

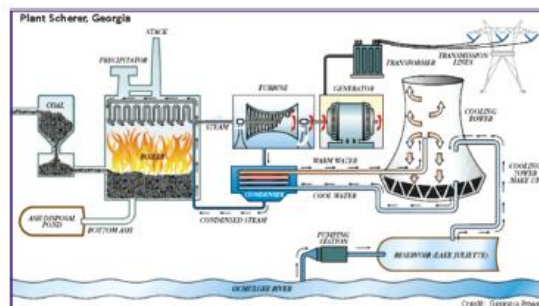
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik

Pembangkit tenaga listrik ialah suatu alat/peralatan yang berfungsi untuk membangkitkan tenaga listrik dengan cara mengubah energi potensial menjadi tenaga mekanik, selanjutnya menjadi tenaga listrik. Istilah lain yang dipakai untuk menyebut pembangkit tenaga listrik ialah pusat tenaga listrik. Untuk mendapatkan energi listrik dapat memanfaatkan bermacam-macam sumber energi, misalnya tenaga air, tenaga angin, bahan bakar fosil, dan bahan bakar nuklir. Dengan memakai sumber energi tersebut diperoleh tenaga untuk menggerakkan turbin yang akan mengaktifkan generator listrik. Energi listrik yang dihasilkan harus diubah menjadi tegangan yang sesuai untuk transmisi. Setelah proses ini, arus listrik dialirkan melalui jaringan kabel transmisi ke daerah yang memerlukan. Pada proses pembangkitan tenaga listrik telah terjadi proses perubahan energi mekanik menjadi energi listrik. Salah satu pembangkit yang paling banyak di Indonesia adalah PLTU.

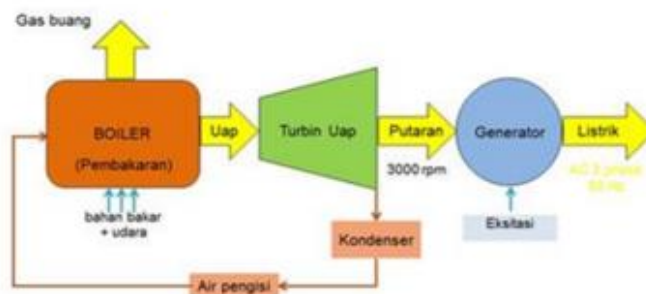
Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah pembangkit yang mengandalkan energi kinetik dari uap yang menghasilkan energi listrik. Bentuk utama pembangkit listrik jenis ini adalah Generator yang dihubungkan ke turbin dimana untuk memutar turbin diperlukan energi kinetik dari uap panas atau kering.³



Gambar 2. 1 Skema PLTU

³ Hestika Eirene Patoding, Matius Sau, Energi dan Operasi Tenaga Listrik dengan Aplikasi ETAP, (Yogyakarta: DEEPUBLISH, 2019), h.23

Tingginya jumlah persediaan batu bara baik secara global maupun di Indonesia serta harga yang rendah menjadikan PLTU berbahan bakar batu bara masih menjadi salah satu yang tertinggi produksinya. Dalam PLTU, batu bara digunakan sebagai bahan bakar boiler untuk menghasilkan energy panas yang kemudian berfungsi untuk mengubah fasa fluida kerja dari cair menjadi uap. Energi kinetik yang terkandung dalam uap kemudian dimanfaatkan untuk memutar turbin yang tersambung dengan generator.⁶ Dalam operasinya, secara umum PLTU memiliki komponen seperti pada gambar di bawah ini:



Gambar 2. 2 Komponen Pada PLTU

2.2 Transformator

2.2.1 Pengertian Transformator

Transformator adalah suatu alat listrik statis yang digunakan untuk mengubah tegangan bolak-balik menjadi lebih tinggi atau lebih rendah dan digunakan untuk memindahkan energi dari suatu rangkaian listrik ke rangkaian lainnya tanpa merubah frekuensi. Transformator disebut peralatan statis karena tidak ada bagian yang bergerak atau berputar, tidak seperti motor atau generator.

Transformator merupakan alat elektromagnetik yang mentransfer energi listrik dari satu rangkaian (kumparan primer) ke rangkaian lain (kumparan sekunder) dengan induksi magnet bersama.¹ Dalam bentuknya yang paling sederhana, transformator terdiri atas dua kumparan dan satu induktansi mutual.

⁶ Maesha Gusti Rianta, <https://indonesiare.co.id/id/article/pembangkit-listrik-tenaga-uap-pltu>. Diakses pada 4 April 2022

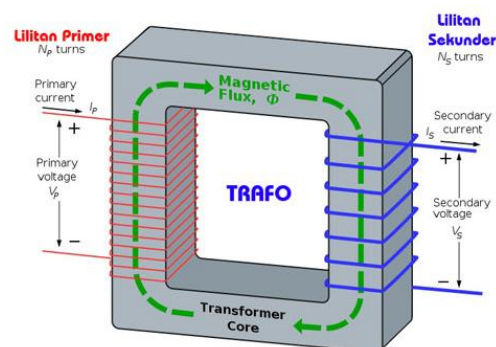
¹ Irwan Iftadi, *Keistrikan Industri*, (Yogyakarta : Graha Ilmu, 2015), h.149

Dua kumparan tersebut terdiri dari kumparan primer dan kumparan sekunder. Kumparan primer adalah kumparan yang menerima daya dan dinyatakan sebagai terminal masukan dan kumparan sekunder adalah kumparan yang melepas daya dan dinyatakan sebagai terminal keluaran. Kedua kumparan dibelit pada suatu inti yang terdiri atas material magnetik berlaminasi. Secara sederhana transformator dapat dibagi menjadi tiga bagian, yaitu lilitan primer, lilitan skunder, dan inti besi.

Lilitan primer merupakan bagian transformator yang terhubung dengan sumber energi (catu daya). Lilitan sekunder merupakan bagian transformator yang terhubung dengan rangkaian beban. Sedangkan inti besi merupakan bagian transformator yang bertujuan untuk mengarahkan keseluruhan fluks magnet yang dihasilkan oleh lilitan primer agar masuk ke lilitan sekunder.

2.2.2 Prinsip Kerja Transformator

Transformator atau Transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Berdasarkan pada hukum tersebut maka apabila sebuah kumparan (primer) dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik (AC) maka akan timbul fluks bolak-balik pada inti yang terbungkus kumparan.⁷ Kumparan tersebut membuat jaringan tertutup, sehingga mengalir arus primer. Karena adanya fluks pada kumparan primer, maka pada kumparan primer terjadi induksi sendiri (*self induction*). Pengaruh induksi dari kumparan primer membuat kumparan sekunder juga terjadi induksi.



