



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 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, atau walaupun terjadi gangguan tidak menimbulkan pemadaman bagi konsumen. Hal ini dapat dijabarkan sebagai fungsi dan persyaratan rele pengamanan seperti penjelasan berikut.

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 segera secara otomatis memberi perintah untuk memisahkan peralatan atau bagian sistem tenaga listrik dan segera secara otomatis memberi perintah untuk membuka pemutus tenaga untuk memisahkan peralatan atau bagian dari sistem yang terganggu dan memberi isyarat berupa lampu dan 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 masing-masing bagian sistem dapat dipisahkan sedemikian rupa sehingga sistem lainnya tetap dapat beroperasi secara normal.

Tugas rele proteksi juga berfungsi menunjukkan lokasi dan macam gangguannya. Dengan data tersebut memudahkan analisa dari gangguannya. Dalam beberapa hal rele hanya memberi tanda adanya gangguan atau kerusakan, jika dipandang gangguan atau kerusakan tersebut tidak segera membahayakan. 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 melaksanakan fungsi di atas maka rele pengaman harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

- a) Dapat diandalkan (reliable)
- b) Selektif
- c) Waktu kerja rele cepat
- d) Peka (sensitive)
- e) Ekonomis dan sederhana

Untuk mendapatkan penyetelan yang memenuhi semua kriteria atas adakalanya sulit dicapai, yaitu terutama antara selektif dan cepat, sehingga adakalanya harus diadakan kompromi. 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 dan/ 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:

- a) Pengaman utama yang pada umumnya selektif dan cepat, dan malah jenis tertentu mempunyai sifat selektif mutlak misalnya rele differensial.
- b) 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.¹

2.2 Transformator

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian yang lain, melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi-elektromagnet. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaannya dalam sistem tenaga memungkinkan dipilihnya tenaga yang sesuai dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan; misalnya kebutuhan akan tegangan tinggi dalam jarak jauh.

Dalam bidang elektronika, transformator digunakan antara lain sebagai gandengan impedansi antar sumber dan beban; untuk memisahkan satu rangkaian dari rangkaian yang lain; untuk menghambat arus searah sambil tetap melakukan arus bolak-balik antara rangkaian.

Berdasarkan frekuensi, transformator dapat dikelompokkan sebagai berikut:

1. Frekuensi daya, 50-60 c/s.
2. Frekuensi pendengaran 50 c/s-20kc/s.
3. Frekuensi radio, di atas 30 kc/s.

Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi :

¹ Hazairin Samaulah, 2004, Dasar-dasar Sistem Proteksi Tenaga Listrik, Hal 2



1. Transformator daya
2. Transformator distribusi
3. Transformator pengukuran: yang terdiri dari transformator arus dan transformator tegangan.

Keadaan transformator yang berdasarkan induksi electromagnet menghendaki adanya gandengan magnet antara rangkaian primer dan sekunder. Gandengan magnet ini berupa tipe inti dan tipe cangkang.

Karena prinsipnya yang sederhana namun mempunyai arti penting sebagai dasar pembahasan mesin listrik, pembahasan transformator patut didahulukan.²

2.2.1 Transformator daya

Transformator daya merupakan suatu alat listrik statis, yang dipergunakan untuk memindahkan daya dari satu rangkaian ke rangkaian lain, dengan mengubah tegangan, tanpa mengubah frekuensi. Dalam bentuknya yang paling sederhana transformator terdiri atas kumparan dan satu induktansi mutual. Kumparan primer adalah yang menerima daya, dan kumparan sekunder tersambung pada beban. Kedua kumparan dibelit pada suatu inti yang terdiri atas material magnetik berlaminasi.

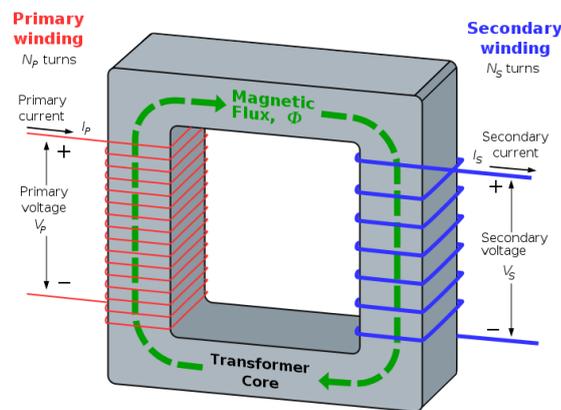
Landasan fisik transformator adalah induktansi mutual (timbang balik) antara kedua rangkaian yang dibutuhkan oleh suatu fluks magnetik bersama yang melewati suatu jalur dengan reluktansi rendah. Kedua kumparan memiliki induktansi mutual yang tinggi. Jika suatu kumparan disambungkan pada suatu sumber tegangan bolak balik, suatu fluks bolak balik terjadi di dalam inti berlaminasi, yang sebagian besar akan mengait pada kumparan lainnya, dan di dalamnya akan terinduksi suatu gaya gerak listrik (GGL).³

² Zuhail, 1991, Dasar Tenaga Listrik, Penerbit ITB Bandung, Hal. 15

³ Abdul Kadir, 1998, Transmisi Tenaga Listrik, Penerbit UI, Hal 43

2.2.2 Prinsip-prinsip dasar transformator

Transformator menggunakan prinsip hukum induksi faraday dan hukum lorentz dalam menyalurkan daya, dimana arus 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 potensial. Arus yang mengalir pada belitan primer akan menginduksi inti besi transformator sehingga didalam inti besi akan mengalir flux magnet dan flux magnet ini akan menginduksi belitan sekunder sehingga pada ujung belitan sekunder akan terdapat beda potensial⁴



