

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Transformator

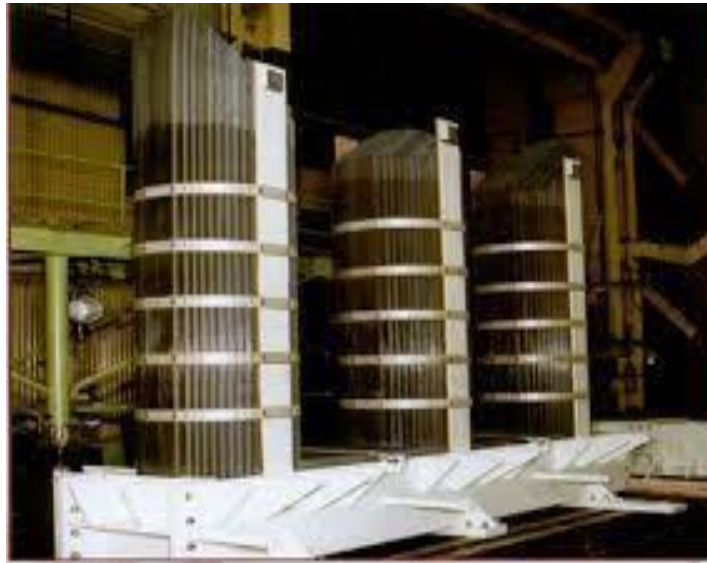
Transformator atau biasa dikenal dengan trafo berasal dari kata *transformatie* yang berarti perubahan. Transformator sejatinya adalah suatu peralatan listrik yang mengubah daya listrik AC pada satu level tegangan ke level tegangan lain berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik tanpa merubah frekuensinya. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaan transformator dalam sistem tenaga memungkinkan terpilihnya tegangan yang sesuai, dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan misalnya kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya listrik jarak jauh.

Prinsip kerja dari sebuah transformator adalah ketika kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, perubahan arus listrik pada kumparan primer menimbulkan medan magnet yang berubah. Medan magnet yang berubah diperkuat oleh adanya inti besi dan dihantarkan inti besi ke kumparan sekunder, sehingga pada ujung-ujung kumparan sekunder akan timbul GGL (Gaya Gerak Listrik) induksi. Efek ini dinamakan induktansi timbal-balik (*mutual inductance*).

Adapun bagian utama yang terdapat pada transformator adalah sebagai berikut:

1. Inti besi

berfungsi untuk mempermudah jalan fluksi, yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Dibuat dari lempengan-lempengan besi tipis yang berisolasi, untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh Eddy Current.



Gambar 2.1 Inti Besi Transformator

2. Kumbaran transformator

Kumbaran transformator adalah beberapa lilitan kawat berisolasi yang membentuk suatu kumbaran. Kumbaran tersebut terdiri dari kumbaran primer dan kumbaran sekunder yang diisolasi baik terhadap inti besi maupun terhadap antar kumbaran dengan isolasi padat seperti karton, pertinak dan lain-lain. Kumbaran tersebut sebagai alat transformasi tegangan dan arus.



Gambar 2.2 Kumbaran Transformator

3. Minyak transformator

Minyak transformator merupakan salah satu bahan isolasi cair yang dipergunakan sebagai isolasi dan pendingin pada transformator.



Gambar 2.3 Minyak Transformator

4. Bushing

Bushing yaitu sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator. Bushing sekaligus berfungsi sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan tangki transformator.



Gambar 2.4 Bushing

5. Tangki Konservator

Tangki transformator berfungsi untuk menampung minyak cadangan dan uap/udara akibat pemanasan trafo karena arus beban. Diantara tangki dan trafo dipasangkan relai bucholz yang akan meyerap gas produksi akibat kerusakan minyak.



Gambar 2.5 Tangki Konservator

Selain peralatan utama transformator juga memiliki peralatan bantu, berikut ini adalah peralatan bantu yang terdapat pada transformator :

1. Sistem pendingin

Pada inti besi dan kumparan-kumpaan akan timbul panas akibat rugi-rugi tembaga. Maka panas tersebut mengakibatkan kenaikan suhu yang berlebihan, ini akan merusak isolasi, maka untuk mengurangi kenaikan suhu yang berlebihan tersebut transformator perlu dilengkapi dengan alat atau sistem pendingin untuk menyalurkan panas keluar transformator media yang dipakai pada sistem pendingin dapat berupa: Udara/gas, Minyak dan Air.

2. Tap Changer (On Load Tap Changer)

Kualitas operasi tenaga listrik jika tegangannya nominal sesuai ketentuan, tapi pada saat operasi terjadi penurunan tegangan sehingga kualitasnya menurun untuk itu perlu alat pengatur tegangan agar tegangan selau pada

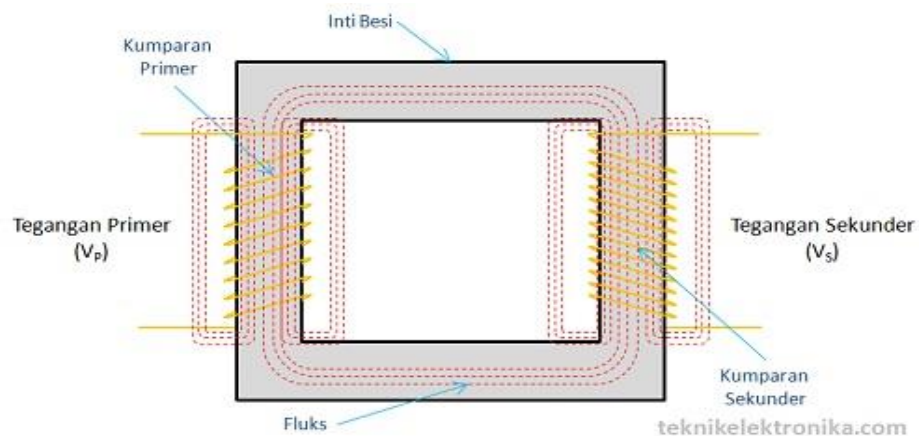
kondisi terbaik, konstan dan kontinyu. Untuk itu trafo dirancang sedemikian rupa sehingga perubahan tegangan pada salah satu sisi input berubah tetapi sisi outputnya tetap.

3. Alat pernapasan (Dehydrating Breather)

Sebagai tempat penampungan pemuaiian minyak isolasi akibat panas yang timbul maka minyak ditampung pada tangki yang sering disebut sebagai konservator.¹

2.2 Prinsip Kerja Transformator

Apabila kumparan primer dihubungkan tegangan (sumber), maka akan mengalir arus bolak balik pada kumparan tersebut. Oleh karena itu kumparan mempunyai inti, arus menimbulkan fluks magnet yang juga berubah-ubah, pada kumparan primer akan timbul GGL induksi.



