan dari rele tersebut berkurang ataupun akibat dari kabel kontrol. Gangguan diatas disebut dengan gangguan non-sistem.

Berdasarkan uraian diatas, dapat disimpulkan bahwa sistem proteksi tenaga listrik ialah pengaman pada komponen yang terpasang pada sistem tenaga listrik, seperti pada generator, transformator, busbar, saluran kabel bawah tanah, saluran udara tegangan tinggi, dan sebagainya terhadap suatu kondisi gangguan atau abnormal sistem tenaga listrik.

2.2.3.1 Persyaratan Sistem Proteksi Tenaga Listrik

Sistem proteksi utama merupakan pengaman yang memprioritaskan alat untuk bekerja mengamankan saat terjadi gangguan dalam kondisi kurang normal pada transformator daya, pengaman utama dimaksudkan sebagai yang memperkarsainya saat terjadi gangguan pada kawasan yang akan di lindungi. Adapun ciri-ciri pengaman utama sebagai berikut:

- a. Waktu kerja rele sangat cepat,
- b. Tidak bisa dikoordinasikan dengan rele proteksi lainnya,
- c. Tidak bergantung pada proteksi lainnya, dan
- d. Daerah pengamanannya diapit oleh dua buah transformator arus, dimana rele diferensial dipasang.

Hutauruk (1991) menjelaskan bahwa sistem proteksi bertujuan untuk mengamankan gangguan. Cara kerja sistem proteksi adalah dengan cara mengisolir komponen atau bagian tempat terjadinya gangguan. Dengan demikian sistem proteksi harus memiliki hal-hal berikut ini:

1) Kepekaan (sensitifitas)

Syarat ini terkait dengan tingkat sensitifitas yang dimiliki oleh sistem proteksi. Sensitifitas atau kepekaan dalam sistem proteksi ditentukan oleh minimum values yang terdapat dalam komponen saat sistem proteksi mulai bekerja.

2) Kecepatan

Tingkat kecepatan merupakan salah satu syarat vital yang harus dimiliki oleh sistem proteksi, karena syarat ini memiliki multifungsi diantaranya, untuk menjaga kualitas dan kuantitas pelayanan, keamanan, serta keseimbangan saat mesin bekerja. Sistem proteksi harus mempunyai tingkat kecepatan sebagaimana ditentukan sehingga dapat meningkatkan mutu pelayanan, keamanan manusia, komponen, dan stabilitas operasi. Mengingat dalam suatu sistem tenaga listrik mempunyai batas-batas stabilitas serta sering terjadinya gangguan sistem yang bersifat hanya sementara, maka rele yang seharusnya bereaksi dengan cepat kerjanya perlu diperlambat (time delay).

3) Selektifitas dan diskriminatif

Sistem proteksi memiliki kemampuan untuk mengelompokkan atau mengidentifikasi sedini mungkin kemungkinan terjadinya gangguan. Pada sebuah rele proteksi akan melakukan tripping sesuai setting yang telah ditentukan pada waktu mendisain sistem proteksi, mulai dari penyetelan hingga pemasangan. Dalam hal ini sistem proteksi memiliki fungsi utama untuk menjadi media atau alat yang memisahkan bagian-bagian yang terganggu dengan alat-alat yang tidak terganggu (normal).

4) Keandalan

Sistem proteksi dapat disebut andal jika, pada saat dibutuhkan akan selalu berfungsi sebagaimana yang diharapkan. Sistem proteksi dapat dikatakan tidak andal jika dalam keadaan tidak dibutuhkan akan beroperasi dan dalam keadaan standby rele akan bekerja tanpa melakukan pembacaan, sebagai contoh dalam keadaan normal tidak terjadi gangguan rele akan memutuskan untuk melakukan trip jaringan, serta masih banyak kasus dimana rele dapat dikatakan tidak andal. Keandalan suatu rele disebut cukup baik bila mempunyai range 90-99 %. Keandalan terbagi menjadi 2 macam, yaitu:

- a. Dependability yaitu rele harus dapat diandalkan setiap saat.
- b. Security yaitu rele tidak boleh bekerja ketika tidak dibutuhkan / tidak boleh salah kerja

5) Ekonomis.

Nilai ekonomis menjadi sesuatu yang tidak boleh dikesampingkan dalam membuat planning sistem proteksi yang baik. Akan tetapi, nilai ekonomis ini juga harus disesuaikan dengan faktor keandalan yang sudah ditetapkan.

2.2.3.2 Faktor Penyebab Terjadinya Gangguan Pada Proteksi

Dalam bukunya, Mardesnsyah (2008:10) berpendapat jika sistem tenaga listrik merupakan sistem yang hanya melibatkan sebuah komponen dan sangat teratur. Oleh karenanya, terbagi menjadi beberapa faktor yang dapat menyebabkan terjadinya short circuit pada sistem tenaga listrik tersebut, diantaranya:

a. Faktor manusia.

Faktor manusia yaitu menyangkut kelalaian atau kesalahan manusia dalam memberikan perlakuan pada sistem. Contohnya saja kesalahan dalam melakukan penyambungan rangkaian, seperti keliru dalam melakukan mengkalibrasi suatu piranti pengaman, dan sebagainya.

b. Faktor internal.