Gambar 2. 3 Prinsip Kerja Transformator

⁷ <https://elektro.uma.ac.id/2021/03/20/pengertian-sejarah-dan-cara-kerja-transformator/#:~:text=Seperti%20yang%20sudah%20kita%20ketahui,pada%20inti%20yang%20terbungkus%20kumparan> . Diakses pada 4 April 2022

Induksi pada kumparan sekunder biasa disebut induksi bersama (*mutual induction*). Induksi yang terjadi pada kumparan sekunder menyebabkan terjadinya fluks magnet. Fluks magnet pada kumparan sekunder menghasilkan gaya gerak listrik. Ketika rangkaian sekunder ini diberi beban maka mengalir arus sekunder akibat dari gaya gerak listrik yang terjadi. Bisa dikatakan Transformator ini meneruskan tenaga listrik secara magnetik.

2.2.3 Jenis-jenis Transformator

Ada beberapa jenis transformator yang digunakan dalam sistem kelistrikan untuk keperluan yang berbeda-beda. Keperluan-keperluan tersebut diantaranya seperti transformator yang digunakan untuk pembangkit tenaga listrik, distribusi dan transmisi tenaga listrik. Perangkat yang dalam bahasa Inggris disebut dengan *transformer* ini dapat diklasifikasikan berdasarkan beberapa jenis, diantaranya seperti pengklasifikasian berdasarkan level tegangan, berdasarkan media atau bahan inti (*core*) transformator yang digunakan, berdasarkan pengaturan lilitan, berdasarkan penggunaannya dan juga berdasarkan tempat penggunaannya. Berikut ini adalah beberapa jenis transformator berdasarkan masing-masing pengklasifikasiannya.

a) Jenis-jenis Transformator berdasarkan Level Tegangan :⁸

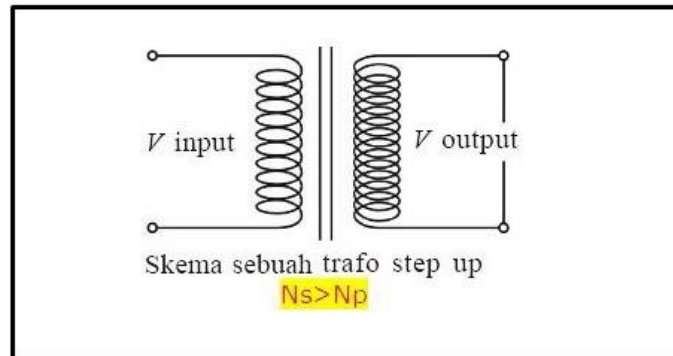
Transformator yang diklasifikasikan berdasarkan level tegangan ini merupakan transformator yang paling umum dan sering kita gunakan. Pengklasifikasian ini pada dasarnya tergantung pada rasio jumlah gulungan di kumparan Primer dengan jumlah kumparan Sekundernya. Jenis transformator berdasarkan Level tegangan ini diantaranya adalah Transformator Step Up dan Transformator Step Down.

1. Transformator *Step-Up*

Transformator *step-up* adalah transformator yang memiliki lilitan sekunder lebih banyak daripada lilitan primer, sehingga berfungsi sebagai penaik tegangan. Transformator ini biasa ditemui pada pembangkit tenaga

⁸ <https://artema.co.id/jenis-jenis-transformator/>. Diakses pada 5 April 2022

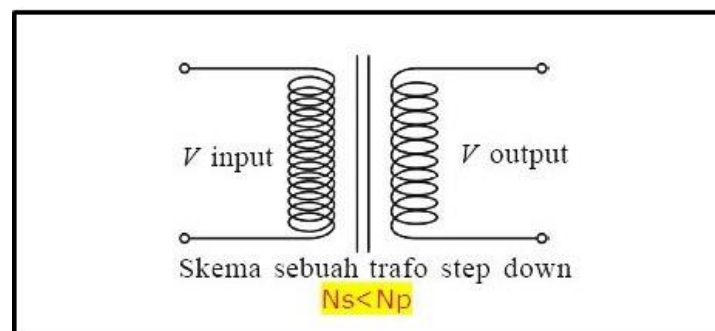
listrik sebagai penaik tegangan yang dihasilkan generator menjadi tegangan tinggi yang digunakan dalam transmisi jarak jauh.



Gambar 2. 4 Transformator Step-Up

2. Transformator Step-Down

Transformator *step-down* memiliki lilitan sekunder lebih sedikit daripada lilitan primer, sehingga berfungsi sebagai penurun tegangan. Transformator jenis ini sangat mudah ditemui, terutama dalam adaptor AC-DC. Di jaringan Distribusi, transformator atau Transformator step down ini biasanya digunakan untuk mengubah tegangan grid yang tinggi menjadi tegangan rendah yang bisa digunakan untuk peralatan rumah tangga. Sedangkan di rumah tangga, kita sering menggunakannya untuk menurunkan taraf tegangan listrik yang berasal dari PLN (220V) menjadi taraf tegangan yang sesuai dengan peralatan elektronik kita.



Gambar 2. 5 Transformator Step-Down

b) Jenis-jenis Transformator berdasarkan Bahan Inti (*core*) yang Digunakan

Berdasarkan media atau bahan Inti yang digunakan untuk lilitan primer dan lilitan sekunder, Transformator dapat dibedakan menjadi 2 jenis yaitu Transformator berinti Udara (*Air Core*) dan Transformator berinti Besi (*Iron Core*).

1. Transformator berinti Udara (*Air Core Transformer*)

Pada Transformator yang berinti Udara, Gulungan Primer dan Gulungan Sekunder dililitkan pada inti berbahan non-magnetik yang biasanya berbentuk tabung yang berongga. Bahan non-magnetik yang dimaksud tersebut dapat berupa bahan kertas ataupun karton. Ini artinya, hubungan hubungan fluks antara gulungan primer dan gulungan sekunder adalah melalui udara. Tingkat kopling atau induktansi mutual diantara lilitan-lilitan tersebut lebih kecil dibandingkan dengan Transformator yang berinti besi. Kerugian Histerisis dan kerugian arus eddy yang biasanya terjadi pada Transformator inti besi dapat dikurangi atau bahkan dapat dihilangkan pada Transformator yang berinti udara ini. Transformator inti udara ini biasanya digunakan pada rangkaian frekuensi tinggi.

Transformator inti udara tidak menggunakan bahan apapun sebagai inti. Jadi proses induksi elektromagnetik hanya merambat melalui medium udara sepenuhnya. Transformator semacam ini memiliki kelemahan yaitu daya yang dihasilkan lebih lemah jika dibandingkan dengan Transformator inti besi. Hal itu karena induksi elektromagnetik yang lebih lemah. Transformator jenis ini banyak digunakan pada peralatan elektronik portabel seperti radio frekuensi. Selain itu, Transformator ini juga dapat digunakan sebagai komponen charger wireless yang dimana kumparan primer berada pada sumber listrik dan kumparan sekunder berada pada perangkat yang dicharger.