Gambar 2.6 Prinsip Kerja Transformator

Besarnya GGL induksi pada kumparan primer adalah :

$$E_p = -N_p \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana :

- E = gaya gerak listrik (volt)
- N_p = jumlah lilitan primer
- $\frac{d\phi}{dt}$ = perubahan waktu dalam satuan detik
- $d\phi$ = perubahan garis-garis gaya magnet dalam satuan weber

¹ Aslimeri, dkk. 2008. Teknik Transmisi Tenaga Listrik jilid 1, Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan. (Hal 129-136)



Fluks magnet yang menginduksikan GGL induksi juga alami oleh kumparan sekunder karena merupakan fluks bersama (mutual fluks). Dengan demikian fluks tersebut menginduksikan GGL induksi pada kumparan sekunder. Besarnya GGL induksi pada kumparan sekunder adalah :

$$E_s = -N_s \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots (2.2)$$

dimana: N_s = jumlah lilitan sekunder

Dari persamaan (1) dan (2) didapatkan perbandingan lilitan berdasarkan perbandingan GGL induksi yaitu :

$$a = \frac{e_p}{e_s} = \frac{N_p}{N_s} \dots\dots\dots (2.3)$$

dimana : a = nilai perbandingan lilitan transformator

Apabila, $a > 1$, maka transformator berfungsi untuk menaikkan tegangan (step up transformer)

$a < 1$, maka transformator berfungsi untuk menurunkan tegangan (step down transformer) ².

2.3 Macam-macam Transformator

1. Transformator Penaik Tegangan Generator

Karena teknologi membuat kumparan generator sinkron 3 fasa sampai saat ini paling tinggi baru mencapai 23 kV, apabila rel dalam pusat listrik menggunakan tegangan generator, maka tegangan dari generator perlu dinaikkan terlebih dahulu melalui transformator penaik tegangan sebelum dihubungkan ke rel tersebut.

2. Transformator Unit Pembangkit

Setiap Unit pembangkit yang besar (diatas 10 MW) pada umumnya mempunyai transformator unit pembangkit, yaitu transformator yang mengambil daya langsung dari generator untuk memasok alat-alat bantu unit pembangkit

² Sumanto. 1991. Teori Transformator, Yogyakarta: Andi Offset.(Hal 2-3)

yang bersangkutan, seperti: motor pompa pendingin, motor pompa minyak pelumas dan lain-lain.

3. Transformator Pemakaian Sendiri

Transformator pemakaian sendiri mendapat pasokan daya dari rel pusat listrik kemudian memasok daya ke rel pemakaian sendiri. Rel pemakaian sendiri digunakan untuk memasok instalasi penerangan, baterai aki, mesin-mesin bengkel, dan alat bantu unit pembangkit pada periode start.

4. Transformator antar-rel

Jika didalam pusat listrik ada beberapa rel dengan tegangan operasi yang berbeda-beda, maka ada transformator antar-rel. adanya rel-rel dengan tegangan yang berbeda dapat disebabkan karena perkembangan system tenaga listrik dan juga dapat terjadi karena diperlukan rel tegangan menengah (antara 6 kV sampai 40 kV) untuk keperluan distribusi di daerah sekitar pusat listrik selain rel tegangan tinggi (diatas 60 kV) untuk saluran transmisi jarak jauh.

2.4 Gangguan Pada Transformator

Gangguan-Gangguan Pada Transformator Tenaga Dalam operasi suatu transformator dapat mengalami gangguan-gangguan yang dikelompokkan pada 2 (dua) bagian, yaitu :

- a. Gangguan internal
- b. Gangguan eksternal

2.4.1 Gangguan Internal

Gangguan internal adalah gangguan yang terjadi di dalam transformator tenaga itu sendiri. Gangguan-gangguan yang digolongkan sebagai gangguan internal adalah sebagai berikut :

1. Incipient Faults

Adalah gangguan kecil yang apabila tidak segera terdeteksi akan membesar dan akan menyebabkan yang lebih serius seperti :

- a. Terjadi busur api yang kecil dan pemanasan lokal yang dapat disebabkan oleh:
 1. cara penyambungan konduktor yang tidak baik
 2. partial discharge
 3. kerusakan isolasi pada baut – baut penjepit inti

b. Gangguan pada sistem pendingin

Semua gangguan tersebut diatas akan menyebabkan terjadinya pemanasan lokal tetapi tidak mempengaruhi suhu transformator secara keseluruhan. Gangguan ini tidak dapat terdeteksi dari terminal transformator karena keseimbangan arus tegangan tidak berbeda dengan kondisi normal.

2. Gangguan hubung singkat

Pada umumnya gangguan ini dapat dideteksi karena akan selalu timbul arus maupun tegangan yang tidak normal/tidak seimbang. Jenis gangguan ini antara lain, hubung singkat antar belitan, yaitu:

- a. Hubung singkat antara kumparan dengan tanah
- b. Hubung singkat dua fasa
- c. Kerusakan pada isolator transformator

2.4.2 Gangguan Eksternal

Gangguan eksternal yaitu gangguan yang terjadi diluar transformator tenaga (pada sistem tenaga listrik) tetapi dapat menimbulkan gangguan pada transformator yang bersangkutan. Gangguan-gangguan yang dapat digolongkan dalam gangguan eksternal ini adalah sebagai berikut :

1. Gangguan hubung singkat

Gangguan hubung singkat diluar transformator ini biasanya dapat segera dideteksi karena timbulnya arus yang sangat besar, dapat mencapai beberapa kali arus nominalnya, seperti :

- a. Hubung singkat di rel
- b. Hubung singkat pada penyulang (feeder)
- c. Hubung singkat pada incoming feeder transformator tersebut

2. Beban lebih (Overload)

Transformator tenaga dapat beroperasi secara terus menerus pada arus beban nominalnya. Apabila beban yang dilayani lebih besar dari 100%, maka akan terjadi pembebanan lebih. Hal ini dapat menimbulkan pemanasan yang berlebih. Kondisi ini mungkin tidak akan menimbulkan kerusakan, tetapi apabila berlangsung secara terus menerus akan memperpendek umur isolasi.

3. Gelombang Surja

Gelombang surja dapat terjadi karena cuaca, yaitu petir yang menyambar jaringan transmisi dan kemudian akan merambat ke gardu terdekat dimana transformator tenaga terpasang. Walaupun hanya terjadi dalam kurun waktu sangat singkat (beberapa puluh mikrodetik), akan tetapi karena tegangan puncak yang dimiliki cukup tinggi dan energi yang dikandungnya besar, maka ini dapat menyebabkan kerusakan pada transformator tenaga. Bentuk gelombang dari petir yang dicatat dengan sebuah asilograf sinar katoda (berupa tegangan sebagai fungsi waktu).