Gambar 2.1 Prinsip Kerja Transformator

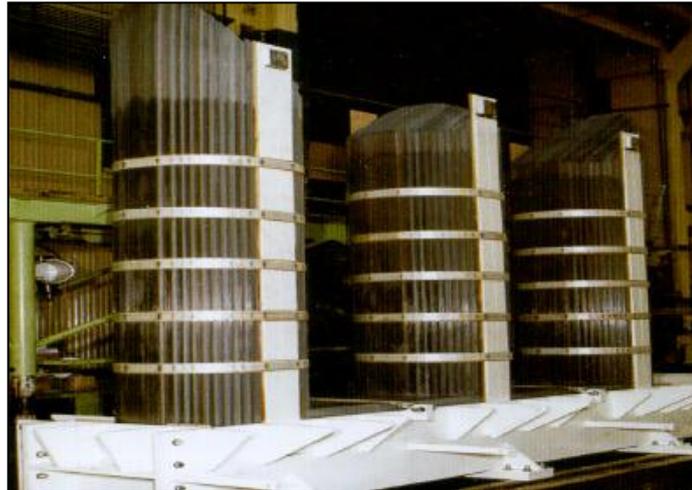
2.2.3 Bagian – bagian transformator

Transformator pada umumnya memiliki beberapa bagian-bagian, diantaranya adalah:

1. Bagian utama

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

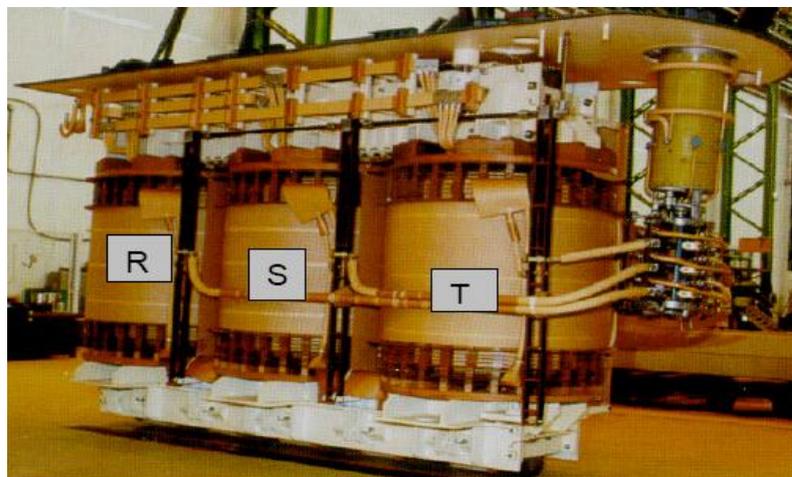
⁴ PT. PLN (Persero), Buku Petunjuk Transformator Tenaga



Gambar 2.2 Inti besi Transformator

2. Kumbaran transformator

Belitan terdiri dari batang tembaga berisolasi yang mengelilingi inti besi, dimana saat arus bolak balik mengalir pada belitan tembaga tersebut, inti besi akan terinduksi dan menimbulkan flux magnetik.



Gambar 2.3 Kumbaran Transformator

3. Bushing

Bushing merupakan sarana penghubung antara belitan dengan jaringan luar. Bushing terdiri dari sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator. Isolator tersebut berfungsi sebagai penyekat antara konduktor bushing dengan body main tank transformator.



Gambar 2.4 Bushing Transformator

4. Oil preservation & ekspansion (konservator)

Saat terjadi kenaikan suhu operasi pada transformator, minyak isolasi akan memuai sehingga volumenya bertambah. Sebaliknya saat terjadi penurunan suhu operasi, maka minyak akan menyusut dan volume minyak akan turun. Konservator digunakan untuk menampung minyak pada saat transformator mengalami kenaikan suhu.



Gambar 2.5 Konservator

Seiring dengan naik turunnya volume minyak di konservator akibat pemuaian dan penyusutan minyak, volume udara didalam konservator pun akan bertambah dan berkurang. Penambahan atau pembuangan udara didalam konservator akan berhubungan dengan udara luar. Agar minyak isolasi transformator tidak terkontaminasi oleh kelembaban dan oksigen dari luar, maka udara yang akan masuk kedalam konservator akan difilter melalui silicagel.



Gambar 2.6 Silica gel

Untuk menghindari agar minyak trafo tidak berhubungan langsung dengan udara luar, maka saat ini konservator dirancang dengan menggunakan breather bag/rubber bag, yaitu sejenis balon karet yang dipasang didalam tangki konservator.

5. Pendingin

Suhu pada transformator yang sedang beroperasi akan dipengaruhi oleh kualitas tegangan jaringan, losses pada trafo itu sendiri dan suhu lingkungan. Suhu operasi yang tinggi akan mengakibatkan rusaknya isolasi kertas pada transformator. Oleh karena itu pendinginan yang efektif sangat diperlukan.

Minyak isolasi transformator selain merupakan media isolasi juga berfungsi sebagai pendingin. Pada saat minyak bersirkulasi, panas yang berasal dari belitan akan dibawa oleh minyak sesuai jalur sirkulasinya dan akan didinginkan pada sirip – sirip radiator. Adapun proses pendinginan ini dapat dibantu oleh adanya kipas dan pompa sirkulasi guna meningkatkan efisiensi pendinginan.