2. Transformator berinti Besi (*Iron Core Transformer*)

Pada Transformator berinti Besi, gulungan primer dan gulungan sekunder dililitkan pada inti lempengan-lempengan besi tipis yang dilaminasi. Transformator inti besi memiliki efisiensi yang lebih tinggi jika dibandingkan

dengan Transformator yang berinti udara. Hal ini dikarenakan bahan besi mengandung sifat magnetik dan juga konduktif sehingga mempermudah jalannya fluks magnet yang ditimbulkan oleh arus listrik kumparan serta untuk mengurangi suhu panas yang ditimbulkan. Transformator yang berinti besi biasanya digunakan pada aplikasi frekuensi rendah.

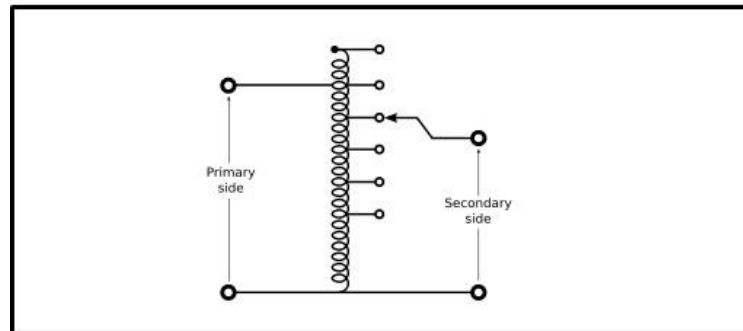
Transformator berinti besi menggunakan plat-plat yang terbuat dari besi lunak sebagai intinya. Bahan besi lunak tersebut dicampur dengan magnet yang dimaksudkan agar induksi elektromagnetik yang terjadi semakin besar dan efisiensi Transformator juga meningkat. Plat-plat besi yang digunakan tersebut memiliki bentuk dan ukuran yang beragam pada Transformator yang berbeda. Beberapa bentuk plat inti besi yang sering ditemui di pasaran yaitu berbentuk E, U, I, dan L. Karena konstruksi Transformator ini dominan dari besi sehingga memiliki bobot berat.

c) Jenis-jenis Transformator berdasarkan Pengaturan Lilitannya

1. Transformator Otomatis (Autotransformator)

Transformator jenis ini hanya terdiri dari satu lilitan yang berlanjut secara listrik, dengan sadapan tengah. Dalam transformator ini, sebagian lilitan primer juga merupakan lilitan sekunder. Fasa arus dalam lilitan sekunder selalu berlawanan dengan arus primer, sehingga untuk tarif daya yang sama lilitan sekunder bias dibuat dengan kawat yang lebih tipis dibandingkan transformator biasa. Keuntungan dari autotransformator adalah ukuran fisiknya yang kecil dan kerugian yang lebih rendah daripada jenis dua lilitan. Tetapi transformator jenis ini tidak dapat memberikan isolasi secara listrik antara lilitan primer dengan lilitan sekunder.

Transformator Otomatis ini sering digunakan sebagai Transformator step up dan step down yang berfungsi untuk menaikkan tegangan maupun menurunkan tegangan pada kisaran 100V-110V-120V dan kisaran 220V-230V-240V bahkan pada kisaran 110V hingga 220V.



Gambar 2. 6 Autotransformator

d) Jenis-jenis Transformator berdasarkan Penggunaannya

Transformator dapat digunakan untuk melakukan berbagai fungsi sesuai dengan kebutuhannya. Transformator jenis ini dapat diklasifikasikan menjadi Transformator daya, transformator distribusi, transformator pengukuran dan transformator proteksi.

1. Transformator Daya (*Power Transformer*)

Transformator Daya adalah jenis transformator yang berukuran besar dan digunakan untuk aplikasi transfer daya tinggi yang mencapai hingga 33 Kilo Volt. Transformator daya ini sering digunakan di stasiun pembangkit listrik dan gardu transmisi. Transformator Daya biasanya memiliki tingkat insulasi yang tinggi.

2. Transformator Distribusi (*Distribution Transformer*)

Transformator Distribusi atau *Distribution Transformer* digunakan untuk mendistribusikan energi listrik dari pembangkit listrik ke daerah perumahan ataupun lokasi industri. Pada dasarnya, Transformator Distribusi ini mendistribusikan energi listrik pada tegangan rendah yang kurang dari 33 kilo Volt untuk keperluan rumah tangga ataupun industri yang berada dalam kisaran tegangan 220V hingga 440V.

3. Transformator Pengukuran (*Measurement Transformer*)

Transformator Pengukuran atau dalam bahasa Inggris disebut dengan *Measurement Transformer* atau *Instrument Transformer* ini digunakan untuk mengukur kuantitas tegangan, arus listrik dan daya yang biasanya

diklasifikasikan menjadi transformator tegangan dan transformator arus listrik dan lain-lainnya.

4. Transformator Proteksi (*Protection Transformer*)

Transformator Proteksi ini digunakan untuk melindungi komponen listrik. Perbedaan utama antara transformator proteksi dan transformator pengukuran adalah pada akurasinya. Dimana transformator proteksi harus lebih akurat jika dibandingkan dengan transformator pengukuran.

e) **Jenis-jenis Transformator berdasarkan Frekuensi Operasi** ¹⁰

1. Transformator Frekuensi Rendah

Transformator frekuensi rendah merupakan transformator yang beroperasi pada frekuensi audio rendah (20 Hz – 20 kHz) dan frekuensi di atasnya selama masih dalam cakupan operasi frekuensi rendah. Transformator jenis ini biasanya menggunakan inti besi yang lunak, terutama pada penggunaan *amplifier* audio untuk *range* frekuensi audio. Contoh transformator yang beroperasi pada frekuensi rendah adalah seperti transformator adaptor dan transformator *output/input* (OT/IT).

Transformator adaptor adalah semacam transformator step down yang ditambahkan dengan rangkaian rectifier (penyearah gelombang) dengan tujuan untuk menghasilkan tegangan dengan arus searah (DC) yang kemudian disebut dengan adaptor. Dalam adaptor juga biasanya telah ditambahkan rangkaian regulator dengan tujuan agar tegangan yang dihasilkan mendekati DC murni (arus searah tanpa noise). Sedangkan transformator output/input lebih sering digunakan untuk keperluan kopling audio pada rangkaian amplifier karena transformator output/input memberikan hasil yang lebih maksimal.

2. Transformator Frekuensi Menengah

Sesuai dengan namanya transformator ini beroperasi pada frekuensi menengah. Transformator ini juga memiliki nama lain yaitu transformator IF

¹⁰ <https://www.belajaronline.net/2020/06/macam-macam-transformator-beserta-fungsinya.html?m=1>. Diakses 6 April 2022

(*Intermediate Frequency*). Transformator IF banyak digunakan pada radio-radio penerima AM/FM. Pada transformator IF sudah terdapat lilitan primer dan lilitan sekunder yang telah dihubungkan secara paralel dengan kapasitor khusus dengan tujuan penggunaan frekuensi menengah sehingga membentuk rangkaian resonansi L-C. *Intermediate Frequency* (IF) sudah ada standarisasinya, yang mana untuk kebutuhan *Amplitudo Modulation* (AM) frekuensi menengah yang digunakan adalah 455 kHz, sedangkan untuk kebutuhan *Frequency Modulation* (FM) frekuensi menengah yang dibutuhkan adalah 10,7 MHz.