Disamping dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan, gangguan tersebut dapat juga membahayakan manusia atau operator yang ada disekitarnya. Akibat-akibat yang terjadi pada manusia atau operator adalah seperti terkejut, pingsan bahkan sampai meninggal.

Keadaan yang membahayakan tersebut dipengaruhi oleh beberapa hal, yaitu:

- a. Seseorang yang berada di suatu tempat dimana badan atau anggota tubuhnya menghubungkan dua tempat yang mempunyai perbedaan tegangan yang tinggi.
- b. Besar dan lamanya arus mengalir ke tubuh.

2.5 Dasar – Dasar Sistem Proteksi

Secara umum rele proteksi harus bekerja sesuai dengan yang diharapkan dengan waktu yang cepat sehingga tidak akan mengakibatkan kerusakan, ataupun kalau suatu peralatan terjadi kerusakan secara dini telah diketahui, atau walaupun terjadi gangguan tidak menimbulkan pemadaman bagi konsumen.

Rele proteksi 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 secara otomatis memberi perintah untuk membuka pemutus tenaga untuk memisahkan peralatan atau bagian dari sistem yang terganggu dan memberi isyarat berupa lampu atau bel. Rele proteksi dapat merasakan atau melihat adanya gangguan pada peralatan yang diamankan dengan mengukur atau membandingkan besaran-besaran yang diterimanya, misalnya arus, tegangan, daya, sudut fase, frekuensi, impedansi dan sebagainya, dengan besaran yang telah ditentukan, kemudian mengambil keputusan untuk seketika ataupun dengan perlambatan waktu membuka pemutus tenaga. Pemutus tenaga umumnya dipasang pada generator, transformator daya, saluran transmisi, saluran distribusi dan sebagainya supaya dapat dipisahkan sedemikian rupa sehingga sistem lainnya tetap dapat beroperasi secara normal.

Dari uraian di atas maka rele proteksi pada sistem tenaga listrik berfungsi untuk:

- a. Merasakan, mengukur dan menentukan bagian sistem yang terganggu serta memisahkan secepatnya sehingga sistem lain yang tidak terganggu dapat beroperasi secara normal.
- b. Mengurangi kerusakan yang lebih parah dari peralatan yang terganggu.
- c. Mengurangi pengaruh gangguan terhadap bagian sistem yang lain yang tidak terganggu di dalam sistem tersebut serta mencegah meluasnya gangguan.
- d. Memperkecil bahaya bagi manusia.

Untuk mendapatkan penyetelan yang memenuhi semua kriteria di atas adakalanya sulit dicapai, yaitu terutama antara selektif dan cepat, sehingga adakalanya harus diadakan kompromi koordinasi. Kita sadari pula bahwa sistem proteksi tidak dapat sempurna walaupun sudah diusahakan pemilihan jenis rele yang baik, tetapi adakalanya masih gagal bekerja.

Hal yang menimbulkan kegagalan pengaman dapat dikelompokkan sebagai berikut :

- a) Kegagalan pada rele sendiri.
- b) Kegagalan suplai arus atau tegangan ke rele tegangannya rangkaian suplai ke rele dari trafo tersebut terbuka atau terhubung singkat.
- c) Kegagalan sistem suplai arus searah untuk *tripping* pemutus tenaga. Hal ini dapat disebabkan baterai lemah karena kurang perawatan, terbukanya atau terhubung singkat rangkaian arus searah.
- d) Kegagalan pada pemutus tenaga. Kegagalan ini dapat disebabkan karena kumparan *trip* tidak menerima suplai, kerusakan mekanis ataupun kegagalan pemutusan arus karena besarnya arus hubung singkat melampaui kemampuan dari pemutus tenaganya.

Karena adanya kemungkinan kegagalan pada sistem pengaman maka harus dapat diatasi yaitu dengan penggunaan pengaman cadangan (*Back up Protection*). Dengan demikian pengamanan menurut fungsinya dapat dikelompokkan menjadi :

- 1) Pengaman utama yang pada umumnya selektif dan cepat, dan malah jenis tertentu mempunyai sifat selektif mutlak misalnya rele diferensial.
- 2) Pengaman cadangan, umumnya mempunyai perlambatan waktu hal ini untuk memberikan kesempatan kepada pengaman utama bekerja lebih dahulu, dan jika pengaman utama gagal, baru pengaman cadangan bekerja dan rele ini tidak seselektif pengaman utama.

2.6 Pemutus Tenaga (PMT)

Pemutus Tenaga (PMT) atau Circuit Breaker adalah suatu peralatan pemutus rangkaian listrik pada suatu sistem tenaga listrik, yang mampu untuk membuka dan menutup rangkaian listrik pada semua kondisi, termasuk arus hubung singkat, sesuai dengan ratingnya. Juga pada kondisi tegangan yang

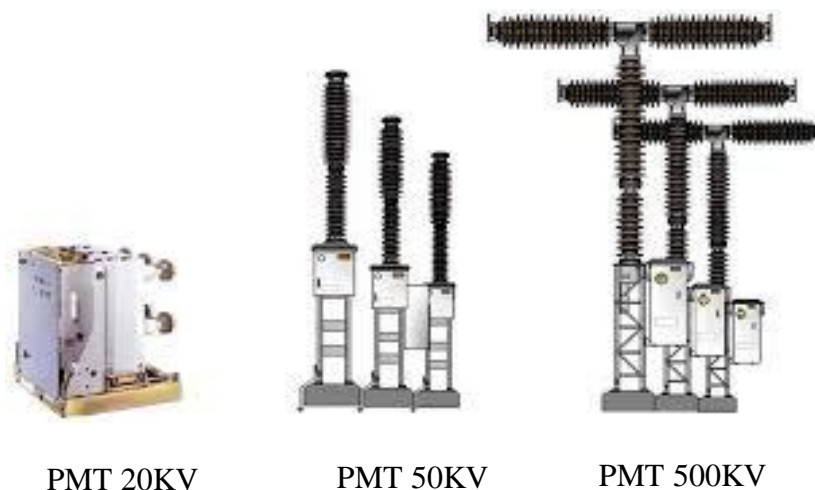
normal ataupun tidak normal.

Pemutus Tenaga (PMT) merupakan suatu alat listrik yang berfungsi untuk melindungi sistem tenaga listrik apabila terjadi kesalahan atau gangguan pada sistem tersebut, terjadinya kesalahan pada sistem akan menimbulkan berbagai efek seperti efek termis, efek magnetis dan dinamis stability.

Fungsi utamanya adalah sebagai alat pembuka atau penutup suatu rangkaian listrik dalam kondisi berbeban, serta mampu membuka atau menutup saat terjadi arus gangguan (hubung singkat) pada jaringan atau peralatann lain.