Faktor internal yaitu menyangkut gangguan yang berasal dari dalam sistem itu sendiri. Contohnya keausan, usia pakai dan lain sebagainya. Hal ini bisa mengurangi sensitifitas rele pengaman, dan juga dapat mengurangi daya isolasi peralatan listrik yang lain.

c. Faktor external.

Faktor external yaitu menyangkut gangguan meliputi gangguan yang berasal dari lingkungan sekitar sistem atau dari luar sistem. Contohnya pada kondisi gempa bumi, cuaca, sambaran petir, serta banjir bandang. Selain itu juga ada kemungkinan gangguan yang di sebabkan oleh binatang, misalnya gigitan tikus, burung, kelelawar, tupai, dan sebagainya.

2.2.3.3 Tujuan Sistem Proteksi Tenaga Listrik

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Hewitson menurutnya sistem proteksi tenaga listrik memiliki 3 fungsi utama diantaranya sebagai berikut :

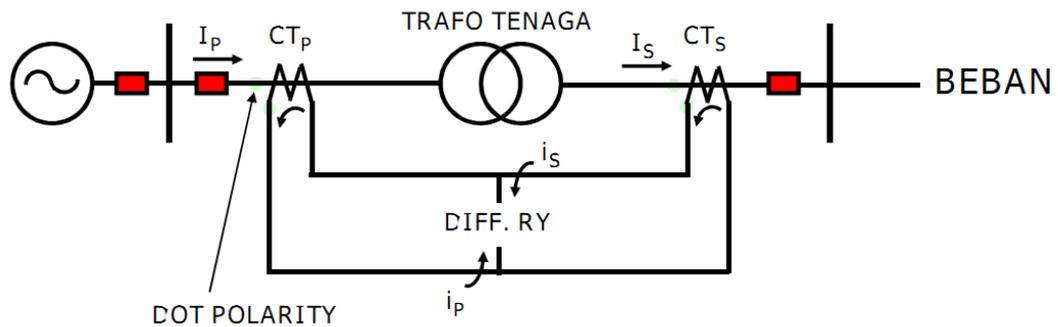
1. Untuk Pengaman sistem dalam menjaga kontinuitas penyediaan dan penyaluran energi listrik
2. Untuk Meminimalisir bahaya dan biaya perbaikan ketika terdeteksi gangguan
3. Untuk Memastikan keamanan manusia

2.2.4 Peralatan Relai Proteksi Transformator

2.2.4.1 Differential Relay

Sebuah institusi yang bernama IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) mendefinisikan bahwa rele ialah sebuah alat elektronik yang didisain untuk merespon dan merasakan kondisi gangguan atau malfungsi dengan cara scanning data masukan pada sebuah komponen listrik jika kondisi terpenuhi, mengakibatkan terjadinya perubahan secara langsung pada komponen pengendali

listrik. Input yang diberikan umumnya berupa arus serta tegangan listrik, dan bisa juga mekanik, panas atau kuantitas yang lainnya IEEE C37.90 (Blackburn, dkk, 2007 yang diterjemahkan oleh Kunto W., 2012:1).



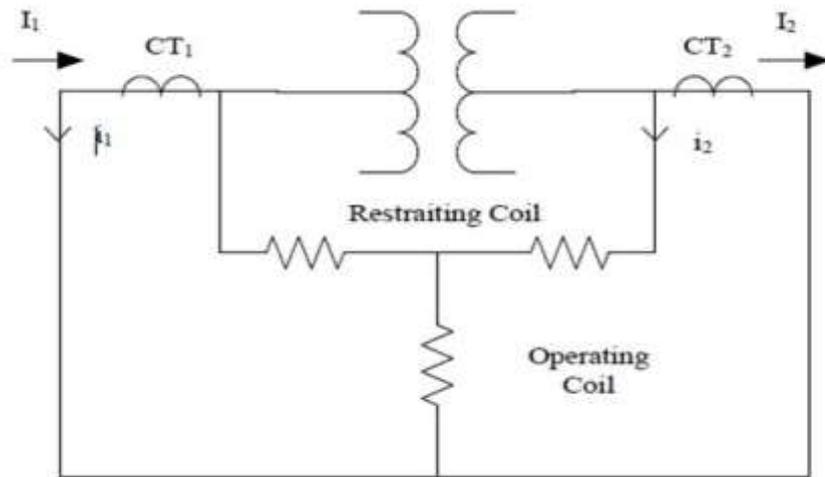
Gambar 2. 13 Prinsip kerja rele differential

(Sumber:Wijanarko.Danang, 2018)

Rele diferensial merupakan rele jenis pengaman utama dalam sistem tenaga listrik, rele jenis ini dirancang untuk mendeteksi perbedaan antara arus yang masuk dan arus yang keluar pada daerah kerja atau zona yang diproteksinya. Relay ini memiliki prinsip kerja dengan membandingkan arus yang masuk pada peralatan dengan arus yang keluar dari peralatan tersebut yaitu jika arus yang masuk tidak sama dengan arus yang keluar. Rele diferensial berfungsi untuk mengamankan transformator terhadap gangguan hubung singkat yang terjadi didalam daerah pengamanan transformator dan zona perlindungannya dibatasi oleh dua buah *current transformer* CT sehingga menjadikannya sebagai rele utama. Rele diferensial tidak dapat dijadikan sebagai pengaman rele cadangan karena pada proses instalasinya diapit oleh kedua CT (*incoming* dan *outgoing*).