3. Transformator Frekuensi Tinggi

Transformator jenis ini beroperasi pada frekuensi yang tinggi dan banyak digunakan untuk pembangkit frekuensi (*osilator*), rangkaian resonansi, serta *flyback* pada televisi tabung. Transformator frekuensi tinggi yang digunakan untuk osilator disebut dengan spul osilator. Lilitan osilator yang umum digunakan biasanya terdapat 2 macam yaitu osilator *Hartley* dan osilator *Coolpits*. Selain itu, transformator frekuensi tinggi juga banyak digunakan sebagai transformator resonansi dimana transformator resonansi ini digunakan untuk menyesuaikan impedansi antara antena dan pemancarnya. Transformator resonansi ini biasa disebut juga dengan spul resonansi.

4. Transformator *Switching*

Transformator *switching* merupakan salah satu komponen yang digunakan pada power supply yang menggunakan teknologi *switching*. *Power supply* jenis ini menggunakan pembangkitan frekuensi tinggi yang memiliki efisiensi lebih baik dibandingkan *power supply* biasa yang hanya menggunakan transformator dengan frekuensi rendah. Transformator *switching* memiliki kelebihan dibandingkan transformator step down yang digunakan pada *power supply* biasa, yaitu terletak pada dimensinya yang jauh lebih kecil. Dengan menggunakan transformator *switching*, dimensi *power supply* dapat dipangkas hingga 75% dibandingkan *power supply* biasa. Transformator ini dapat dikatakan sebagai transformator ideal. Transformator *switching* yang digunakan pada *power supply switching* banyak digunakan pada peralatan

elektronika modern seperti printer, DVD *player*, *receiver* televisi, *power supply* komputer, *charger* laptop, *charger* hp dan banyak lagi.

f) **Jenis-jenis Transformator berdasarkan Tempat Penggunaannya**

Penggolongan Transformator berdasarkan tempat penggunaannya ini biasanya terdiri dari transformator *indoor* (dalam ruangan) transformator *outdoor* (luar ruangan). Transformator *Indoor* adalah transformator yang harus diletakan di dalam ruangan yang ditutupi dengan atap seperti transformator-transformator yang digunakan pada industri-industri sedangkan transformator *outdoor* adalah transformator yang dapat ditempatkan diluar ruangan seperti transformator distribusi yang ditempatkan di gardu induk dan lain-lainnya.

2.3 Sistem Proteksi

Sistem proteksi adalah suatu sistem pengamanan terhadap peralatan listrik, yang diakibatkan adanya gangguan teknis, gangguan alam, kesalahan operasi, dan penyebab yang lainnya. Sistem proteksi adalah susunan perangkat proteksi secara lengkap yang terdiri dari perangkat utama dan perangkat-perangkat lain yang dibutuhkan untuk melakukan fungsi tertentu berdasarkan prinsip-prinsip proteksi sesuai dengan definisi yang terdapat pada standar IEC 6255-20.² Sehingga sistem kelistrikan yang tidak terganggu dapat terus bekerja (mengalirkan arus ke beban atau konsumen). Jadi sistem proteksi itu sendiri adalah suatu pengaman listrik pada sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk mengamankan peralatan listrik dari gangguan listrik.

² Bonar Pandjaitan, Praktik-Praktik Proteksi Sistem Tenaga Listrik (Yogyakarta: ANDI, 2012), h.4

2.4 Persyaratan Sistem Proteksi

Pada sistem proteksi tenaga listrik, ada beberapa persyaratan yang harus dipenuhi demi mengamankan peralatan-peralatan listrik yang ada. Persyaratan yang harus dipenuhi oleh suatu sistem proteksi, seperti berikut ini:⁵

1. Kepekaan (*Sensitivity*)

Sistem proteksi harus mampu mendeteksi sekecil apapun ketidaknormalan sistem dan beroperasi dibawah nilai minimum gangguan. Pada prinsipnya relai harus cukup peka terhadap gangguan di kawasan pengamanannya, termasuk kawasan pengamanan cadangan-jauhnya, meskipun dalam kondisi yang memberikan deviasi yang minimum.

2. Selektivitas (*Selectivity*)

Sistem proteksi harus mampu menentukan daerah kerjanya dan atau fasa yang terganggu secara tepat. Zona proteksi harus tepat dan memadai untuk memastikan bahwa hanya bagian yang terganggu yang dipisahkan dari sistem pada saat terjadi gangguan atau kondisi abnormal. Pengamanan sedemikian disebut pengamanan yang selektif. Jadi relai harus dapat membedakan apakah :

- a) Gangguan terletak di kawasan pengamanan utamanya dimana ia harus bekerja cepat
- b) Gangguan terletak di bagian berikutnya dimana ia harus bekerja dengan waktu tunda (sebagai pengamanan cadangan) atau menahan diri untuk trip.
- c) Gangguannya diluar daerah pengamanannya, atau sama sekali tidak ada gangguan, dimana ia harus tidak bekerja sama sekali.

Untuk relai-relai, yang didalam *system* terletak secara seri, dikoordinir dengan mengatur peningkatan waktu (*time grading*) atau peningkatan setting arus (*current grading*), atau gabungan dari keduanya. Untuk itulah relai di buat dengan bermacam-macam jenis dan karakteristiknya. Dengan pemilihan jenis dan karakteristik relai yang tepat, spesifikasi Transformator arus yang benar, serta

⁵ Rahmad Wahyudi, Analisa Koordinasi Proteksi Relay Over Current (OCR) Sebagai Pengaman Transformator 43 MVA di PLTGU Gunung Megang Dengan Menggunakan Software ETAP 16.00, (Palembang: Politeknik Negeri Sriwijaya, 2018)

penentuan setting relai yang terkoordinir dengan baik, selektifitas yang baik dapat diperoleh.

3. Keandalan

Kemungkinan suatu sistem proteksi dapat bekerja benar sesuai fungsi yang diinginkan dalam kondisi dan jangka waktu tertentu. Proteksi diharapkan bekerja pada saat kondisi yang diharapkan terpenuhi dan tidak boleh bekerja pada kondisi yang tidak diharapkan. (SPLN T5.002-1:2010). Keandalan sistem proteksi terbagi menjadi tiga yaitu :

- a) Keterpercayaan (*Dependability*) yaitu keandalan kemampuan dalam bekerja. Pada prinsipnya pengaman harus dapat diandalkan bekerjanya (dapat mendeteksi dan melepaskan bagian yang terganggu), tidak boleh gagal bekerja.
- b) Keterjaminan (*Security*) yaitu tingkat kepastian untuk tidak salah kerja. Salah kerja adalah kerja yang semestinya tidak harus kerja, misalnya karena lokasi gangguan di luar lokasi pengamanya atau sama sekali tidak ada gangguan atau kerja yang terlalu cepat atau terlalu lambat. Salah kerja mengakibatkan pemadaman yang sebenarnya tidak perlu terjadi.
- c) *Availability* yaitu perbandingan antara waktu dimana pengaman dalam keadaan berfungsi/siap kerja dan waktu total dalam operasinya.