Syarat-syarat yang harus dipenuhi oleh suatu Pemutus Tenaga dalam system tenaga listrik adalah sebagai berikut :

1. Mampu menyalurkan arus maksimum sistem secara terus menerus.
2. Mampu memutuskan dan menutupjaringan dalam keadaan berbeban maupun terhubung singkat tanpa menimbulkan kerusakan pada pemutus tenaga itu sendiri.
3. Dapat memutuskan arus hubung singkat dengan sangat cepat agar arus hubung singkat tidak sampai merusak peralatan sistem, tidak membuat sistem kehilangan kestabilan, dan tidak merusak pemutus tenaga itu sendiri.



Gambar 2.7 Macam-Macam Pemutus Tenaga (PMT)

2.7 Fungsi Bagian Utama Pemutus Tenaga (PMT)

Ruangan pemutus tenaga ini berfungsi sebagai ruangan pemadam busur api, yang terdiri dari :

- a. Unit pemutus utama yang berfungsi sebagai pemutus utama

Unit pemutus utama ini berupa ruangan yang diselubungi bagian luar oleh isolator dari porselen dan disebelah dalamnya terdapat ruangan udara, kontak-kontak bergerak yang dilengkapi oleh pegas penekan dan kontak tetap sebagai penghubung yang terletak melekat pada isolator porselen.

- b. Unit pemutus pembantu yang berfungsi sebagai pemutus arus yang melalui tahanan. Unit pemutus pembantu ini berupa ruangan yang diselubungi bagian luar oleh isolator dari porselen dan disebelah dalamnya terdapat ruangan udara, kontak-kontak bergerak yang dilengkapi oleh pegas penekan dan kontak tetap sebagai penghubung yang terletak melekat pada porselen.

- c. Katup kelambatan

Berfungsi sebagai pengatur udara bertekanan dari pemutus utama ke unit pemutus pembantu, sehingga kontak pada unit pemutus pembantu akan terbuka kurang dari 25 ms (micro detik) setelah kontak-kontak pada pemutus utama terbuka. Katup kelambatan ini berupa bejana berbentuk silinder yang berongga sebagai ruang udara dan juga terdapat ruang pengatur, katup penahan, katup pengatur, rumah perapat, dan tempat katup.

- d. Tahanan.

Tahanan ini dipasang paralel dengan unit pemutus utama, yang berfungsi untuk :

- a. mengurangi kenaikan harga dari tegangan pukul
- b. mengurangi arus pukulan pada waktu pemutusan

e. Kapasitor

Kapasitor ini dipasang paralel dengan tahanan, unit pemutus utama dan unit pemutus pembantu, yang berfungsi untuk mendapatkan pembagian tegangan yang sama pada setiap celah kontak, sehingga kapasitas pemutusan pada setiap celah sama besarnya.

f. Kontak-kontak

1. Unit pemutus utama Kontak bergerak dilapisi dengan perak terdiri dari:
 - a. Kepala kontak bergerak
 - b. Silinder kontak
 - c. Jari-jari kontak
 - d. Batang kontak
 - e. Pegangan kontak Kontak tetap, terdiri dari :
 1. Kepala kontak
 2. Pegangan kontak
2. Unit pemutus pembantu
 - a. Kontak bergerak
 - b. Kontak tetap, yang terdiri dari:
 1. Jari-jari kontak
 2. Pegangan kontak

2.8 Peralatan Proteksi pada Transformator

1. Relay Bucholz

Relai Bucholz adalah relay alat atau relay yang berfungsi mendeteksi dan mengamankan terhadap gangguan transformator yang menimbulkan gas. Timbulnya gas dapat diakibatkan oleh beberapa hal, diantaranya adalah:

1. Hubung singkat antar lilitan pada atau dalam phasa
2. Hubung singkat antar phasa
3. Hubung singkat antar phasa ke tanah
4. Busur api listrik antar laminasi
5. Busur api listrik karena kontak yang kurang baik.



Relay Bucholz

Gambar 2.8 Relay Bucholz

Pengaman tekanan lebih, alat ini berupa membran yang terbuat dari kaca, plastik, tembaga atau katup berpegas, sebagai pengaman tangki transformator terhadap kenaikan tekan gas yang timbul di dalam tangki yang akan pecah pada tekanan tertentu dan kekuatannya lebih rendah dari kekuatan tangki transformator.

2. Relay tekanan lebih

Relai ini berfungsi hampir sama seperti Relai Bucholz. Fungsinya adalah mengamankan terhadap gangguan di dalam transformator. Bedanya relai ini hanya bekerja oleh kenaikan tekanan gas yang tiba-tiba dan langsung mentriapkan pemutus tenaga (PMT).



Gambar 2.9 Relay Tekanan Lebih

3. Relay Differensial

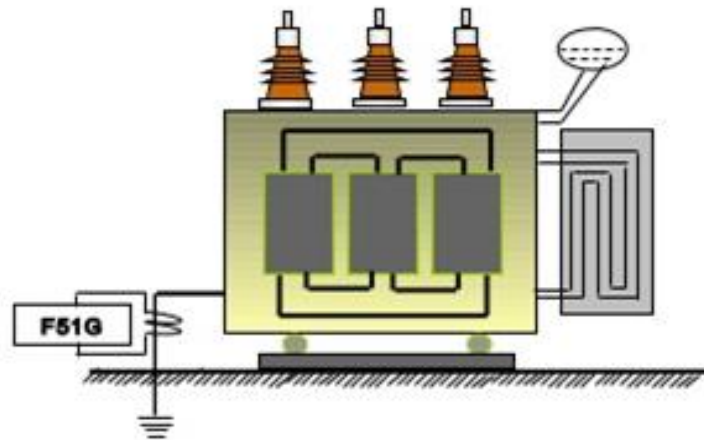
Berfungsi mengamankan transformator terhadap gangguan di dalam transformator, antara lain adalah kejadian flash over antara kumparan dengan kumparan atau kumparan dengan tangki atau belitan dengan belitan di dalam kumparan ataupun beda kumparan.

4. Relay Arus lebih

Berfungsi mengamankan transformator arus yang melebihi dari arus yang diperkenankan lewat dari transformator tersebut dan arus lebih ini dapat terjadi oleh karena beban lebih atau gangguan hubung singkat.

5. Relay tangki tanah

Alat ini berfungsi untuk mengamankan transformator bila ada hubung singkat antara bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan pada transformator.



Gambar 2.10 Relay Tangki Tanah

6. Relay Hubung tanah

Fungsi alat ini adalah untuk mengamankan transformator jika terjadi gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah.