Tabel 2.1 Macam – macam pendingin pada Transformator

No.	Macam Sistem Pendingin *)	Media			
		Dalam Transformator		Diluar Transformator	
		Sirkulasi alamiah	Sirkulasi Paksa	Sirkulasi Alamiah	Sirkulasi Paksa
1.	AN	-	-	Udara	-
2.	AF	-	-	-	Udara
3.	ONAN	Minyak	-	Udara	-
4.	ONAF	Minyak	-	-	Udara
5.	OFAN	-	Minyak	Udara	-
6.	OFAF	-	Minyak	-	Udara
7.	OFWF	-	Minyak	-	Air
8.	ONAN/ONAF	Kombinasi 3 dan 4			
9.	ONAN/OFAN	Kombinasi 3 dan 5			
10.	ONAN/OFAF	Kombinasi 3 dan 6			
11.	ONAN/OFWF	Kombinasi 3 dan 7			

6. Dielectric (Minyak isolasi transformator & isolasi kertas)

Minyak Isolasi trafo

Minyak isolasi pada transformator berfungsi sebagai media isolasi, pendingin dan pelindung belitan dari oksidasi. Minyak isolasi trafo merupakan minyak mineral yang secara umum terbagi menjadi tiga jenis, yaitu parafinik, naphthanik dan aromatik. Antara ketiga jenis minyak dasar tersebut tidak boleh dilakukan pencampuran karena memiliki sifat fisik maupun kimia yang berbeda.

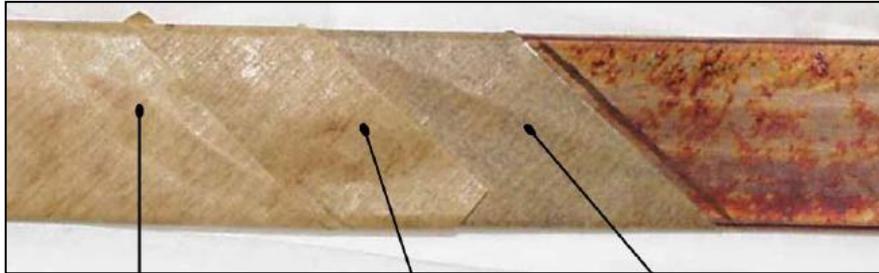


Gambar 2.7 Minyak Isolasi Transformator



Kertas isolasi trafo

Isolasi kertas berfungsi sebagai isolasi, pemberi jarak, dan memiliki kemampuan mekanis.



Gambar 2.8 Tembaga yang dilapisi kertas isolasi

7. Tap Changer

Kestabilan tegangan dalam suatu jaringan merupakan salah satu hal yang dinilai sebagai kualitas tegangan. Transformator dituntut memiliki nilai tegangan output yang stabil sedangkan besarnya tegangan input tidak selalu sama. Dengan mengubah banyaknya belitan pada sisi primer diharapkan dapat merubah ratio antara belitan primer dan sekunder dan dengan demikian tegangan output/sekunder pun dapat disesuaikan dengan kebutuhan sistem berapapun tegangan input/primernya. Penyesuaian ratio belitan ini disebut Tap changer.

Proses perubahan ratio belitan ini dapat dilakukan pada saat trafo sedang berbeban (On load tap changer) atau saat trafo tidak berbeban (Off load tap changer).

Tap changer terdiri dari :

- Selector Switch
- Diverter Switch
- Tahanan transisi

Dikarenakan aktifitas tap changer lebih dinamis dibanding dengan belitan utama dan inti besi, maka kompartemen antara belitan utama dengan tap changer dipisah.

Selector switch merupakan rangkaian mekanis yang terdiri dari terminal terminal untuk menentukan posisi tap atau ratio belitan primer.

Diverter switch merupakan rangkaian mekanis yang dirancang untuk melakukan kontak atau melepaskan kontak dengan kecepatan yang tinggi.



Tahanan transisi merupakan tahanan sementara yang akan dilewati arus primer pada saat perubahan tap.⁵

2.3 Trafo Arus (CT)

Trafo Arus (Current Transformator) adalah peralatan yang digunakan untuk melakukan pengukuran besaran arus pada instalasi tenaga listrik disisi primer (TET, TT dan TM) yang berskala besar dengan melakukan transformasi dari besaran arus yang besar menjadi besaran arus yang kecil secara akurat dan teliti untuk keperluan pengukuran dan proteksi.⁶

2.3.1 Rasio trafo arus

Trafo arus untuk pengaman rele differensial dipasang pada sisi tegangan tinggi dan sisi tegangan rendah transformator, oleh karena itu rasio transformasi harus dipilih sedemikian rupa sehingga besar arus sekunder pada kedua trafo arus sama atau paling tidak mendekati sama, sebab apabila terdapat perbedaan arus maka selisih arus ini akan semakin besar ketika berlangsung gangguan hubung singkat diluar daerah pengaman.

Untuk memenuhi persyaratan tersebut perlu dipilih trafo arus yang sesuai untuk mendapatkan $I_1 = I_2$, tetapi kadang-kadang hal ini tidak selalu dapat dilakukan hanya dengan trafo arus karena rasio perbandingan transformasi telah dibuat standar pada arus-arus tertentu, sehingga apabila terdapat perbedaan dengan hasil perhitungan, maka diambil harga standar yang mendekati selisih I_1 dan I_2 tidak jauh berbeda jika terlalu besar maka diperlukan trafo arus bantu untuk menyamakan selisih ini.