2.2.4.1.1 Karakteristik Rele differential

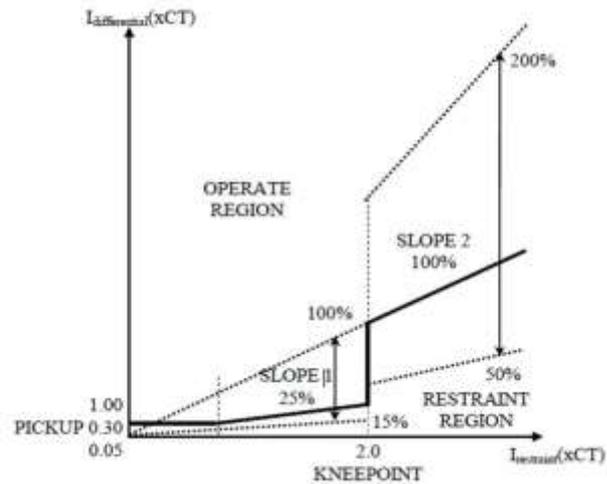
Karakteristik rele diferensial dibuat dengan prinsip keseimbangan arus untuk menghindari kesalahan kerja. Kesalahan kerja yang diakibatkan oleh trafo arus (CT), yaitu terjadi pergeseran fasa yang diakibatkan oleh belitan trafo daya hubungan Y – (star – delta). Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.12



Gambar 2. 14 Cara pengoperasian rele differential

(Sumber :Liem Ek Biem dan Dita Helna, 2007)

Trafo arus (CT) juga dapat berubah dikarenakan posisi tap changer pada trafo daya oleh on load tap changer (OLTC). Ketidakseimbangan arus (I_{μ}) yang bersifat transient disebabkan oleh beberapa faktor diantaranya, kesalahan akurasi CT (Current Transformer), Inrush current pada saat transformator energize dan perbedaan kesalahan CT di daerah jenuh (saturasi CT).



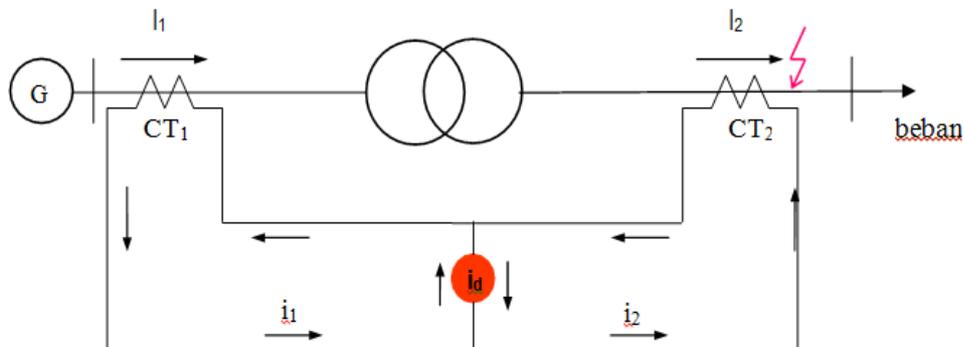
Gambar 2. 15 Karakteristik Rele Differential

Pada Gambar 2.13 merupakan karakteristik rele diferensial. Daerah bawah adalah bagian yang mengakibatkan rele diferensial tidak akan bekerja, sedangkan daerah

atas adalah bagian yang mengakibatkan rele bekerja atau daerah kerja rele diferensial.

2.2.4.1.2 Rele diferensial kondisi normal, gangguan eksternal

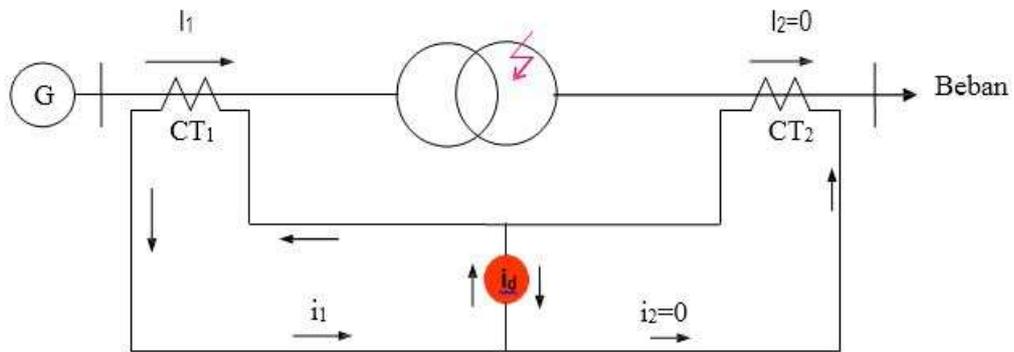
Pada saat terjadi gangguan diluar dari zona perlindungan rele diferensial, maka rele diferensial dalam keadaan normal dan tidak akan bekerja karena arus mengalir yang masuk dan yang keluar memiliki nilai arus yang sama, seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.15 dimana pada kondisi normal jumlah arus yang mengalir melalui peralatan listrik yang diproteksi bersikulasi melalui loop pada kedua sisi di daerah kerja rele diferensial tersebut, sehingga nilainya adalah ($I_d = I_p - I_s = 0$) atau $I_1 = I_2$.



