



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Transformator

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain, melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi-elektromagnet. 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.

Dalam bidang elektronika, transformator digunakan antara lain sebagai gadengan impedansi antara sumber dan beban; untuk memisahkan satu rangkaian dari rangkaian yang lain; dan untuk menghambat arus searah sambil tetap meakukan atau mengalirkan arus bolak-balik antara rangkaian.¹

Hukum utama dalam transformator adalah hukum induksi Faraday. Menurut hukum ini suatu gaya listrik melalui garis lengkung yang tertutup, adalah berbanding lurus dengan perubahan persatuan waktu dari pada arus induksi atau flux yang dilingkari oleh garis lengkung itu. Selain hukum Faraday, transformator menggunakan hukum Lorenz yaitu Apabila ada arus listrik bolak-balik yang mengalir mengelilingi suatu inti besi maka inti besi itu akan berubah menjadi magnet dan apabila magnet tersebut dikelilingi oleh suatu belitan maka pada kedua ujung belitan tersebut akan terjadi beda tegangan mengelilingi magnet, maka akan timbul gaya gerak listrik (GGL).

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

¹ Zuhail. 2000. Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama



tipis yang berisolasi, untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh Eddy Current.

2. Kumputan transformator adalah beberapa lilitan kawat berisolasi yang membentuk suatu kumputan. Kumputan tersebut terdiri dari kumputan primer dan kumputan sekunder yang diisolasi baik terhadap inti besi maupun terhadap antar kumputan dengan isolasi padat seperti karton, pertinak dan lain-lain. Kumputan tersebut sebagai alat transformasi tegangan dan arus.
3. Minyak transformator merupakan salah satu bahan isolasi cair yang dipergunakan sebagai isolasi dan pendingin pada transformator.
4. Bushing yaitu sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator. Bushing sekaligus berfungsi sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan tangki transformator.
5. Tangki Konservator 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.

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

1. Sistem pendingin

Pada inti besi dan kumputan-kumputan 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 pemuatan minyak isolasi akibat panas yang timbul maka minyak ditampung pada tangki yang sering disebut sebagai konservator.²

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.

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

dt = perubahan waktu dalam satuan detik

$d\phi$ = perubahan garis-garis gaya magnet dalam satuan weber

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

² Aslimeri, dkk. 2008. Teknik Transmisi Tenaga Listrik jilid 1, Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan. (Hal 129-136)



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)³

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 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.

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



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.⁴

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

⁴ Marsudi, Djiteng. 2005. *Pembangkitan Energi Listrik*. Jakarta: Erlangga (Hal 32)



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 Peralatan Proteksi pada Transformator

1. Relai Bucholz

Relai Bucholz adalah relai alat atau relai 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.

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. Relai 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).

3. Relai Diferensial

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. Relai 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. Relai tangki tanah

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

6. Relai Hubung tanah

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

7. Relai 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 relai ini adalah kenaikan temperatur.⁵

2.6 Relay Proteksi

Relay adalah sebuah alat yang bekerja secara otomatis mengatur/memasukkan suatu rangkaian listrik (rangkai trip atau alarm) akibat

⁵ Muslim, supari, dkk. 2008. Teknik Pembangkit Tenaga Listrik jilid 3. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan. (Hal 459-460)



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.

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 manusiaMemaksimalkan ketersediaan listrik untuk konsumen⁶

2.7 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).

⁶ Karyono, dkk. 2013 .*Pedoman dan Petunjuk Sistem Proteksi Transmisi dan Gardu Induk Jawa Bali*, Jakarta: PT. PLN (Persero) Penyaluran dan Pusat Pengaturan Beban Jawa-Bali