Untuk menentukan rasio trafo arus dapat ditentukan besar rasio transformasinya:

$$KCT_1 = \frac{Ip_1}{Ip_2} \dots\dots\dots(2.1)$$

$$KCT_2 = \frac{Is_1}{Is_2} \dots\dots\dots(2.2)$$

⁵ ibid

⁶ PT. PLN (Persero), Buku Petunjuk Trafo Arus



Dimana :

KCT_1 = Rasio transformator CT_1 dari sisi primer transformator daya

KCT_2 = Rasio transformator CT_2 dari sisi sekunder transformator daya

I_{p1} = Trafo arus CT_1 primer pada sisi masukan (arus yang masuk)

I_{p2} = Trafo arus CT_1 sekunder pada sisi keluaran (arus yang keluar)

I_{s1} = Trafo arus CT_2 primer pada sisi masukan (arus yang masuk)

I_{s2} = Trafo arus CT_2 sekunder pada sisi keluaran (arus yang keluar)

2.4 Gangguan pada transformator

Gangguan yang berpengaruh terhadap kerusakan transformator tidak hanya karena adanya gangguan di dalam transformator atau di dalam daerah pengaman transformator tetapi juga adanya gangguan di luar daerah pengaman. Justru kerusakan transformator cenderung karena terlalu seringnya terjadi gangguan di luar daerah pengaman.

Gangguan pada transformator dapat diklasifikasikan menjadi beberapa bagian diantaranya :

2.4.1 Gangguan tahap awal

Gangguan yang dimulai dari suatu gangguan kecil dan lama kelamaan menjadi suatu gangguan yang besar, diantaranya:

1. Terjadi busur api yang kecil dan pemanasan lokal karena sambungan listrik yang tidak sempurna, gangguan pada inti transformator karena kerusakan pada isolasi dari laminasinya.
2. Gangguan isolasi dari laminasinya.
3. Terjadi arus sirkulasi pada transformator-transformator yang bekerja paralel. Semua hal diatas menyebabkan pemanasan lokal, tetapi mempengaruhi suhu transformator secara keseluruhan. Gangguan ini tidak dapat dideteksi dari terminal transformator karena besar dan keseimbangan arus serta tegangan tidak berbeda dengan kondisi pada operasi normal. Walaupun gangguan tahap awal merupakan gangguan yang kecil, tetapi jika tidak segera dideteksi akan membesar dan akan menimbulkan kerusakan pada transformator tersebut.



2.4.2 Gangguan hubung singkat

Gangguan hubung singkat yang mungkin terjadi di dalam jaringan (sistem kelistrikan) ada 3, yaitu:

1. Gangguan hubung singkat 3 fasa
2. Gangguan hubung singkat 2 fasa, dan
3. Gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah

Dari ketiga macam gangguan hubung singkat di atas, arus gangguannya dihitung dengan menggunakan rumus umum (hukum ohm) yaitu :

$$I = \frac{V}{Z} \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana :

I = Arus yang mengalir pada hambatan Z.

V= Tegangan sumber (Volt).

Z= Impedansi

Dengan mengetahui besarnya tegangan sumber dan besarnya nilai impedansi tiap komponen jaringan serta bentuk konfigurasi jaringan di dalam sistem, maka besarnya arus gangguan hubung singkat dapat dihitung dengan rumus di atas.

Yang membedakan antara gangguan hubung singkat 3 fasa, 2 fasa dan 1 fasa ke tanah adalah impedansi yang terbentuk sesuai dengan macam gangguan itu sendiri dan tegangan yang memasok arus ke titik gangguan, impedansi yang terbentuk dapat ditunjukkan seperti berikut :

Z untuk gangguan 3 fasa $Z = Z_1$

Z untuk gangguan 2 fasa $Z = Z_1 + Z_2$

Z untuk gangguan 1 fasa ke tanah $Z = Z_1 + Z_2 + Z_0$

Dimana,

Z_1 = Impedansi urutan positif 3 fasa

Z_2 = Impedansi urutan negatif 2 fasa

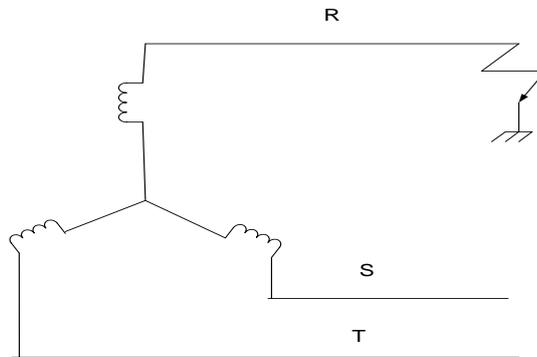
Z_0 = Impedansi urutan nol 1 fasa

1. Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah

Kemungkinan terjadinya gangguan satu fasa ke tanah adalah *back flashover* antara tiang ke salah satu kawat transmisi dan distribusi. Sesaat setelah



tiang tersambar petir yang besar walaupun tahanan kaki tiangnya cukup rendah namun bisa juga gangguan fasa ke tanah ini terjadi sewaktu salah satu kawat fasa transmisi / distribusi tersentuh pohon yang cukup tinggi dll.



Gambar 2.9 hubung singkat satu fasa ke tanah

Besar gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah

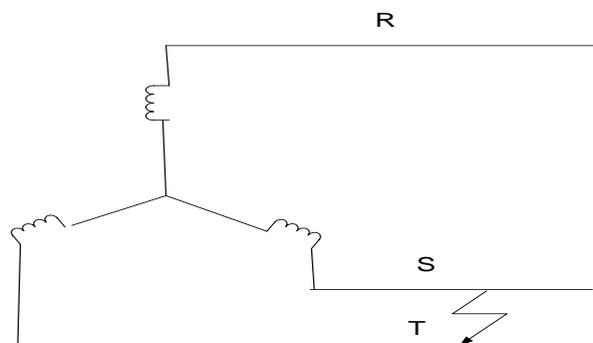
$$I_{1F} = I_{2F} = I_{0F} = \frac{V}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \dots\dots\dots (2.4)$$

2. Gangguan hubung singkat dua fasa

Kemungkinan terjadinya gangguan 2 fasa disebabkan oleh putusnya kawat fasa tengah pada transmisi atau distribusi. Kemungkinan lainnya adalah dari rusaknya isolator di transmisi atau distribusi sekaligus 2 fasa. Gangguan seperti ini biasanya mengakibatkan 2 fasa ke tanah.