Gambar 2. 16 Rele differential saat gangguan eksternal

2.2.4.1.3 Rele diferensial kondisi tidak normal, gangguan internal

Pada saat terjadi gangguan didalam dari zona perlindungan rele diferensial, maka rele diferensial dalam keadaan tidak normal dan rele akan bekerja dimana arus mengalir yang masuk dan yang keluar memiliki nilai arus berbeda ($I_1 \neq I_2$), sehingga arus dari kedua sisi akan saling menjumlah ketika yang mengalir didaerah zona proteksi melebihi batas arus setting Pada saat kondisi arus yang mengalir di dalam daerah yang dilindungi oleh rele diferensial melebihi batas dari arus setting, maka rele diferensial akan memerintahkan pemutus tenaga (PMT) atau circuit breaker (CB) untuk memutuskan jaringan, sehingga transformator bebas dan aman dari gangguan yang terjadi.



Gambar 2. 17 Rele differential saat gangguan internal

2.2.4.1.4 Teori Perhitungan *setting doifferential relay*

1. Perhitungan Rasio CT

Adapun Rumus perhitungan dari arus rating dan arus nominal adalah sebagai berikut:

$$I_{nominal} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V}$$

$$I_{rating} = 110\% \times I_{nominal}$$

Keterangan :

I_n = arus nominal (A)

S = daya tersalur (MVA)

V = tegangan pada sisi primer dan sekunder (KV)

Arus nominal merupakan arus yang mengalir pada tegangan tinggi dan tegangan rendah.

2. Error Mismatch

Error mismatch yaitu suatu kesalahan yang terjadi dalam pembacaan arus disisi tegangan tinggi dan tegangan rendah. Adapun cara menghitung besarnya arus mismatch adalah dengan cara membandingkan antara rasio CT ideal dengan rasio CT yang ada di pabrikan atau pasaran, dengan ketentuan error tidak boleh lebih dari 5% dari rasio CT yang dipilih. Adapun rumus perhitungan besarnya error mismatch yaitu :

$$\text{Error mismatch} = \frac{CT \text{ Ideal}}{CT \text{ Terpaang}} \%$$

$$\frac{CT2}{CT1} = \frac{V1}{V2}$$

$$CT1 \quad V2$$

Keterangan:

CT (Ideal) = trafo arus ideal

V1 = tegangan sisi tinggi

V2 = tegangan sisi rendah

3. Arus Sekunder CT

Arus sekunder CT merupakan arus yang terbaca oleh trafo arus.

$$I_{\text{Sekunder}} = \frac{1}{\text{Rasio CT}} I_n$$

4. Arus Differensial

Arus differensial merupakan selisih arus pada sisi tegangan tinggi dan tegangan rendah.

Rumus arus differensial :

$$I_{\text{dif}} = I_2 - I_1$$

Keterangan:

I_{dif} = arus differensial

I_1 = arus sekunder CT1

I_2 = arus sekunder CT2

5. Arus Penahan (restrain)

Arus penahan (restrain) merupakan arus yang didapat dari arus sekunder trafo arus di sisi tegangan tinggi dan tegangan rendah.

$$I_r = \frac{I_1 + I_2}{2}$$

Keterangan:

I_r = Arus penahan (A)

I_1 = Arus sekunder CT1 (A)

I_2 = Arus sekunder CT2 (A)

6. Slope

Slope 1 merupakan perhitungan yang akan menentukan kesensitifan arus differensial untuk bekerja mentriapkan jaringan apabila terjadi gangguan internal Sedangkan slope 2 merupakan perhitungan yang menentukan relay differensial tidak akan bekerja apabila terjadi gangguan eksternal.

$$Slope1 = \frac{I_d}{I_r} \times 100\%$$

$$Slope2 = \frac{(I_d \times 2)}{I_r} \times 100\%$$

Keterangan:

Slope1 : setting kecuraman 1

Slope2 : setting kecuraman 2

I_d : Arus Differential (A)

I_r : Arus Restrain (A)

7. Arus Setting

Arus setting yaitu didapat dengan mengalikan antara slope dan arus restrain. Sehingga arus setting inilah yang nanti akan dibandingkan dengan arus differential.

$$I_{set} = \%slope \times I_{restrain}$$

Keterangan:

I_{set} : Arus Setting

% slope : Setting Kecuraman (%)

$I_{restrain}$: Arus Penahan

2.2.4.2 Rele Gangguan Tanah atau Ground Fault Relay (GFR)

Ground fault relay digunakan untuk mengamankan transformator dari kerusakan akibat gangguan tanah dengan mendeteksi gangguan ke tanah. Relay ini dilengkapi oleh CT, kumparan kerja rele, kumparan tripping dimana pada kondisi normal, ketika tidak ada gangguan pada transformator, maka jumlah arus ketiga fase sama dengan nol ($I_1 + I_2 + I_3 = 0$) sehingga pada inti trafo jumlah fluksnya sama

dengan nol, sedangkan ketika terjadi gangguan tanah maka jumlah fluks pada inti trafo tidak lagi nol.