2. Relai 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. 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.

2.8 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.⁷

2.9 Relay Differensial

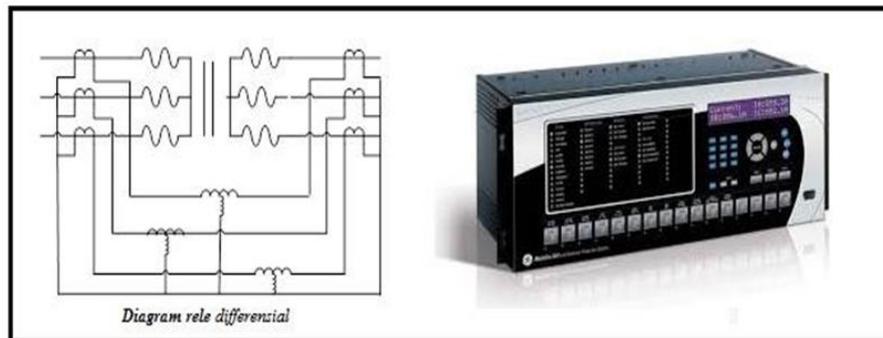
Relay differensial transformator dilengkapi dengan alat yang memblokir (mencegah) relay bekerja jika terdapat harmonisa genap dalam arus gangguan yang dideteksinya. Hal ini diperlukan untuk mencegah relay sewaktu meng-*energize* transformator, yaitu pada waktu memberi tegangan ke transformator yang semula tidak bertegangan. Misalnya sehabis terjadi gangguan dimana tegangan system hilang. Dalam menghidupkankembali 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 diferensial 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 sensorharmonisa genap yang berfungsi mencegah relay bekerja, relay tidak akan

⁷ Karyono, dkk. 2013 .*Pedoman dan Petunjuk Sistem Proteksi Transmisi dan Gardu Induk Jawa Bali*, Jakarta: PT. PLN (Persero) Penyaluran dan Pusat Pengaturan Beban Jawa-Bali (Hal 8-10)



bekerja walaupun hanya ada arus beban nol disatu sisi (tegangan tinggi saja). Dengan demikian proses pemulihan tegangan dalam system tidak akan terhambat oleh tripnya transformator yang di energize.⁸

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 2.1 Rele Differensial

Rele differensial memberi perintah untuk membuka kedua pemutus beban dan member 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.

⁸ Marsudi, Djiteng. 2005. Pembangunan Energi Listrik. Jakarta: Erlangga (Hal 348)



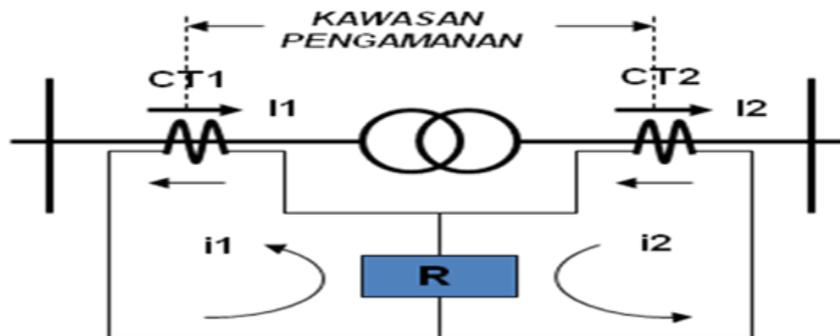
2. Persyaratan pada pengaman rele differensial
 - a. CT_1 dan CT_2 harus mempunyai perbandingan transformasi yang sama, atau mempunyai perbandingan transformasi sedemikian, sehingga arus sekundernya sama.
 - b. Karakteristik CT_1 dan CT_2 sama.
 - c. Rangkaian CT ke rele harus benar.

2.9.1 Prinsip Kerja Relay Differensial

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

Prinsip kerja rele 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 sera 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) 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.