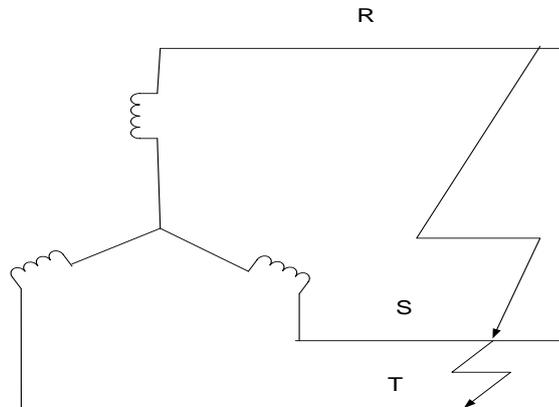
Besar gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah

$$I_{1F} = - I_{2F} = \frac{V}{Z_1 + Z_2} \dots\dots\dots(2.5)$$



Gambar 2.10 Hubung singkat dua fasa

3. Gangguan hubung singkat tiga fasa



Gambar 2.11 Hubung singkat tiga fasa

Untuk mengetahui arus hubung singkat tiga fasa perlu diketahui tegangan transformator daya per unit (pu) sisi primer maupun sisi sekunder dengan menggunakan rumus :

$$V \text{ (pu)} = \frac{KV \text{ sebenarnya}}{KV \text{ dasar}} \dots\dots\dots(2.6)$$

Dimana :

V (pu) = Tegangan sisi primer dan sisi sekunder pada transformator daya

KV_{sebenarnya} = Tegangan sebenarnya pada sisi primer dan sisi sekunder

KV_{dasar} = Tegangan dasar pada sisi primer dan sisi sekunder

Gangguan hubung singkat tiga fasa tersebut dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$I_{hs3\phi} = \frac{V}{ZT} \dots\dots\dots(2.7)$$

$$I_{hs3\phi} = I_{hs} \times in \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana :

$I_{hs3\phi}$ = Arus hubung singkat tiga fasa

V = Tegangan

ZT = Impedansi total

Gangguan ini dapat dideteksi karena akan timbul arus maupun tegangan yang tidak normal atau tidak seimbang. Dalam gangguan hubung singkat, banyak ditunjukkan pada gangguan tiga fasa dan satu fasa ke tanah. Hal ini dilakukan karena



hubung singkat tiga fasa menghasilkan arus gangguan yang besar, sedangkan hubung singkat satu fasa ke tanah merupakan gangguan yang sering terjadi. Gangguan hubung singkat tiga fasa dan gangguan dua fasa digunakan untuk menentukan setting rele-rele proteksi gangguan fasa, sedangkan gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah digunakan untuk setting rele-rele proteksi gangguan hubung tanah.

2.4.3 Gangguan di luar daerah pengamannya

Jenis gangguan ini di bedakan menjadi dua macam, yaitu gangguan beban lebih dan gangguan hubung singkat eksternal. antara lain:

1) Gangguan beban lebih

Transformator dapat di operasikan secara terus menerus pada arus beban nominalnya (100%). Apabila beban yang dilayani lebih besar dari 100%, transformator akan mengalami pemanasan lebih. Kondisi ini tidak akan segera menimbulkan kerusakan pada transformator, tetapi bila berlangsung terus menerus akan memperpendek umur isolasi.

Keadaan beban lebih berbeda dengan keadaan arus lebih. Pada beban lebih besar arus hanya sekitar 10% sampai dengan 59% diatas nominal dan dapat di putuskan setelah berlangsung beberapa menit. Sedang pada arus lebih besar arus mencapai beberapa kali arus nominal dan harus di putuskan secepatnya. Batas factor pembebanan lebih (*over load*) dan lamanya terjadi agar batas kenaikan temperature yang di ijinakan tidak terlampaui.

2) Hubung Singkat Eksternal

Gangguan hubung singkat diluar proteksi transformator, missalnya hubung singkat di rel daya, hubung singkat di penghantar (*Fender*) dan gangguan hubung singkat disistem yang merupakan sumber (*Source*) bagi transformator daya resebur. Gangguan ini dapat dideteksi karena timbul arus yang besar.⁷

2.4.4 Gangguan di dalam daerah pengamannya

Pengaman utama transformator daya ditujukan sebagai pengaman di dalam daerah pengamannya. Gangguan di dalam sangat serius dan selalu ada resiko

⁷ Arismunandar, 1997, Teknik Tenaga Listrik Jilid 3, Hal 73



terjadinya kebakaran; gangguan dalam dapat digolongkan menjadi dua kelompok, yaitu:

Gangguan listrik akan dengan segera menyebabkan kerusakan yang serius tetapi umumnya dapat dideteksi oleh adanya arus atau tegangan yang tidak seimbang, diantaranya:

1. Gangguan satu fasa atau antar fasa pada sisi tegangan tinggi atau tegangan rendah di terminal luar.
2. Gangguan satu fasa atau antar fasa pada lilitan sisi tegangan atau tegangan rendah.
3. Hubung singkat antar lilitan di sisi tegangan tinggi atau tegangan rendah. Gangguan tanah pada lilitan tersier, atau hubung singkat antar belitan di lilitan tersier.⁸