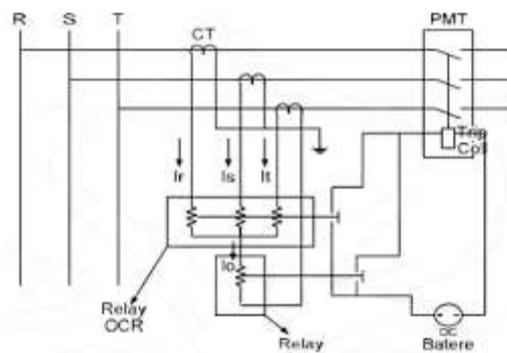
2.2.4.3 Restricted Earth Fault (REF) atau Relai Gangguan Tanah Terbatas.

Relai gangguan tanah terbatas digunakan untuk mengamankan transformator listrik bila terjadi gangguan satu fase ketanah yang tidak dapat dirasakan oleh relai diferensial.

2.2.4.4 Relai Overcurrent (OCR)

Overcurrent relay adalah suatu relai dimana bekerjanya berdasarkan adanya kenaikan arus yang melewatinya. Agar peralatan tidak rusak bila dilewati arus yang melebihi kemampuannya, selain peralatan tersebut diamankan terhadap kenaikan arusnya, maka peralatan pengamannya harus dapat bekerja pada jangka waktu yang telah ditentukan.

Adapun prinsip kerja *overcurrent relay* (OCR) yaitu Relai yang akan bekerja ketika terjadi arus lebih, Relai OCR akan bekerja apabila arus yang mengalir melewatinya melebihi dari nilai setting arusnya. Relai ini bekerja dengan membaca inputan berupa besaran arus yang mengalir padanya yang kemudian membandingkan dengan nilai setting pada relai tersebut, jika nilai arus yang terbaca pada relai OCR melebihi nilai settingnya, maka relai akan memberi perintah ke pemutus tenaga (PMT) atau circuit breaker (CB) untuk trip (lepas), setelah waktu tunda selesai sesuai yang diterapkan setting.



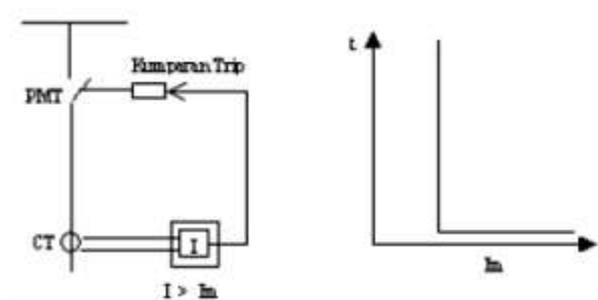
Gambar 2. 18 Prinsip kerja rele overcurrent

2.2.4.4.1 Karakteristik Over Current Relay

Berdasarkan karakteristiknya relai arus lebih dibagi menjadi beberapa jenis diantaranya adalah sebagai berikut:

a. Relé Waktu Seketika (*Instantaneous*)

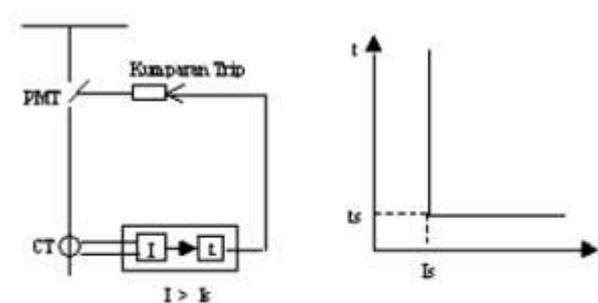
Relé instantaneous adalah relai yang akan bekerja secara seketika tanpa adanya waktu tunda, jadi ketika suatu arus yang mengalir didapatkan melebihi dari settingan yang telah dipasang maka relai akan bekerja dan memutus PMT akan trip.



Gambar 2. 19 Relé waktu seketika

b. Relé Waktu Tertentu (*Definite Time*)

Relé definite time yaitu relé yang akan bekerja apabila arus gangguan melebihi arus setting (I_s) dan relé akan memberi perintah PMT untuk trip setelah selang waktu tertentu yang telah disetting (T_s) yang tetap. Adapun pada relé definite time pengoperasian kerja tidak tergantung nilai setting arus asal dari relé tersebut dan arus dan waktu tundannya dapat diatur.