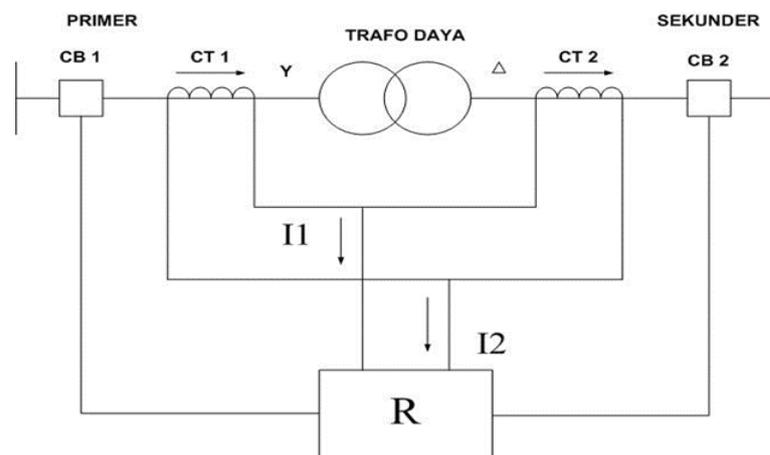


Gambar 2.2 Prinsip Kerja Rele Differensial Pada Transformator Daya

Rele 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 I_1 dan I_2 bersirkulasi, jika rele differensial di pasang antara terminal 1 dan terminal 2. Maka dalam kondisi normal tidak akan ada arus yang mengalir melaluinya.



Gambar 2.3 Prinsip Kerja Rele Differensial Pada Keadaan Normal

Dimana :

CB1 : circuit breaker pada sisi primer

CT1 : current transformator pada sisi primer

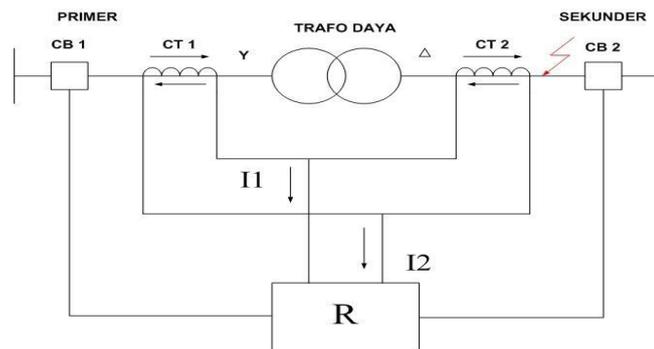
Y : kumparan trafo hubungan Y (bintang)



- Δ : kumparan trafo hubungan (segitiga)
 CB2 : circuit breaker pada sisi primer
 CT2 : current transformer pada sisi primer
 I1 : arus sisi primer
 I2 : arus sisi sekunder
 R : rele differensial

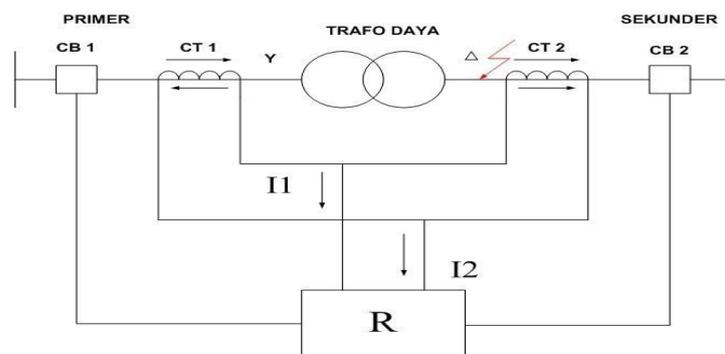
2. Pada gangguan diluar daerah proteksi

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 2.4 Gangguan Diluar Daerah Proteksi

3. Pada gangguan di dalam daerah proteksi



Gambar 2.5 Pada 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.

2.9.2 Fungsi rele 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 :

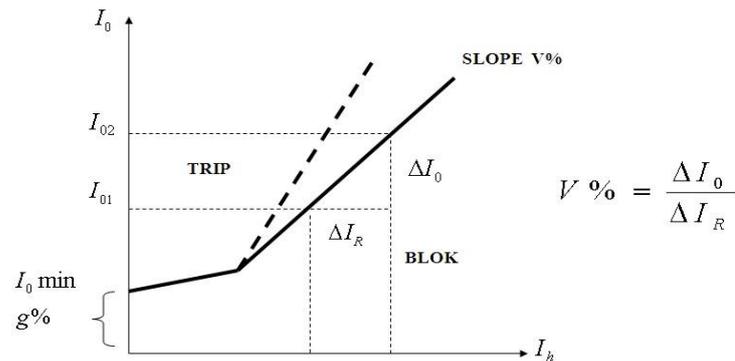
- a. Hubung singkat antara kumparan fasa satu dengan fasa yang lainnya.
- b. Hubung singkat antara masing-masing lilitan dalam satu kumparan .
- c. Hubung singkat antara satu fasa dengan tanah
- d. Hubung singkat antara kumparan sisi tegangan tinggi dengan kumparan sisi tegangan rendah.