7. Relay Termis

Alat ini berfungsi untuk mencegah/mengamankan transformator dari kerusakan isolasi pada kumparan, akibat adanya panas lebih yang ditimbulkan oleh arus lebih. Besaran yang diukur di dalam relay ini adalah kenaikan temperatur.³

2.9 Relay Proteksi

Relay adalah sebuah alat yang bekerja secara otomatis mengatur/memasukkan suatu rangkaian listrik (rangkai trip atau alarm) akibat adanya perubahan rangkaian yang lain. Relai proteksi adalah suatu relai listrik yang digunakan untuk mengamankan peralatan peralatan listrik terhadap kondisi abnormal. Relai proteksi pembangkit adalah suatu relai proteksi yang digunakan untuk mengamankan peralatan peralatan listrik seperti generator, transformator utama, transformator bantu dan motor-motor listrik pemakaian sendiri suatu pembangkit listrik.

³ Muslim, supari, dkk. 2008. Teknik Pembangkit Tenaga Listrik jilid 3. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan. (Hal 459-460)

Tujuan utama sistem proteksi adalah sebagai berikut :

1. Mendeteksi kondisi abnormal pada sistem tenaga listrik
2. Memerintahkan trip pada PMT dan memisahkan peralatan yang terganggu dari sistem yang sehat, sehingga sistem dapat terus berfungsi.

Dasar pemilihan proteksi sistem tenaga listrik dan sistem proteksi adalah sebagai berikut :

1. Mengurangi kerusakan pada peralatan yang terganggu dan peralatan yang berdekatan dengan titik gangguan
2. Mengurangi gangguan meluas
3. Meminimalisasi durasi gangguan
4. Meminimalisasi bahaya pada manusia Memaksimalkan ketersediaan listrik untuk konsumen⁴

2.10 Elemen Sistem Proteksi

Elemen – elemen yang membentuk suatu sistem proteksi yaitu :

1. Transformator Arus/Transformator Tegangan
Memberikan informasi mengenai keadaan tenaga listrik (normal atau terganggu) juga berfungsi untuk mengisolasi bagian yang bertegangan tinggi (jaringan yang diamankan) terhadap bagian tegangan rendah (relai pengaman).
2. Relay Pengaman
Berfungsi mendeteksi gangguan atau kondisi abnormal lainnya yang selanjutnya memberi perintah trip pada PMT.
3. PMT
Berfungsi untuk menghubungkan dan memisahkan satu bagian dari jaringan yang beroperasi normal maupun jaringan yang sedang terganggu.

⁴ Karyono, Wirawan, dkk.2013 .Pedoman dan Petunjuk Sistem Proteksi Transmisi dan Gardu Induk Jawa Bali, Jakarta

4. Power supply

Berfungsi untuk menyuplai daya ke relai proteksi dan PMT agar relai tersebut dapat mengolah informasi yang diterima dan memberikan perintah ke PMT yang diperlukan. Dengan power supply tersebut PMT dapat melaksanakan perintah yang diterima dari relai pengaman.

5. Pengawatan

Berfungsi menghubungkan semua elemen tersebut di atas membentuk suatu sistem proteksi.

2.11 Persyaratan Sistem Proteksi

Persyaratan desain proteksi harus dipertimbangkan untuk memastikan sistem tenaga listrik dilengkapi dengan sistem proteksi yang andal. Persyaratan desain ini digunakan sebagai dasar yang harus dipenuhi pada aplikasi dan pemilihan sistem proteksi, khususnya pada instalasi baru. Desain juga harus mempertimbangkan tipe peralatan atau komponen sistem tenaga listrik yang akan diproteksi.

Sistem proteksi harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

1. Sensitif

Sistem proteksi harus mampu mendeteksi sekecil apapun ketidaknormalan sistem dan beroperasi dibawah nilai minimum gangguan. Studi koordinasi sistem proteksi harus dilakukan untuk menentukan sensitivitas seting dan memastikan relai bekerja dengan benar.

2. Selektif

Sistem proteksi harus mampu menentukan daerah kerjanya dan atau fasa yang terganggu secara tepat. Peralatan dan sistem proteksi hanya memisahkan bagian dari jaringan yang sedang terganggu. Zona proteksi harus tepat dan memadai untuk memastikan bahwa hanya bagian yang terganggu yang dipisahkan dari sistem pada saat terjadi gangguan atau kondisi abnormal.

3. Andal

Kemungkinan suatu sistem proteksi dapat bekerja benar sesuai fungsi yang diinginkan dalam kondisi dan jangka waktu tertentu (IEV 448-12-05) Proteksi diharapkan bekerja pada saat kondisi yang diharapkan terpenuhi dan tidak boleh bekerja pada kondisi yang tidak diharapkan. (SPLN T5.002- 1: 2010)

4. Cepat

Elemen sistem proteksi harus mampu memberikan respon sesuai dengan kebutuhan peralatan yang dilindungi untuk meminimalisasi terjadinya gangguan meluas, lama gangguan dan gangguan pada stabilitas sistem. Desain sistem proteksi harus mempertimbangkan kecepatan pemutusan gangguan untuk memisahkan sumber gangguan.⁵

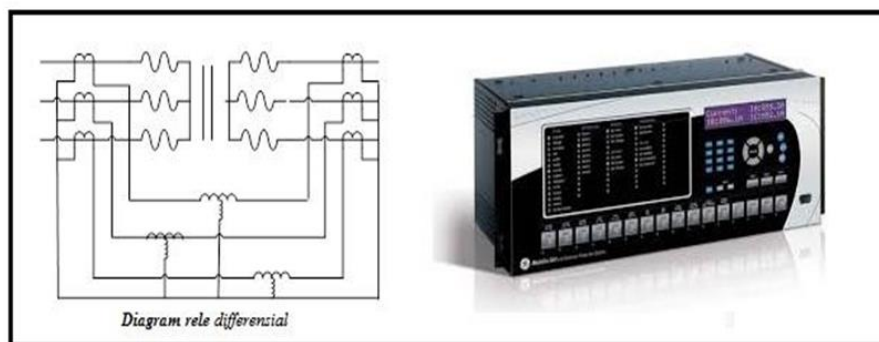
2.12 Relay Differensial

Relay diferensial transformator dilengkapi dengan alat yang memblokir (mencegah) relay bekerja jika terdapat harmonisa genap dalam arus gangguan yang dideteksinya. Hal ini diperlukan untuk mencegah relay sewaktu meng-energize transformator, yaitu pada waktu memberi tegangan ke transformator yang semula tidak bertegangan. Misalnya sehabis terjadi gangguan dimana tegangan system hilang. Dalam menghidupkan kembali system, tegangan dikirim ke sebuah transformator yang tidak bertegangan. Arus beban nol akan mengalir dari satu sisi (sisi tegangan tinggi) saja, hal ini akan menyebabkan relay differensial bekerja men-trip PMT transformator sehingga pemulihan tegangan dalam system akan terhambat. Tetapi karena arus beban nol transformator mempunyai komponen arus magnetisasi yang banyak mengandung harmonisa genap maka dengan adanya sensor harmonisa genap yang berfungsi mencegah relay bekerja, relay tidak akan bekerja walaupun hanya ada arus beban nol disatu sisi (tegangan tinggi saja).