2.5 Upaya Mengatasi Gangguan

Usaha untuk mengurangi gangguan dapat di kelompokkan menjadi 2 bagian yaitu;

1. Mengurangi terjadinya gangguan

- a. Memakai peralatan yang dapat diandalkan (memenuhi persyaratan standar).
- b. Penentuan spesifikasi yang tepat dan disain yang baik (tahan terhadap kondisi kerja normal/gangguan).
- c. Pemasangan yang benar sesuai dengan desain
- d. Penggunaan kawat tanah pada pada saluran udara tegangan tinggi atau tegangan menengah
- e. Penebangan/pemangkasan pohon-pohon yang dekat dengan saluran udara tegangan tinggi atau tegangan menengah.
- f. Penggunaan kawat udara/kabel secara selektip.

2. Mengurangi akibat gangguan

Mengurangi akibat gangguan dapat dilakukan dengan cara antara lain;

- a. Mengurangi besarnya gangguan dengan cara menghindari konsentrasi pembangkit mengurangi (*Short Circuit Level*)

⁸ Hazairin Samaulah, 2004, Dasar-dasar Sistem Proteksi Tenaga Listrik, Hal 103



- b. Melepaskan bagian sistem yang terganggu dengan menggunakan circuit breaker dan rele proteksi
- c. Koordinasi rele proteksi yang tepat sehingga tercipta pengaman yang selektif.
- d. Memanfaatkan saluran sirkuit ganda (*Double Circuit*)
- e. Menggunakan pola *Load Shandding* atau sistem *Islanding*.
- f. Menggunakan tahanan pentanahan netral⁹

2.6 Rele

Rele menurut definisi dari IEEE (The Institute Of Electrical And Electronic Engineers) merupakan suatu peralatan elektrik yang didesain untuk menginterpretasikan kondisi masukan dalam kondisi tertentu dan memberikan respon dengan mengoperasikan kontak-kontak bila masukan yang diterima telah memenuhi kondisi tertentu. Sistem rele proteksi ini harus peka terhadap segala gangguan baik berat maupun ringan, sehingga dapat bekerja dengan tepat atau memberikan reaksi bila terjadi perubahan dari keadaan normal keadaan gangguan. Rele proteksi harus mampu memutuskan bagian yang terganggu secepat mungkin, sebab sistem yang berada dalam keadaan tidak normal, terganggu akan segera terisolir, sehingga tidak mengganggu atau mempengaruhi kestabilan sistem lain yang normal. Rele proteksi harus dapat di andalkan terhadap setiap jenis gangguan yang dapat membahayakan sistem secara keseluruhan. Jadi dalam perencanaan suatu sistem rele proteksi, selain memperhatikan kontinuitas sistem itu sendiri juga harus di perhatikan kondisi sistem kerja yang lain.

2.6.1 Fungsi rele proteksi

Fungsi dari relay proteksi adalah untuk menentukan dengan segera pemutusan / penutupan pelayanan penyaluran setiap elemen sistem tenaga listrik bila mendapatkan gangguan atau kondisi kerja yang abnormal, yang dapat mengakibatkan kerusakan alat atau akan mempengaruhi sistem / sebagian sistem yang masih beroperasi normal. Pemutusan beban (C.B.) merupakan satu rangkaian dengan relay pengaman.

⁹ Wahyudi Sarimun, 2012, Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik, Hal 6



Oleh karena itu C.B. harus mempunyai kemampuan untuk memutuskan arus hubung singkat yang mengalir melaluinya. Selain itu, juga harus mampu terhadap penutupan pada kondisi hubung singkat yang kemudian diputuskan lagi sesuai dengan sinyal yang diterima relay. Bila pemakaian relay pengaman dan C.B. diperhitungkan tidak ekonomis, maka dapat dipakai fuse / sekring.

Fungsi yang lain dari relay pengaman adalah untuk mengetahui letak dan jenis gangguan. Sehingga dari pengamatan ini dapat dipakai untuk pedoman perbaikan peralatan yang rusak. Biasanya data tersebut dianalisa secara efektif guna langkah pencegahan terhadap gangguan dan juga untuk mengetahui kekurangan-kekurangan apa yang ada pada sistem dan pada pengaman (termasuk relay) itu sendiri.¹⁰

2.6.2 Klasifikasi rele proteksi

Rele-rele yang akan digunakan dalam sistem tenaga listrik dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

- Berdasarkan Prinsip Kerjanya

1. Rele Temperature (Thermal Relay)

Rele jenis ini bekerja karena pengaruh panas arus listrik yaitu mendeteksi arus dengan pertambahan temperatur yang ditimbulkan arus yang melewatinya. Rele ini dapat juga bekerja karena ketidak seimbangan arus yang menyebabkan kenaikan temperatur akibat komponen urutan negatif. Rele jenis ini sering dipakai untuk proteksi terhadap keadaan arus lebih, yaitu dengan mendeteksi panas yang terjadi akibat arus lebih tersebut.

2. Rele Elektromagnetik (Electromagnetic Relay)

Jenis rele ini dapat menggunakan sumber arus bolak-balik atau sumber arus searah sebagai tenaga penggerak rele.

3. Rele Statis (Static Relay)

Rele jenis statis adalah rele yang bekerja dengan menggunakan komponen-komponen statis, seperti transistor, diode dan lain-lain guna mendapatkan karakteristik yang diinginkan.