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.



2.9.3 Karakteristik rele 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 2.6 Karakteristik Rele Differensial

2.9.4 Pemasangan rele 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.

2.9.5 Perhitungan Teori Setting Relay Differensial

2.9.5.1 Perhitungan Rasio CT

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



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

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

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

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

Dimana :

I = Arus Nominal (A)

S = Daya (MVA)

V_p = Tegangan Primer

V_s = Tegangan Sekunder

2.9.5.2 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 relai diferensial bekerja secara optimal dalam mengamankan transformator tenaga. Dengan syarat kesensitifan relai 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 :

$$Error\ Mismatch = \frac{CT\ ideal}{CT\ terpasang} \% \quad (2.7)$$

Persamaan untuk menghitung nilai ratio CT ideal adalah :

$$CT_1\ (Ideal) = CT_2 \times \frac{V_s}{V_p} \quad (2.8)$$

$$CT_2\ (Ideal) = CT_1 \times \frac{V_p}{V_s} \quad (2.9)$$



Dimana :

CT (Ideal) = rasio transformator arus ideal

CT (Terpasang) = nilai CT terpasang

V_p = tegangan primer (V)

V_s = tegangan sekunder (V)

2.9.5.3 Perhitungan Arus Sekunder CT

Arus sekunder CT merupakan arus yang terbaca oleh transformator arus.

Persamaan yang digunakan untuk mencari arus sekunder CT adalah :

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

Dimana :

I_{sekunder} = Arus sekunder CT

I_n = Arus nominal

2.9.5.4 Perhitungan Arus Differensial

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

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

Dimana :

I_d = Arus differensial (A)

I_1 = arus sekunder CT₁ (A)

I_2 = arus sekunder CT₂ (A)

2.9.5.5 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.

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



Dimana :

I_r = Arus restrain (A)

I_1 = arus sekunder CT₁ (A)

I_2 = arus sekunder CT₂ (A)

2.9.5.6 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 :

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

$$slope_2 = \left(\frac{I_d}{I_r} \times 2\right) \times 100\% \quad (2.14)$$

Dimana :

slope₁ = setting kecuraman 1

slope₂ = setting kecuraman 2

I_d = Arus Diferensial (A)

I_r = Arus Restrain (A)

2.9.5.7 Perhitungan Arus Setting

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

$$I_{set} = slope_1 \times I_{restrain} \quad (2.15)$$

Dimana :

I_{set} = Arus Setting (A)

Slope₁ = Setting Kecuraman (%)

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



2.9.5.8 Gangguan Hubung Singkat pada Transformator

Pada perhitungan gangguan ini digunakan untuk memberikan perkiraan apakah relay differensial akan bekerja atau tidak terhadap arus gangguan yang diberikan dengan. Perhitungan gangguan dapat dilakukan dengan persamaan :

$$I_f \text{ relay} = I_f \times \text{rasio CT} \quad (2.16)$$

$$I_{1 \text{ fault}} = \frac{I_f \text{ relay}}{I_1} \quad (2.17)$$

$$I_{2 \text{ fault}} = \frac{I_f \text{ relay}}{I_2} \quad (2.18)$$

$$I_d = I_2 - I_{1 \text{ fault}} \quad (2.19)$$

$$I_d = I_{2 \text{ fault}} - I_1 \quad (2.20)$$

$$Z_t = \frac{v^2}{MVA} \quad (2.21)$$

$$I_{HS} = \frac{V}{Z_t} \quad (2.22)$$

Dimana :

$I_f \text{ relay}$ = Arus gangguan yang dibaca rele

I_f = Arus yang masuk pada rele

CT = Rasio CT

I_d = Arus diferensial

I_1 = Arus sekunder CT₁

I_2 = Arus sekunder CT₂

$I_{1 \text{ fault}}$ = Arus sekunder CT₁ saat terjadi gangguan

$I_{2 \text{ fault}}$ = Arus sekunder CT₂ saat terjadi gangguan

Z_t = Impedansi Transformator

I_{HS} = Arus hubung singkat