⁵ Karyono, Wirawan, dkk.2013 .Pedoman dan Petunjuk Sistem Proteksi Transmisi dan Gardu Induk Jawa Bali, Jakarta(Hal 8-10)

Degan demikian proses pemulihan tegangan dalam system tidak akan terhambat oleh tripnya transformator yang di energize.⁶

Sebagai proteksi transformator rele ini berfungsi melindungi transformator terhadap gangguan dari dalam (internal) transformator tersebut. Apabila terjadi gangguan dalam transformator, maka timbul selisih antara arus yang masuk dan keluar dari transformator bersangkutan dan selisih arus inilah yang mengoperasikan rele differensial ini.



Gambar 2.11 Relay Differensial

Rele differensial memberi perintah untuk membuka kedua pemutus beban dan memberi sinyal serta alarm, saat tidak normal/gangguan terjadi.

1. Sifat pengaman dengan rele differensial
 - a. Sangat efektif dan cepat, tidak perlu di koordinasi dengan rele lain.
 - b. Sebagai pengaman utama
 - c. Tidak dapat digunakan sebagai pengaman cadangan untuk daerah berikutnya.
 - d. Daerah pengamananya dibatasi oleh sepasang trafo arus dimana rele differensial dipasang.

⁶ Marsudi, Djiteng. 2005. Pembangunan Energi Listrik. Jakarta: Erlangga (Hal 348)

2. Persyaratan pada pengaman rele differensial

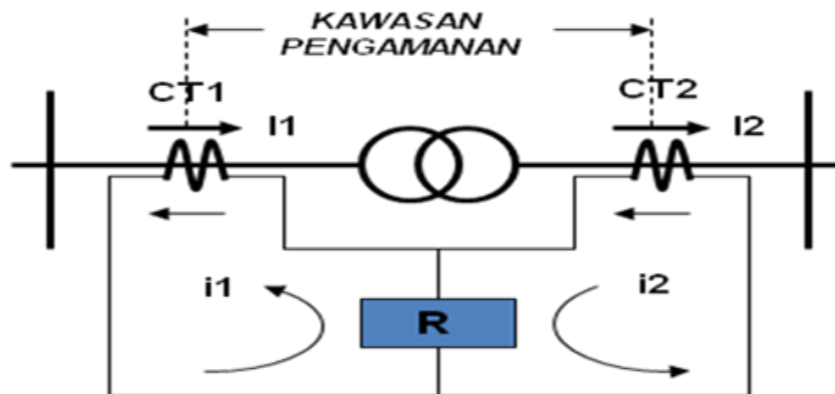
- a. CT_1 dan CT_2 harus mempunyai perbandingan transformasi yang sama, atau mempunyai perbandingan transformasi sedemikian, sehingga arus sekundernya sama.
- b. Karakteristik CT_1 dan CT_2 sama.
- c. Rangkaian CT ke rele harus benar.

2.12.1 Prinsip Kerja Relay Differensial

Menurut mason relay differensial itu merupakan suatu rele yang bekerja bila ada perbedaan vector dari dua besaran listrik atau lebih, yang melebihi besaran yang ditentukan.

Prinsip kerja relay differensial adalah membandingkan vector arus I_1 (arus sisi primer) dan I_2 (arus sisi sekunder). Pada waktu tidak terjadi gangguan/keadaan normal atau gangguan berada diluar daerah pengaman I_1 dan I_2 sama atau mempunyai perbandingan serta sudut fasa tertentu, dalam hal ini rele tidak bekerja. Pada waktu terjadi gangguan di daerah pengaman I_1 dan I_2 tidak sama perbandingan serta sudut fasanya berubah dari keadaan normal disisi rele akan bekerja. Rele differensial ini bekerja berdasarkan hokum arus kirchoff 1 (kirchoff current law 1) yang berbunyi “arus yang masuk pada suatu titik sama dengan arus yang keluar pada titik tersebut”.

Sifat dari rele differensial adalah sangat selektif dan cepat, tidak perlu di koordinasi dengan rele lain sebagai pengaman peralatan (equipment), tidak dapat digunakan sebagai pengaman cadangan untuk daerah berikutnya, daerah pengamanannya dibatasi oleh pasangan trafo arus atau dimana rele differensial di pasang. Adapun penggunaan rele differensial adalah sebagai pengaman generator, pengaman trafo daya, pengaman motor-motor lain dan pengaman saluran transmisi.

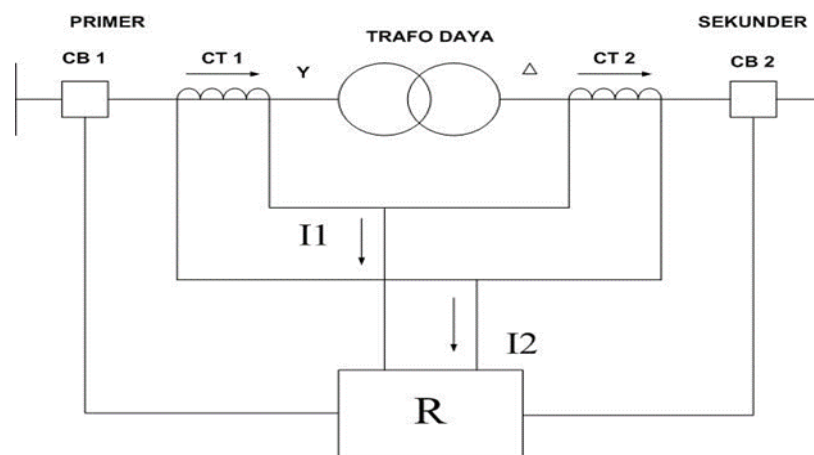


Gambar 2.12 Prinsip Kerja Relay Differensial Pada Transformator

Relay differensial mempunyai bentuk yang bermacam-macam, tergantung dari peralatan yang diamankan. Pengertian dari rele differensial itu sendiri mengandung unsur membedakan satu dengan lainnya, semua besaran yang masuk ke rele. Adapun prinsip kerja rele differensial ini terjadi dalam tiga keadaan yaitu :

1. Pada keadaan normal

Dalam keadaan normal, arus mengalir melalui peralatan/instalasi listrik yang diproteksi yaitu transformator daya dan arus-arus transformator arus, yaitu I1 dan I2 bersirkulasi, jika rele differensial di pasang antara terminal 1 dan terminal 2. Maka dalam kondisi normal tidak akan ada arus yang mengalir melaluinya.