¹⁰ Muhammad Taqiyuddin Alawiy, 2006, Diktat Proteksi Sistem Tenaga Listrik, Hal 6



- Berdasarkan Besar Ukur dan Fungsinya

1. Rele-rele akan bekerja bila besaran ukurnya turun sampai harga tertentu. Rele jenis ini misalnya rele tegangan kurang (under voltage relay) dan rele frekuensi kurang (under frekuensi relay).
2. Rele-rele akan bekerja bila besaran bila besaran ukurnya melebihi suatu harga tertentu, misalnya : misalnya rele arus lebih (over current relay) dan rele tegangan lebih over voltage relay).
3. Rele daya adalah jenis rele besaran (directional relay) yang akan bekerja bila arah daya mengalir kesuatu arah tertentu yang tidak dikehendaki.
4. Rele differensial yaitu rele yang akan bekerja berdasarkan perbedaan tegangan, arus atau fasa antar dua tempat atau lebih.
5. Rele jarak yaitu rele yang bekerja berdasarkan pada perbandingan harga tegangan dan arus. Jadi dapat dikatakan bahwa besaran yang dideteksi adalah impedansi.¹¹

2.6.3 Rele differensial

Rele Differensial mempunyai bentuk yang bermacam-macam, tergantung dari peralatan yang diamankan. Sistem proteksi rele differensial secara universal dipergunakan untuk proteksi pada generator, transformator daya, busbar dan saluran transmisi, ke semua sistem proteksi differensial tersebut berdasarkan pada prinsip keseimbangan (balance), atau membandingkan arus-arus sekunder transformator arus yang terpasang pada terminal-terminal peralatan/instalasi listrik yang diproteksi.

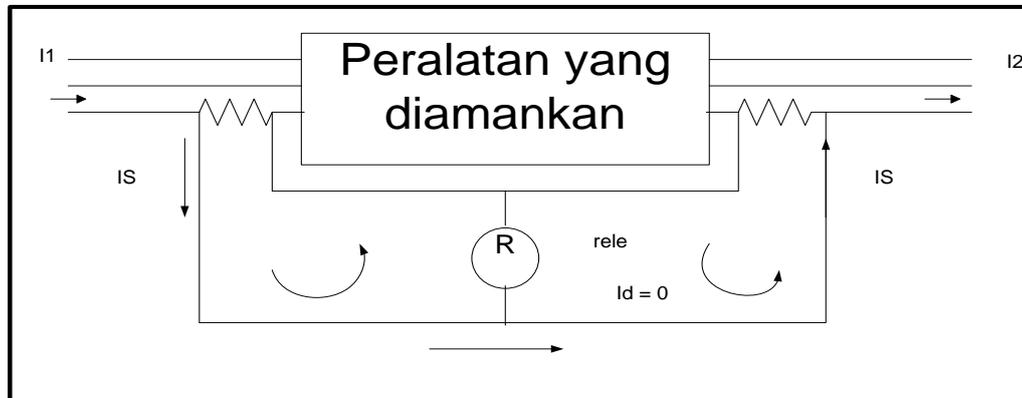
Jenis – jenis rele differensial

1. Rele Arus Differensial
2. Rele Persentase Differensial
 - a. Rele Arus Differensial

Rele arus differensial menggunakan besaran-besaran arus yang masuk dan yang keluar dari peralatan yang diamankan untuk dibandingkan di dalam sirkit differensial. Setiap perbedaan arus digunakan untuk menggerakkan rele tersebut

¹¹ Ibid, Hal 4

Dengan demikian masing-masing fasa dibandingkan.



Gambar 2.12 Relé Arus Differensial

Pada gambar 2.6 arus magnetisasi dianggap kecil sekali sehingga dapat diabaikan. Bila terjadi gangguan di peralatan yang diamankan pada fasa-fasanya (internal fault), maka arus pada sisi pertama dan kedua mempunyai arah dan besar yang berbeda.

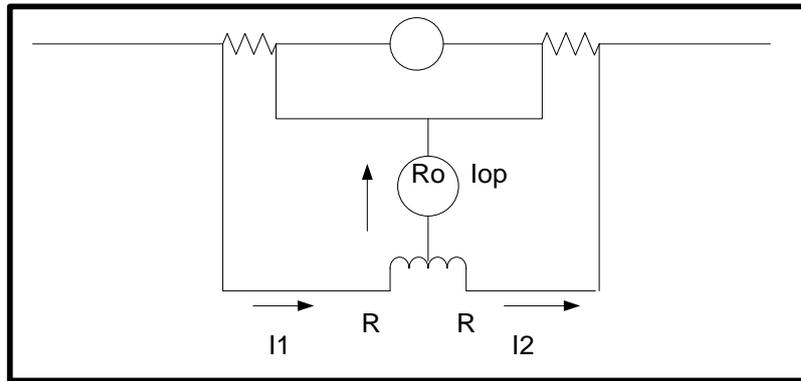
Misalkan saja trafo arus sisi satu dan dua mempunyai perbandingan yang sama yaitu 1000/5 A.