Gambar 2. 20 Relé waktu tertentu

c. Rele arus lebih waktu terbalik (*inverse time*)

Rele *inverse time* adalah rele yang akan bekerja jika arus gangguan melebihi arus setting (I_s) sehingga rele akan memberi perintah memutus PMT untuk *trip* akan tetapi dengan selang waktu yang tidak tetap tergantung dari besarnya arus gangguan. Semakin besar nilai dari arus gangguan maka nilai delay (waktu tunda) dari rele akan semakin cepat. Pada rele *inverse time* terbagi menjadi beberapa jenis diantaranya *standard inverse time*, *very inverse time*, *extremely inverse time*, *long time inverse*.

Pada *standard inverse* ini memiliki rumus umum dengan ketentuan sebagai berikut:

$$t = \frac{0.14}{I^{0.02-1}} \text{ tms}$$

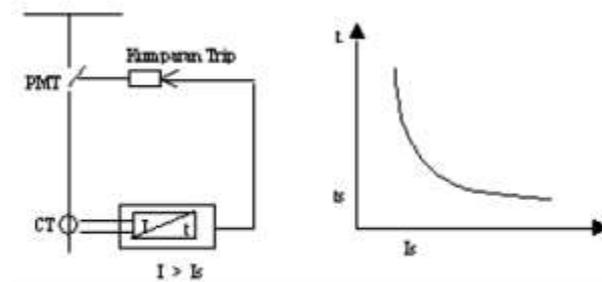
Keterangan:

t : Time setting relay

tms : Standar waktu setting relay

K : Konstanta *standard inverse* (0,14)

α : Konstanta *standard inverse* (0,02)



Gambar 2. 21 Rele arus lebih waktu terbalik

2.2.4.4.2 Teori Perhitungan *Setting Overcurrent Relay*

Dalam melakukan *setting overcurrent relay (OCR)* biasanya dengan menghitung hasil dari perhitungan arus gangguan akibat hubung singkat, yang akan digunakan untuk mensetting arus lebih, terutama nilai setting time multiple setting (TMS) dari rele arus lebih karakteristik jenis *standard inverse*. selain itu ketika nilai

setting rele telah diperoleh, nilai arus gangguan hubung singkat dapat diasumsikan, dan digunakan untuk memeriksa rele arus lebih tersebut, dengan menganalisa apakah settingan masih efektif dan elektif atau nilai settingan harus diubah ke nilai lain yang memberikan kerja rele yang lebih efektif dan selektif, atau telah rele telah memiliki selektivitas yang optimum dimana rele tidak bekerja terlalu lama tetapi menghasilkan selektivitas yang handal.

Adapun untuk melakukan arus setting pada OCR disisi primer transformator daya adalah :

Agar mendapatkan nilai settingan sekundet untuk deset pada relay OCR maka perlu dilakukan perhitungan dengan menggunakan trafo (CT) yang terpasang pada sisi primer maupun sisi sekunder transformator daya.

$$I_{set}(sek) = I_{set}(prim) \times \frac{1}{ratio\ CT}$$

Keterangan

Inom : Arus nominal pada transformator

Iset : Setting Arus

Iset (Prim)= 1,05 x Inom trafo

Ratio CT= ratio current transformer

Adapun untuk pen-settingan arus pada OCR dihitung berdasarkan arus beban yang mengalir dipenyulang atau incoming feeder yaitu untuk kerja OCR yang terpasang dipenyulang masuk incoming feeder dihitung berdasarkan arus nominal transformator tenaga dan untuk kerja OCR yang terpasang di penyulang keluar outgoing feeder dihitung berdasarkan arus beban maksimum beban puncak yang mengalir pada penyulang tersebut. Menurut british standard untuk rele inverse sering disetting sebesar 1,05 s/d 1,3 x Ibeban, sedangkan rele definite disetting sebesar 1,2 s/d 1,3 x Ibeban.

Tabel 2. 1 Konstanta Karakteristik OCR Standar ANSI/IEEE dan IEC

Tipe kurva Standard α β L

Tipe Kurva	Standard	α	β	L
Moderately inverse	IEEE	0.02	0,0515	0,114
Very inverse	IEEE	2.0	19,61	0,491
Extremely inverse	IEEE	2.0	28,2	0,1217
Inverse	CO8	2.0	5,95	0,18
Short-time inverse	CO2	0.02	0,0239	0,0169
Strandard inverse	IEC	0.02	0,14	0
Very inverse	IEC	1.0	80,0	0
Extremely inverse	IEC	2.0	80,0	0
Long-time inverse	UK	1.0	120	0

Sumber: Gers, Juan M. (2004:73)

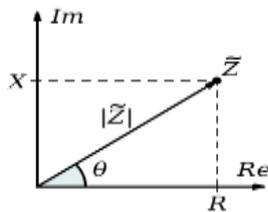
Standar IEEE Std 242-2001 menyatakan bahwa nilai *grading time* sebesar 0.2-04 detik. Hal ini dipengaruhi oleh:

1. Kesalahan kerja rele
2. Faktor keamanan
3. Waktu pembukaan PMT hingga hilang bunga api

Adapun untuk penyetingan waktu minimum kerja dari rele arus lebih terutama dibagian penyulang memiliki persyaratan lain yang harus dipenuhi yaitu waktunya tidak boleh lebih kecil dari 0,3 detik. Pertimbangan ini digunakan untuk mencagah relay samapai trip kembali akibat arus inrush dari transformator distribusi yang sudah tersambung di jaringan distribusi, pada saat PMT dioperasikan oleh penyulang tersebut. Sebelum menentukan penyetingan pada setting dari waktu rele diawal dilakukan menghitung beberapa perhitungan seperti impedansi transformator yang terdapat di GI dan beberapa perhitungan lainnya yang dapat digunakan diantaranya:

1. Perhitungan impedansi

Impedansi merupakan AC ekivalen terhadap resistansi pada sistem DC dengan penambahan efek reaktansi. Impedansi disimbolkan dengan huruf Z dan merupakan penjumlahan vektor antara resistansi dan reaktansi.



Gambar 2. 22 Diagram Hubungan Impedansi

Dengan persamaan rumus:

$$Z = R + j$$

Dimana,

Z = Impedansi (Ω)

R = Resistansi (Ω)

X = Reaktansi (Ω)

Reaktansi merupakan fenomena pada sistem AC yang terdiri dari reaktansi induktif dan kapasitif. Energi dibutuhkan komponen untuk bereaksi terhadap sumber dan berakibat menurunkan ketersediaan daya yang dapat digunakan.

a. Perhitungan impedansi kabel

Impedansi kabel dipengaruhi oleh panjang, luas penampang dan jenis penghantar yang digunakan. Perhitungan impedansi kabel bergantung pada nilai dari resistansi kabel yang terdapat pada data sheet pabrikan. Pada dasarnya persamaan yang digunakan untuk mencari impedansi kabel sama dengan persamaan impedansi umum yaitu:

$$Z = R + jX$$

Dimana: Z = Impedansi

R = Resistansi

X = Reaktansi

b. Perhitungan impedansi transformator

Perhitungan impedansi transformator dapat dilakukan dengan mengamati nameplate transformator yang menampilkan spesifikasi dari transformator. Persamaan yang digunakan untuk memperoleh nilai impedansi dari transformator adalah:

$$Z_{trafo} = Z\% \frac{V_p^2}{S}$$

Dimana: Z_{trafo} = impedansi transformator (Ω)

$Z\%$ = presentase impedansi transformator

V_p = Tegangan primer transformator (V)

S = Daya maksimal transformator (VA)

c. Perhitungan impedansi sumber

Untuk perhitungan impedansi sumber dilakukan dengan persamaan:

$$Z_s = \frac{V^2}{P_{sc}}$$

Dimana, Z_s = impedansi sumber (Ω)

V = tegangan sumber (V)

P_{sc} = daya hubung singkat (VA_{sc})

(Pranayuda dkk, 2012)

Adapun jika daya hubung singkat belum diketahui maka dapat dilakukan perhitungan dengan rumus sebagai berikut:

$$P_{sc} = \sqrt{3} \times I_{sc} \times V$$

Keterangan :

P_{sc} = Daya hubung singkat (VA_{sc})

I_{sc} = Arus hubung singkat (A)

V = Tegangan (V)

2. Setting Time Multiple Setting (TMS)

Untuk melakukan setting TMS dan setting waktu kerja relay pada jaringan distribusi biasanya menggunakan standard inverse yang dihitung dengan menggunakan rumus kurva waktu dan arus, dalam hal ini juga dapat diambil persamaan dari kurva arus waktu standard british, sebagai berikut:

$$TMS = \frac{t \times \left\{ \left(\frac{Ifault}{Iset} \right)^\alpha - 1 \right\}}{\beta}$$

Dan

$$t = \frac{\beta \times TMS}{\left(\frac{Ifault}{Iset} \right)^\alpha - 1}$$

Keterangan :

TMS : Time Multiple Setting

t : Waktu Trip (s)

Ifault : Besarnya arus gangguan hubung singkat (A)

setelan OCR inverte diambil arus gangguan hubung singkat terbesar

Iset : besarnya arus setting disisi primer (A)

Setelan OCR inverse diambil standard (BS) 1,05 s/d 1,3 x Ibeban

α , β :Konstanta

3. Perhitungan Arus Nominal (*Full Load Ampere*)

Arus nominal merupakan arus maksimal yang digunakan beban dalam keadaan normal. Arus nominal dapat dihitung dengan:

- Diketahui daya semu beban

$$In = \frac{S}{\sqrt{3} \times V}$$

Dimana, In = kuat arus nominal (A)

S = daya semu (VA)

V = tegangan (V)

- Diketahui daya aktif beban

$$In = \frac{P}{\sqrt{3} \times V \times eff \times pf}$$

Dimana, In = arus nominal (A)

P = daya aktif (w)

V = tegangan (V)

Eff = efisiensi motor

Pf = faktor daya motor

- Perhitungan arus nominal transformator sisi primer

$$I_n = \frac{Strafo}{\sqrt{3} \times V_p}$$

Dimana, I_n = arus nominal (A)

Strafo = kapasitas daya trafo (VA)

V_p = tegangan primer trafo (V)

- Perhitungan arus nominal transformator sisi sekunder

$$I_n = \frac{Strafo}{\sqrt{3} \times V_s}$$

Dimana, I_n = arus nominal (A)

Strafo = kapasitas daya trafo (VA)

V_s = tegangan sekunder trafo (V)

Perhitungan pada bidang kelistrikan banyak diturunkan dari suatu persamaan yang sangat dasar yaitu hukum ohm. Hukum ohm menyatakan bahwa nilai arus akan berbanding lurus dengan tegangan dan berbanding terbalik dengan hambatan.