Gambar 2.13 Prinsip Kerja Relay Differensial Pada Keadaan Normal

Dimana :

CB1 : circuit breaker pada sisi primer

CT1 : current transformator pada sisi primer

Y : kumparan trafo hubungan Y (bintang)

Δ : kumparan trafo hubungan (segitiga)

CB2 : circuit breaker pada sisi primer

CT2 : current transformator pada sisi primer

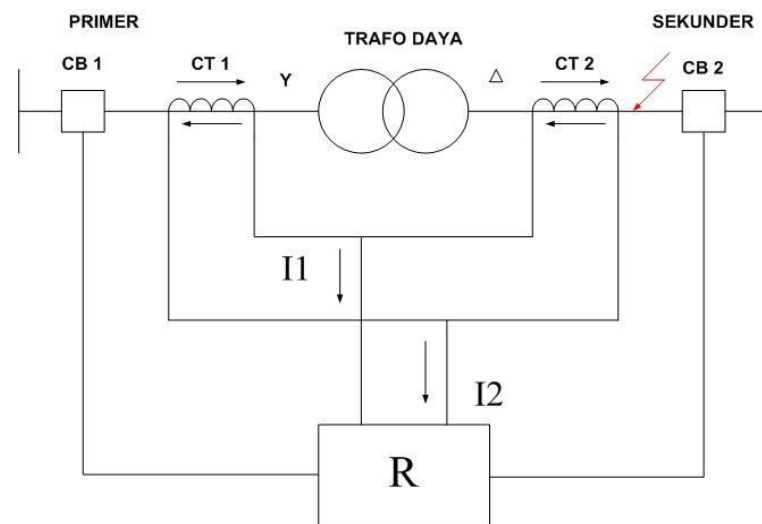
I1 : arus sisi primer

I2 : arus sisi sekunder

R : rele differensial

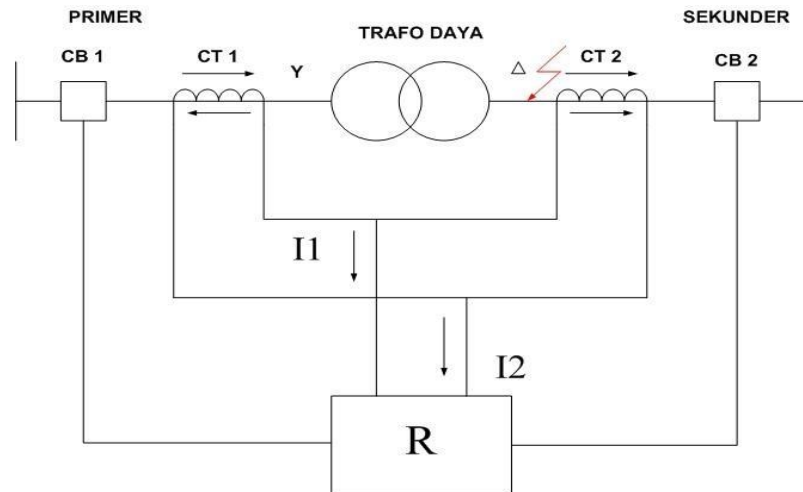
2. Pada gangguan diluar daerah proteksi

Bila dalam keadaan gangguan diluar dari transformator daya yang di proteksi (*external fault*), maka arus yang mengalir akan bertambah besar, akan tetapi sirkulasi tetap sama dengan pada kondisi normal dengan demikian rele differensial tidak akan bekerja.



Gambar 2.14 Gangguan Diluar Daerah Proteksi

3. Pada gangguan di dalam daerah proteksi



Gambar 2.15 Gangguan Didalam Daerah Proteksi

Jika gangguan terjadi didalam daerah proteksinya pada transformator daya yang di proteksinya *internal fault* maka arah sirkulasi arus di salah satu sisi akan terbalik, menyebabkan keseimbangan pada kondisi normal terganggu, akibatnya arus I_D akan mengalir melalui rele differensial dari terminal 1 menuju ke terminal 2 maka terjadi selisih arus didalam rele, selanjutnya rele tersebut akan mengoperasikan CB untuk memutus.

Selama arus-arus sekunder transformator arus sama besar, maka tidak akan ada arus yang mengalir melalui *operating coil* rele differensial, tetapi setiap gangguan yang mengakibatkan arus yang mengalir melalui operating coil rele differensial, maka rele differensial akan bekerja dan memberikan komando *trapping* kepada circuit breaker sehingga transformator daya yang terganggu dapat diisolir dari sistem tenaga listrik.

2.12.2 Fungsi Relay Differensial

Pengaman rele differensial merupakan alat pengaman utama untuk mengamankan transformator daya terhadap hubung singkat salah satunya yang terjadi didalam kumparan fasa. Terjadi gangguan hubung singkat biasanya



disebabkan oleh adanya kerusakan isolasi kawat. Akibat kemungkinan terjadi adalah :

- a. Hubung singkat antara kumparan fasa satu dengan fasa yang lainnya.
- b. Hubung singkat antara masing-masing lilitan dalam satu kumparan .
- c. Hubung singkat antara satu fasa dengan tanah
- d. Hubung singkat antara kumparan sisi tegangan tinggi dengan kumparan sisi tegangan rendah.

Dari masing-masing jenis hubung singkat tersebut diatas rele pengaman, rele differensial mempunyai system rangkaian sendiri-sendiri. Diantaranya adalah pengaman rele differensial *longitudinal* yang digunakan untuk mengamankan transformator daya terhadap hubung singkat antara kumparan yang satu dengan kumparan lainnya, pengaman rele differensial untuk masing-masing lilitan membujur (*longitudinal*) merupakan system yang paling banyak dijumpai pemakaiannya dilapangan.. karena sulitnya pengaman rele differensial ini hanya dipasang pada transformator daya berkapasitas besar saja.

2.12.3 Sifat Pengaman Relay Differensial

Adapun sifat pengaman pada relay differensial yaitu sebagai berikut :

1. Sangat selektif dan bekerja dengan cepat (*instantaneous*), tidak perlu dikoordinasikan dengan relay lain.
2. Digunakan sebagai relay pengaman utama, tidak dapat digunakan sebagai pengaman cadangan untuk seksi atau daerah berikutnya.
3. Daerah pengamannya dibatasi oleh pasangan transformator arus, dimana relay differensial datang.

2.12.4 Persyaratan Pada Relay Differensial

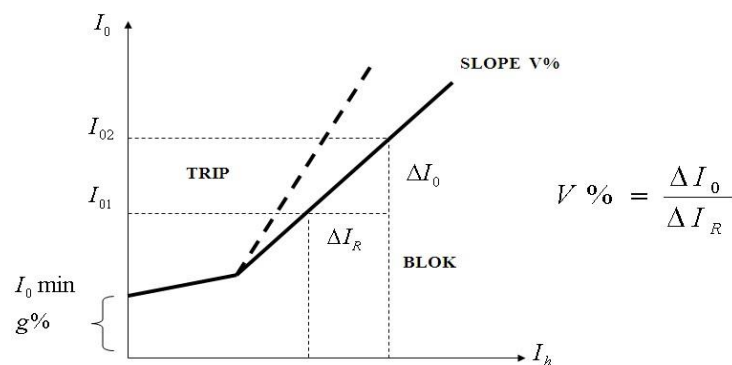
Adapun persyaratan pada relay differensial yaitu sebagai berikut :

1. Kedua transformator arus yang digunakan harus mempunyai rasio yang sama atau mempunyai rasio sedemikian rupa, sehingga kedua arus sekundernya sama.