4. Kecepatan

Untuk memperkecil kerusakan/ kerugian akibat gangguan, maka bagian yang terganggu harus dipisahkan secepat mungkin dari bagian sistem lainnya. Waktu total pembebasan sistem dari gangguan adalah waktu sejak munculnya gangguan, sampai bagian yang terganggu benar-benar terpisah dari bagian sistem lainnya. Kecepatan itu penting untuk : Menghindari kerusakan secara thermis pada peralatan yang dilalui arus gangguan serta membatasi kerusakan pada alat yang terganggu.

- 1) Mempertahankan kestabilan sistem

- 2) Membatasi busur api pada gangguan disaluran udara yang akan berarti memperbesar kemungkinan berhasilnya penutupan balik PMT dan mempersingkat dead time (interval waktu buka dan tutup)

5. Ekonomis

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

2.5 Peralatan – Peralatan Sistem Proteksi

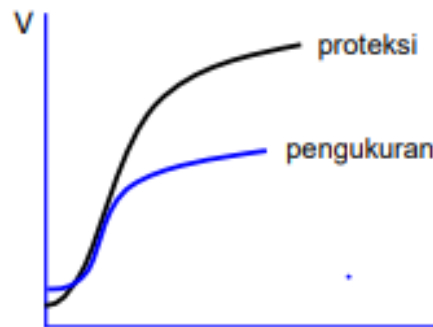
Untuk mengamankan peralatan dari gangguan, dilakukan dengan memasang peralatan-peralatan sistem proteksi. Sedangkan untuk menghilangkan gangguan dengan cepat oleh sistem perlingkungannya, diperlukan sistem operasi yang cepat dan benar

2.5.1 Pemutus Tenaga (PMT)

Circuit Breaker atau pemutus tenaga adalah peralatan listrik yang berfungsi menghubungkan atau memutuskan rangkaian listrik dalam keadaan normal atau tidak normal yang dilengkapi alat pemadam busur api. Ketika terjadi gangguan atau keadaan tidak normal, CB sebagai saklar otomatis harus dapat memisahkan bagian yang terganggu dengan bagian yang tidak terganggu. Proses pengoperasian CB ini menggunakan suatu rangkaian trip (*tripping coil*) yang mendapat sinyal dari relai pengaman

2.5.2 Transformator Arus

Transformator arus berfungsi untuk untuk menurunkan arus. Pada umumnya arus nominal sekunder Transformator arus adalah 5A atau 1A. Transformator arus dalam sistem tenaga listrik digunakan untuk keperluan pengukuran dan proteksi, batas kejenuhan Transformator arus untuk proteksi lebih tinggi dari pada Transformator arus untuk pengukuran.



Gambar 2. 7 Kurva Karakteristik Transformator Pengukuran dan Proteksi

2.5.3 Transformator Tegangan

Transformator tegangan adalah Transformator satu fasa *step-down* yang mentransformasi tegangan tinggi atau tegangan menengah ke suatu tegangan rendah yang layak untuk perlengkapan indikator, alat ukur, *relay*, dan alat sinkronisasi. Hal ini dilakukan atas pertimbangan harga dan bahaya yang dapat ditimbulkan tegangan tinggi. Tegangan perlengkapan seperti indikator, meter, dan relay dirancang sama dengan tegangan terminal sekunder Transformator tegangan.

2.5.4 Pemisah

Disconnecting switch atau pemisah (Pms) suatu peralatan sistem tenaga listrik yang berfungsi sebagai saklar pemisah rangkaian listrik tanpa arus beban (memisahkan peralatan listrik dari peralatan lain yang bertegangan), dimana pembukaan atau penutupan Pms ini hanya dapat dilakukan dalam kondisi tanpa beban. Pemisah adalah suatu alat untuk memisahkan tegangan pada peralatan instalasi tegangan tinggi. Ada dua macam fungsi Pms, yaitu:

- a. Pemisah Peralatan : Berfungsi untuk memisahkan peralatan listrik dari peralatan lain atau instalasi lain yang bertegangan. Pms ini boleh dibuka atau ditutup hanya pada rangkaian yang tidak berbeban.
- b. Pemisah Tanah (Pisau Pentanahan/Pembumian) ; Berfungsi untuk mengamankan dari arus tegangan yang timbul sesudah saluran tegangan tinggi diputuskan atau induksi tegangan dari penghantar atau kabel lainnya.

2.5.5 Rele Pengaman

Relai pengaman adalah susunan peralatan yang direncanakan untuk dapat merasakan atau mengukur adanya gangguan atau mulai merasakan adanya ketidaknormalan pada peralatan atau bagian sistem tenaga listrik dan segera secara otomatis membuka Pemutus Tenaga (PMT) atau *Circuit Breaker* (CB) untuk memisahkan peralatan atau bagian dari sistem yang terganggu dan memberi isyarat berupa lampu atau alarm (bel). Disamping itu maka relai pengaman pada sistem tenaga listrik berfungsi untuk :

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

Pada operasinya transformator tenaga diproteksi dari gangguan yang mungkin terjadi pada transformator. Peralatan relay proteksi pada transformator antara lain adalah sebagai berikut:¹¹

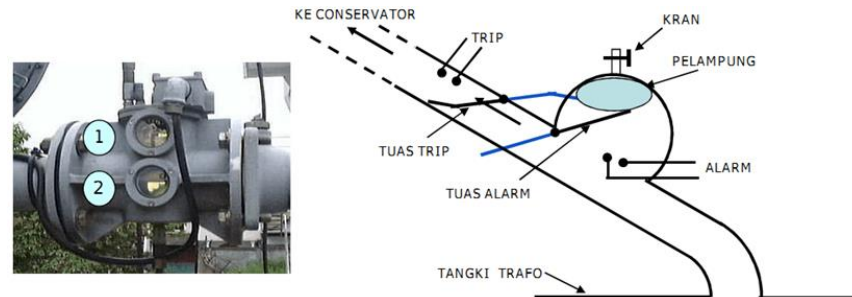
a. Rele Buchholz

Berfungsi untuk mengamankan transformator dari gangguan internal transformator yang menimbulkan gas dimana gas tersebut timbul akibat adanya hubung singkat di dalam transformator atau akibat busur di dalam transformator.

Relai ini digunakan untuk mendeteksi dan mendeteksi gangguan transformator terhadap gangguan di dalam transformator yang menimbulkan gas. Gas yang timbul akibat Hubung Singkat pada

¹¹ <https://rakhman.net/electrical-id/relay-proteksi-pada-transformator/amp/>. Diakses 6 April 2022

kumparan, busur listrik antar laminasi dan busur listrik akibat kontak yang kurang baik.