4. Perhitungan arus hubung singkat

Pada umumnya perhitungan arus hubung singkat merupakan penjabaran dari hukum ohm pada sistem DC:

$$I = \frac{V}{R}$$

Dimana pada AC nilai R (resistansi) digantikan dengan nilai Z yang merupakan penjumlahan vektor antara R (resistansi) dan X (reaktansi). Sehingga diperoleh persamaan:

$$I = \frac{V}{Z}$$

Dari persamaan dasar tersebut didapatkan persamaan untuk menghitung arus hubung singkat yang terjadi pada busbar, yaitu:

$$I_{SC} = \frac{cVL-N}{Z_{ekivalen}}$$

$$I_{SC} = \frac{cVL-L}{\sqrt{3} \times Z_{ekivalen}}$$

Dimana I_{sc} = kuat arus hubung singkat (A)

I = Arus (A)

V_{L-L} = Tegangan fasa ke fasa (V)

V_{L-N} = Tegangan fasa ke netral (V)

R = Resistansi (Ω)

V_p = Tegangan primer (V)

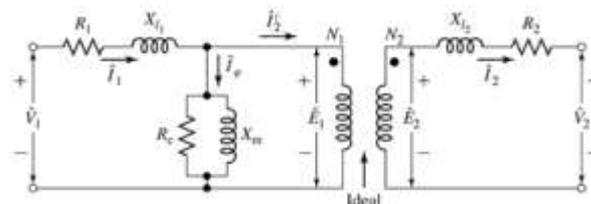
Z_{kabel} = Impedansi kabel (Ω)

Z_{trafo} = Impedansi transformator (Ω)

Z_{sumber} = Impedansi sumber (Ω)

C = Faktor tegangan (bernilai 1,05 untuk tegangan dibawah 1 kV dan 1,1 untuk tegangan diatas 1 kV)

Rumus dasar dimana impedansi/ hambatan yang dipasang secara seri merupakan rangkaian pembagi tegangan sedangkan impedansi/ hambatan yang dipasang secara paralel merupakan rangkaian pembagi arus.



Gambar 2. 23 Rangkaian Ekivalen 1 fasa

Dimana rangkaian tersebut dapat disederhanakan menjadi gambar b. Untuk memperoleh nilai V_{Zp} dihitung dengan rumus

$$V_{Zp} = I_{total} \times Z_p$$

Pada rangkaian paralel untuk mencari nilai arus yang melewati Z_1 adalah

$$I_{Z1} = \frac{V_p}{Z_1} = \frac{I_{total} \times Z_p}{Z_1}$$

2.2.5 Software ETAP 12.6

ETAP atau (*Electric Transient and Analysis Program*) merupakan perangkat lunak atau *software* yang digunakan untuk mendukung sistem tenaga listrik. Perangkat lunak ETAP dapat bekerja pada keadaan offline untuk simulasi tenaga listrik, dan pada keadaan online untuk pengelolaan data real-time atau untuk mengendalikan sistem secara real-time. Fitur yang terdapat di dalam *software* ini bermacam-macam diantaranya fitur yang digunakan untuk menganalisa pembangkitan tenaga listrik, sistem transmisi maupun sistem distribusi tenaga listrik. ETAP ini pada awalnya dikembangkan dan dibuat untuk meningkatkan kualitas keamananan fasilitas nuklir di Arnerika Serikat yang selanjutnya dikembangkan menjadi sistem monitor manajemen energi secara real time, simulasi, kontrol, dan optimasi pada sistem tenaga listrik, (Awaluddin, 2007). ETAP dapat digunakan untuk membuat proyek sistem tenaga listrik yang mampu disimulasikan pada program yang telah dibuat dengan langkah-langkah yang tepat dalam bentuk diagram satu garis (*one line diagram*) dan jalur sistem pentanahan untuk berbagai bentuk analisis dan, antara lain: aliran daya, hubung singkat, starting motor, trancient stability, koordinasi relay proteksi dan sistem harmonisasi. Proyek sistem tenaga listrik memiliki elemen rangkaian masing-masing yang dapat diedit langsung dari diagram satu garis dan jalur sistem pentanahan. Hasil perhitungan analisis dapat ditampilkan pada diagram satu garis.

Adapun beberapa analisa untuk sistem tenaga listrik yang dapat dilakukan pada *software* ETAP antara lain:

1. Analisa aliran daya (*Load flow analysis*)
2. Analisa hubung singkat (*Short circuit analysis*)
3. Motor starting
4. Arc flash analysis
5. Harmonics power system
6. Analisa kestabilan transien (*Transient stability analysis*)
7. Protective device coordination