2. Karakteristik kedua transformator arusnya sama.
3. Polaritas kedua transformator arusnya benar.

2.12.5 Karakteristik Relay Differensial

Rele differensial merupakan suatu rele yang karakteristik kerjanya berdasarkan keseimbangan (*balance*), yang membandingkan arus-arus sekunder transformator arus (*CT*) terpasang pada terminal-terminal peralatan atau instalasi listrik yang diamankan.



Gambar 2.16 Karakteristik Relay Differensial

2.12.6 Pemasangan Relay Differensial

Di dalam pemasangan rele differensial pada transformator daya, sering mengalami kesulitan ketepatan kerja rele, sehingga pada akhirnya rele akan mengalami salah kerja. Salah kerja pada rele differensial disebabkan oleh hubungan transformator daya disisi tegangan tinggi dan sisi tegangan rendah sering berbeda, sehingga terjadi ketidak seimbangan arus pada transformator.

Sehubungan dengan pemasangan rele differensial ke transformator daya, maka perlu sekali untuk mengetahui persyaratan rele differensial tersebut, yaitu:

- a. besar arus-arus yang masuk ke rele harus sama.
- b. fasa-fasa tersebut harus berlawanan.

2.12.7 Perhitungan Teori Setting Relay Differensial

2.12.7.1 Perhitungan Rasio CT

Pemilihan CT disesuaikan dengan alat ukur dan proteksi. Pemilihan CT dengan kualitas baik akan memberikan perlindungan sistem yang baik pula. Relay diferensial sangat tergantung terhadap karakteristik CT.

Jika karakteristik CT bekerja dengan baik, maka sistem akan terlindungi oleh relay diferensial ini secara optimal. CT ditempatkan di kedua sisi peralatan yang akan diamankan (transformator tenaga). Rasio CT untuk relay diferensial yang dipilih sebaiknya memiliki nilai yang mendekati nilai I_{rating} .

$$I_{rating} = 110\% \times I_{nominal} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$I_1 = \frac{S}{\sqrt{3} \times V_p} \dots\dots\dots (2.5)$$

$$I_2 = \frac{S}{\sqrt{3} \times V_s} \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana :

I = Arus Nominal (A)

S = Daya (MVA)

V_p = Tegangan Primer

V_s = Tegangan Sekunder

2.12.7.2 Perhitungan Error Mismatch

Error Mismatch adalah kesalahan dalam membaca perbedaan arus dan tegangan di sisi primer dan sekunder transformator tenaga. Error mismatch diharapkan nilainya sekecil mungkin agar proteksi relay diferensial bekerja secara optimal dalam mengamankan transformator tenaga. Dengan syarat kesensitifan relay diferensial dalam pengoperasian Mismatch error tidak boleh lebih dari 5%. Syarat ini ditentukan untuk proteksi agar optimal menjaga sistem tenaga listrik dari gangguan.

Error mismatch didapatkan dari perbandingan nilai ratio CT ideal dengan nilai ratio CT yang terpasang / yang ada dipasaran. Berikut adalah persamaannya :

$$ErrorMismatch = \frac{CT\ ideal}{CT\ terpasang} \% \dots\dots\dots (2.7)$$

Persamaan untuk menghitung nilai ratio CT ideal adalah :

$$CT_1(ideal) = CT_2 \times \frac{V_s}{V_p} \dots\dots\dots (2.8)$$

$$CT_2(ideal) = CT_1 \times \frac{V_p}{V_s} \dots\dots\dots (2.9)$$

Dimana :

CT (Ideal) = rasio transformator arus ideal

CT (Terpasang) = nilai CT terpasang

V_p = tegangan primer (V)

V_s = tegangan sekunder (V)

2.12.7.3 Perhitungan Arus Sekunder CT

Arus sekunder CT merupakan arus yang terbaca oleh transformator arus.

Persamaan yang digunakan untuk mencari arus sekunder CT adalah :

$$I_{sekunder} = \frac{1}{rasio\ CT} \times I_n \dots\dots\dots (2.10)$$

Dimana :

$I_{sekunder}$ = Arus sekunder CT

I_n = Arus nominal

2.12.7.4 Perhitungan Arus Differensial

Arus differensial merupakan selisih arus pada sisi tegangan tinggi dengan sisi tegangan rendah. Persamaan yang digunakan untuk mencari arus differensial adalah :

$$I_d = I_2 - I_1 \dots\dots\dots (2.11)$$

Dimana :

I_d = Arus differensial (A)

I_1 = arus sekunder CT₁ (A)

I_2 = arus sekunder CT₂ (A)

2.12.7.5 Perhitungan Arus Restrain

Arus restrain adalah arus penahan yang digunakan sebagai parameter kerja dari relay differensial. Arus restrain digunakan untuk mengetahui arus rata-rata yang mengalir pada transformator sisi tegangan tinggi dengan sisi tegangan rendah.

$$I_r = \frac{I_1 + I_2}{2} \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana :

I_r = Arus restrain (A)

I_1 = arus sekunder CT₁ (A)

I_2 = arus sekunder CT₂ (A)

2.12.7.6 Perhitungan Percent Slope

Dengan membagi arus diferensial dan arus restrain maka diperoleh nilai percent slope. Slope₁ bertugas untuk menentukan arus diferensial agar dapat bekerja terhadap gangguan internal, sedangkan slope₂ bertugas untuk tidak bekerja pada saat gangguan eksternal. Berikut persamaan untuk menghitung percent slope :

$$slope_1 = \frac{I_d}{I_r} \times 100\% \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana :

slope₁ = setting kecuraman 1

I_d = Arus Diferensial (A)

I_r = Arus Restrain (A)

2.12.7.7 Perhitungan Arus Setting

Arus Setting merupakan batasan dalam menentukan apakah relay differensial akan bekerja atau tidak dengan cara membandingkan dengan arus diferensial. Jika arus diferensial nilainya melebihi arus setting maka relay akan bekerja men-tripkan jaringan. Berikut merupakan persamaan untuk menghitung arus setting :

$$I_{set} = slope \times I_{restrain} \dots\dots\dots(2.14)$$



Dimana :

I_{set} = Arus Setting (A)

$Slope_1$ = Setting Kecuraman (%)

$I_{restrain}$ = Arus Penahan (A)