Gambar 2. 8 Rele Bucholz

Relay Bucholz dipasang di antara tangki transformator dan konservator. Relay ini memberikan indikasi alarm jika terjadi gangguan dalam transformator yang relatif kecil dan akan memberikan sinyal tripping jika terjadi gangguan di dalam transformator serius (cukup membahayakan). Relay ini biasanya digunakan pada transformator yang memiliki kapasitas kapasitas 750 KVA.

Cara kerja adalah gas yang timbul di dalam transformator akan mengalir melalui pipa dan tekanan gas ini akan mengerjakan relay dalam 2 tahap, yaitu :

1. Mengerjakan alarm (*bucholz 1st*) pada kontak bagian atas (1).
2. Mengerjakan perintah trip ke PMT pada kontak bagian bawah (2).

b. Rele Jansen

Adalah relay yang digunakan untuk mengamankan transformator dari gangguan di dalam tap *changer* yang menimbulkan gas. Relay ini dipasang pada pipa yang menuju konservator.

Cara kerja pada prinsipnya sama dengan relay bucholz akan tetapi hanya punya satu kontak *tripping*.



Gambar 2. 9 Rele Jansen

c. Relay Sudden Pressure

Digunakan untuk melindungi transformator dari gangguan tekanan berlebih yang disebabkan oleh gangguan di dalam transformator. Terdapat 2 jenis yaitu :

1. Type Membran

Berupa plat tipis yang di desain sedemikian rupa yang akan pecah apabila menerima tekanan melebihi desainnya. Membrane ini hanya sekali pakai sehingga jika pecah harus diganti yang baru.

2. Type Valve

Berupa suatu katup yang ditekan oleh sebuah pegas yang di desain sedemikian rupa sehingga apabila terjadi tekanan di dalam transformator melebihi tekanan pegas maka akan membuka dan membuang tekanan keluar bersama sama sebagian minyak.

Apabila tekanan di dalam transformator sudah turun atau lebih kecil dari tekanan pegas maka valve akan menutup kembali.



Gambar 2. 10 Rele Sudden Pressure

d. Relay Suhu

Berfungsi untuk melindungi transformator dari temperature yang berlebih. Apabila temperature transformator melebihi batas yang ditentukan maka relay suhu akan bekerja. Besar kenaikan suhu adalah sebanding dengan factor pembebanan dan suhu udara luar transformator.



Gambar 2. 11 Rele Suhu

Relay suhu dibedakan menjadi dua jenis, yaitu relay suhu winding (belitan) dan relay suhu Oil (Minyak transformator) yang bekerja pada dua tahap:

Tahap 1 : mengerjakan alarm

Tahap 2 : memerintahkan trip ke PMT

e. Relay Arus lebih

Berfungsi untuk melindungi transformator dari gangguan hubung singkat antar fasa di dalam maupun di luar daerah pengaman transformator.



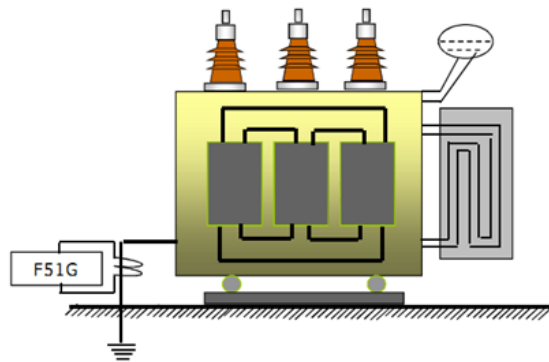
Gambar 2. 12 Rele Arus Lebih

Bekerja dengan prinsip instant, yaitu relay tersebut akan bekerja seketika ketika terdeteksi adanya arus gangguan. Sehingga dengan cepat dapat mengamankan transformator dan peralatan lain dari kerusakan.

Relay arus lebih biasanya di beri kode relay 51 dan dipasang pada sisi primer dan sisi sekunder transformator.

f. Relay Tangki Tanah

Berfungsi untuk mengamankan transformator terhadap hubung singkat antara fasa dengan tangki transformator dan titik netral transformator yang di tanahkan.



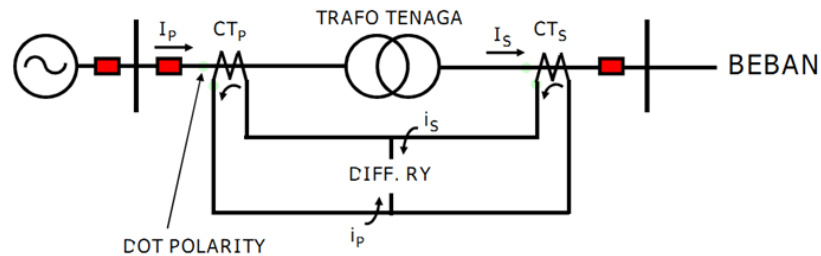
Gambar 2. 13 Rele Tangki Tanah

Relay tangki tanah biasa diberi kode relay 51G dan dipasang dengan skema seperti gambar 6 diatas. Relay ini bekerja jika terjadi kebocoran arus dari belitan ke tangki transformator, arus dari tangki akan mengalir ke tanah dan akan terdeteksi oleh relay arus lebih melalui CT. Kemudian relay akan mentripkan PMT di kedua sisi (primer dan sekunder).

Tangki transformator terbuat dari bahan logam yang merupakan suatu media penghantar listrik yang baik. Meskipun jarang terjadi pada transformator, ada kemungkinan terjadi hubung singkat antara kumparan fase dengan tangki transformator. Pengaman tangki transformator biasanya menggunakan relay arus lebih dengan karakteristik waktu kerja seketika (instantaneous)

g. Relay Differensial

Fungsi dari relay differensial adalah untuk mengamankan transformator dari gangguan hubung singkat yang terjadi didalam daerah pengamanan transformator relay ini bekerja dengan cara membandingkan arus yang masuk dan arus yang keluar.



Gambar 2. 14 Rele Differensial

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa dalam kondisi arah arus I_p dan I_s adalah berlawanan dan mempunyai besar yang sama maka relay differensial tidak dialiri arus. Relay ini bekerja apabila terjadi perbedaan arus antara sisi primer dan sisi sekunder. Perbedaan arus tersebut disebabkan oleh gangguan yang terdapat didaerah pengamanan transformator.

h. Rele Hubung Tanah (Earth fault)¹²

Relay hubung tanah berfungsi untuk mengamankan transformator dari kerusakan akibat gangguan tanah (Earth fault). Relay ini dilengkapi dengan transformator arus, kumparan kerja relay dan kumparan tripping. Pada kondisi normal, dimana tidak ada gangguan yang terjadi pada transformator, jumlah arus ketiga fase sama dengan nol sehingga jumlah fluks pada inti transformator sama dengan nol. Apabila terjadi gangguan tanah, maka jumlah fluks pada inti transformator tidak lagi nol.

i. Rele Beban Lebih (Over Load)

Rele ini berfungsi untuk mengamankan transformator dari kerusakan akibat adanya beban (arus) yang melebihi harga tertentu. Beban

¹² <https://electricdot.wordpress.com/2011/10/26/jenis-jenis-relay-pengaman-pada-transformer/>.
Diakses pada 6 April 2022

lebih kalau dibiarkan terlalu lama akan menyebabkan panas pada kumparan transformator sehingga bisa terjadi kerusakan isolasi pada kumparan transformator. Sensor relay ini pada umumnya berupa bimetal yang mendapat sinyal atau arus masukan dari transformator arus. Sinyal arus masukan diubah ke panas untuk mengerakkan elemen bimetal (termis).

j. Rele Tekanan Lebih

Rele tekanan lebih digunakan sebagai pengaman transformator untuk mendeteksi adanya tekanan-tekanan yang berlebihan akibat gangguan di dalam transformator. Relay ini merupakan relay mekanik yang menggunakan sejenis membran atau pelat yang akan pecah oleh karena tekanan atau desakan jarum pemecah (*breaking needle*) akibat gangguan dalam transformator.

2.5.6 Arrester

Arrester adalah sebuah alat yang digunakan untuk mencegah adanya kerusakan pada peralatan listrik dan aneka alat elektronik yang kita miliki di rumah, maka dibutuhkan suatu alat yang khusus dapat mencegah terjadinya lonjakan tegangan. Alat ini bernama *surge arrester*, atau yang lebih sering disebut dengan *arrester* saja. *Arrester* ini berfungsi untuk melindungi baik instalasi listrik, peralatan listrik, ataupun alat elektronik ketika terjadi lonjakan tegangan atau kelebihan tegangan/*over voltage*. *Arrester* mampu mengalirkan lonjakan tegangan listrik menuju ke bumi, sehingga dapat mencegah terjadinya kerusakan pada beragam peralatan listrik ataupun alat elektronik.

Arrester ini baru akan bekerja ketika terjadi tegangan mengalir yang tiba-tiba melonjak hingga besar tegangannya melebihi ambang batas toleransi dari sebuah tegangan normal. Bila tegangan di instalasi listrik masih berada di nilai normal, maka benda ini tentu tidak akan bekerja. Saat terjadi lonjakan tegangan, maka secara otomatis *arrester* akan bekerja untuk mengalirkan kelebihan tegangan tersebut menuju pentanahan atau bumi (*arde*). Agar dapat berfungsi

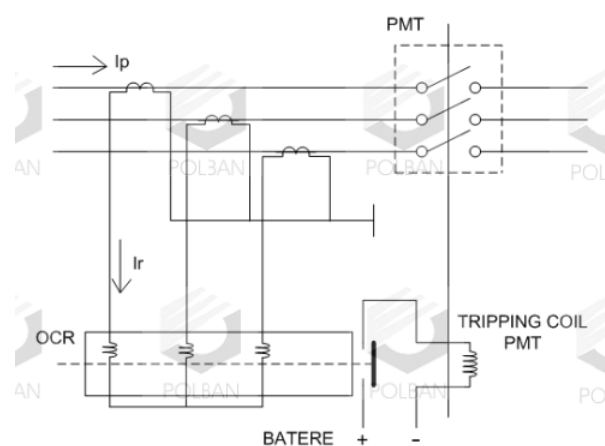
secara optimal dan baik maka kamu perlu memastikan bahwa bagian *grounding* atau *arde* sudah terpasang dengan benar, dan ukuran tahanannya kurang dari 2 ohm.

2.6 Rele Arus Lebih

Rele Arus Lebih atau yang lebih dikenal dengan *Over Current Relay* (OCR) merupakan peralatan yang mensinyalir adanya arus lebih, baik yang disebabkan oleh adanya gangguan hubung singkat atau *overload* yang dapat merusak peralatan sistem tenaga yang berada dalam wilayah proteksinya. Relai Arus Lebih ini digunakan hampir pada seluruh pola pengamanan sistem tenaga listrik, dan relai ini dapat digunakan sebagai pengaman utama ataupun pengaman cadangan.

2.6.1 Prinsip Kerja OCR

Prinsip kerja rele arus lebih adalah berdasarkan adanya arus lebih yang dirasakan rele, baik disebabkan adanya gangguan hubung singkat ataupun *overload* (beban lebih) dan kemudian memberikan perintah trip ke PMT sesuai dengan karakteristik waktunya. Untuk prinsip kerja rele ini kita dapat lihat pada gambar rangkaian dibawah ini :



Gambar 2. 15 Rangkaian Pengawatan OCR

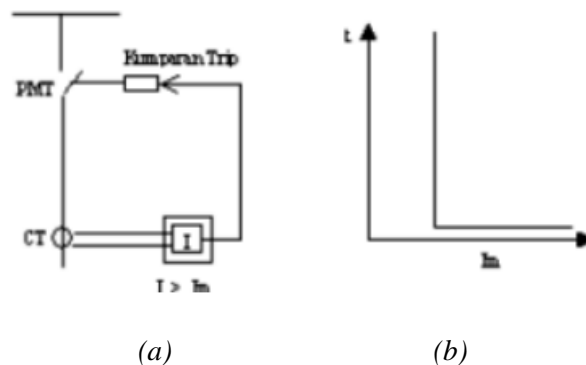
Cara kerjanya dapat diuraikan sebagai berikut :

- a. Pada kondisi normal arus beban (I_b) mengalir pada SUTM / SKTM dan oleh Transformator arus besaran arus ini di transformasikan ke besaran sekunder (I_r). Arus (I_r) mengalir pada kumparan relai tetapi karena arus ini masih lebih kecil dari pada suatu harga yang ditetapkan (*setting*), maka relai tidak bekerja.
- b. Bila terjadi gangguan hubung singkat, arus (I_b) akan naik dan menyebabkan arus (I_r) naik pula, apabila arus (I_r) naik melebihi suatu harga yang telah ditetapkan (diatas *setting*), maka relai akan bekerja dan memberikan perintah trip pada tripping coil untuk bekerja dan membuka PMT, sehingga SUTM / SKTM yang terganggu dipisahkan dari jaringan.

2.6.2 Jenis Rele Berdasarkan Karakteristik Waktu ⁹

- a. Relay arus lebih sesaat (*instantaneous overcurrent relay*)

Relay ini akan memberikan perintah pada PMT pada saat terjadi gangguan bila besar arus gangguannya melampaui penyetelannya (I_m), dan jangka waktu kerja relai mulai *pik up* samapai kerja relai sangat singkat tanpa penundaan waktu (20 – 60 ms). Ketika OCR merasakan ada arus gangguan sebesar apapun gangguan tersebut, maka OCR akan men-trip-kan PMT secara seketika/instant tanpa adanya setting waktu.



Gambar 2. 16 Rele Arus Lebih Sesaat (*Instantaneous Overcurrent Relay*)

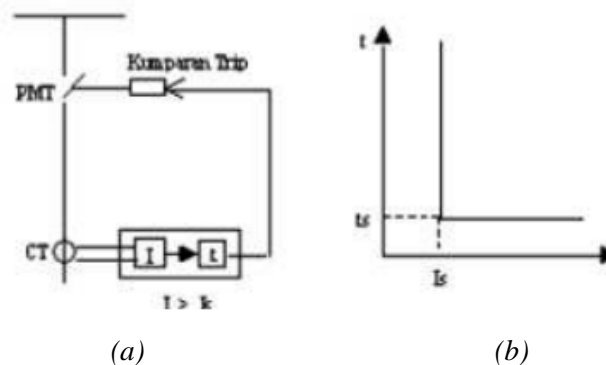
(a) Rangkaian Pengawatan dan

(b) Kurva Karakteristik OCR Waktu Sesaat

⁹ <https://id.scribd.com/doc/97612228/Karakteristik-Rele-Ocr>. Diakses pada 5 April 2022

b. Relay Arus Lebih dengan Waktu Tertentu (*definite time*)

Relai dimana waktu tundanya tetap, tidak tergantung pada besarnya arus gangguan. Jika arus gangguan telah melebihi arus *setting*nya berapapun besarnya arus gangguan relai akan bekerja dengan waktu yang tetap. Ketika OCR merasakan ada arus gangguan yang lebih besar dari arus *setting*, maka OCR akan men-trip-kan PMT sesuai dengan *setting* waktu yang telah diatur. Besarnya arus gangguan tidak mempengaruhi waktu kerja OCR



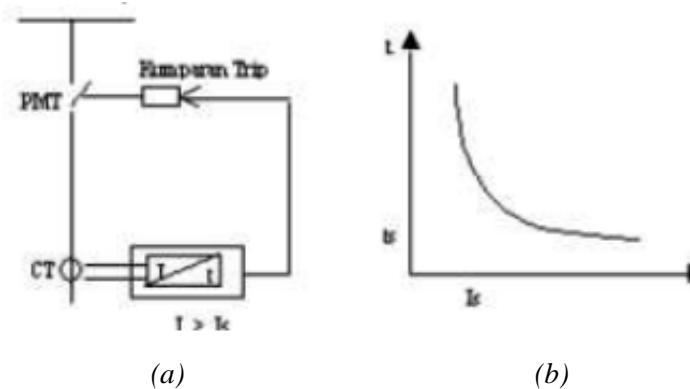
Gambar 2. 17 Rele Arus Lebih Waktu Tertentu (*Definite Time*)

(a) Rangkaian Pengawatan dan

(b) Kurva Karakteristik OCR Waktu Tertentu

c. Relay Arus Lebih dengan Waktu Terbalik (*inverse time overcurrent relay*)

Relai dimana waktu tunda mempunyai karakteristik tergantung pada besarnya arus gangguan. Sehingga semakin besar arus gangguan maka waktu kerja relai akan semakin cepat, arus gangguan berbanding terbalik dengan waktu kerja relai. Ketika OCR merasakan ada arus gangguan yang lebih besar dari arus *setting*, maka OCR akan men-trip-kan PMT sesuai dengan *setting* waktu yang telah diatur. Semakin besar arus gangguan tersebut maka waktu kerjanya semakin cepat.



Gambar 2. 18 Rele Arus Lebih Terbalik (Inverse Time Overcurrent Relay)

(a) Rangkaian Pengawatan dan

(b) Kurva Karakteristik OCR Waktu Terbalik

2.6 Perhitungan Nilai Rele Arus Lebih

Perhitungan nilai rele arus lebih (OCR) bertujuan untuk mengetahui nilai yang digunakan yang akan berguna untuk melakukan setting pada peralatan serta berguna untuk sebagai perbandingan dengan nilai yang terpasang pada suatu alat.

2.6.1 Perhitungan Arus Nominal Transformator

Sebelum melakukan perhitungan arus nominal Transformator, sebaiknya terlebih dahulu mengetahui daya yang terdapat pada Transformator serta tegangan yang terukur baik pada sisi primer maupun sisi sekunder Transformator.

$$I_{\text{Nominal}} = \frac{S}{V \times \sqrt{3}} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana :

I_n = Arus nominal yang mengalir pada Transformator (A)

S = Daya yang terpasang pada Transformator (VA)

V = Tegangan pada sisi primer / sekunder Transformator (V)

2.6.2 Perhitungan Arus Gangguan Transformator

Semua gangguan hubung singkat diatas, arus gangguannya dihitung dengan menggunakan rumus dasar yaitu :

$$I = \frac{V}{Z} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana :

I = Arus yang mengalir pada hambatan Z (A)

V = Tegangan Sumber (V)

Z = Impedansi jaringan

Untuk menghitung besarnya arus gangguan dapat dihitung menggunakan rumus yang berdasarkan data *setting* rele yang ada pada *Manual Book* sebagai berikut :

$$I_{\text{Fault}} = I_{\text{Nominal}} \times Z \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana :

I_{fault} = Arus gangguan pada Transformator (A)

I_n = Arus nominal Transformator (A)

Z = Impedansi Transformator

2.6.3 Perhitungan Arus *Setting* Transformator

Untuk menghitung arus *setting* pada Transformator dapat dilakukan dengan cara membagi nilai factor keamanan rele dan factor arus kembali dari rele invers time.

Sisi Primer

$$I_s = \frac{KFK}{Kd} \times I_n \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana :

I_s = Arus penyetelan (A)

I_n = Arus nominal Transformator (A)

Kfk = Faktor keamanan rele (1,0 - 1,2)

Kd = Faktor arus kembali 1,0 (*Invers Time*)

Sisi Sekunder

$$I_{\text{Setting}} = I_{\text{SekunderCT}} \times \frac{1}{\text{RasioCT}} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana :

I_{Setting} = Arus setting pada trafo (A)

I_{Sekunder} = Arus pada sisi sekunder Transformator (A)

Rasio CT = rasio perbandingan sisi primer dan sekunder CT

Jika ingin diubah menjadi persen maka dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$I_{\text{Setting}} (\%) = \frac{I_{\text{setting}} (A)}{I_{\text{nominal}}} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana :

$I_{\text{Setting}} (\%)$ = Arus *setting* pada Transformator (%)

$I_{\text{Setting}} (A)$ = Arus *setting* pada Transformator (A)

I_{Nominal} = Arus nominal pada Transformator (A)

2.6.4 Perhitungan Waktu Trip Pada Rele

Ada beberapa parameter untuk menentukan nilai penyetelan waktu trip pada rele, salah satunya menggunakan nilai TMS (*Time Multiple Setting*).

$$TMS = \frac{t \times \left[\left(\frac{I_F}{I_S} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14} \dots\dots\dots (2.7)$$

Berikut ini adalah rumus untuk menentukan nilai trip pada rele :

$$t = \frac{0,14 \times TMS}{\left(\frac{I_F}{I_S} \right)^{0,02} - 1} \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana :

t = Waktu trip (s)

I_s = Arus *setting* (A)

I_f = Arus gangguan pada Transformator (A)

TMS = *Time Multiple Setting*