b. Relé Persentase Differensial

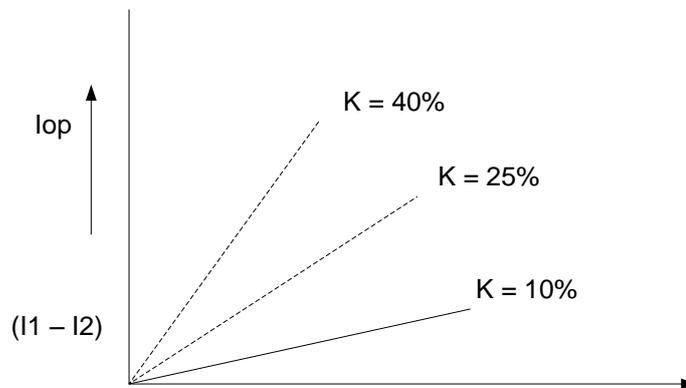
Telah diuraikan cara kerja relé arus diferensial, maka untuk relé persentase differensial mempunyai ciri kerja yang hampir sama dengan relé arus differensial, hanya saja rangkaian differensialnya melalui kumparan penahan (restraining coil). Arus differensial yang diperlukan untuk mengerjakan relé mempunyai besaran yang bervariasi, dengan perkataan lain dimungkinkan adanya setting relé. Arus differensial yang mengalir masuk ke relé sebanding dengan $(I_1 - I_2)$ dan arus yang mengalir dalam restrain coil sebanding dengan $(I_1 + I_2) / 2$ karena kumparan kerja dihubungkan ditengah kumparan penahan (restraining coil).

$$I_{op} = I_1 - I_2 = k \frac{I_1 + I_2}{2}$$

$$k = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2 / 2} \times 100\% = \text{kemiringan garis karakteristik}$$



Gambar 2.13 Rele Persentase Differensial



Gambar 2.14 Karakteristik rele persentase differensial

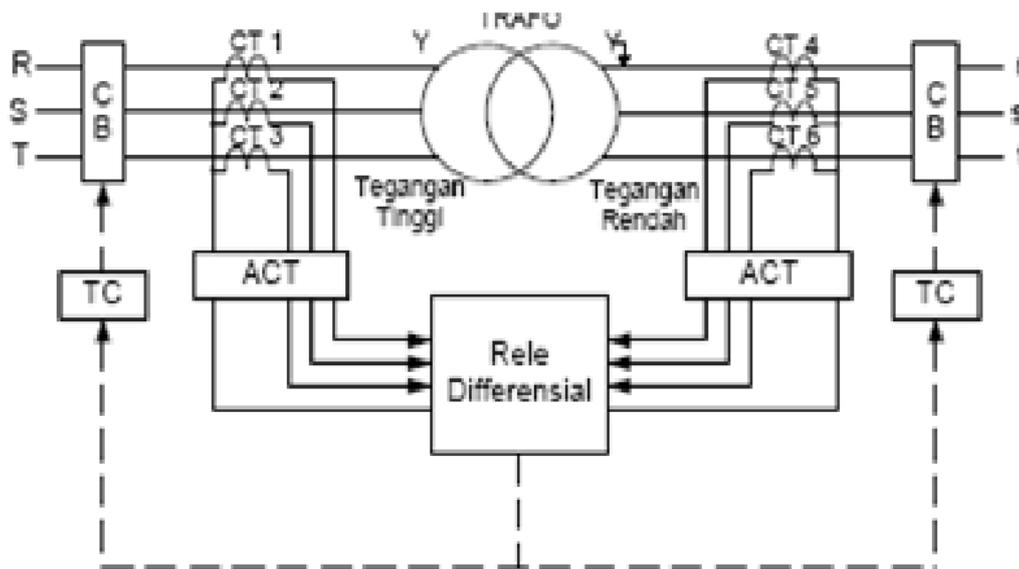
Persamaan Torsi :

$$T = k_1 I_{op}^2 - k_2 I_r^2 - k_s$$

$$= k_1 (I_1 - I_2)^2 - k_2 \left(\frac{I_1 + I_2}{2} \right) - k_s$$

Untuk $T = 0$ dapat digambarkan karakteristik dari rele persentase differensial ini.¹²

¹² Hazairin Samaulah, 2004, Dasar-dasar Sistem Proteksi Tenaga Listrik, Hal 38

Gambar 2.15 Single Line Relé Differensial¹³

2.6.4 Fungsi relé differensial

Pengaman relé differensial merupakan alat pengaman utama untuk mengamankan transformator daya, fungsinya antara lain adalah :

1. Mengamankan transformator dari gangguan hubung singkat yang terjadi di dalam transformator, antara lain hubung singkat antara kumparan dengan kumparan atau antara kumparan dengan tangki.
2. Relé differensial arus membandingkan arus yang melalui daerah pengamanan
3. Relé ini harus bekerja kalau terjadi gangguan di daerah pengamanan, dan tidak boleh bekerja dalam keadaan normal atau gangguan di luar daerah pengamanan
4. Relé ini merupakan unit pengamanan dan mempunyai selektifitas mutlak

2.6.5 Sifat pengaman relé differensial

1. Sangat selektif dan cepat bekerja (instantaneous), tidak perlu dikoordinasikan dengan relai lain.
2. Digunakan sebagai relai pengaman utama, tidak dapat digunakan sebagai pengaman cadangan untuk seksi/daerah berikutnya.

¹³ <http://unimed-proteksisistemtenagalistrik.blogspot.com>



3. Daerah pengamanannya dibatasi oleh pasangan trafo arus, dimana relai differensial dipasang

2.6.6 Persyaratan pada rele differensial

1. Kedua trafo arus yang digunakan harus mempunyai rasio yang sama atau mempunyai rasio sedemikian rupa, sehingga kedua arus sekundernya sama.
2. Karakteristik kedua trafo arusnya sama.
3. Polaritas kedua trafo arusnya benar.

2.6.7 Prinsip kerja rele differensial

Prinsip kerja rele differensial ini adalah dengan cara membandingkan dua besaran arus pada sisi primer dan arus pada sisi sekunder pada transformator arus (CT) serta arus yang masuk ke rele.

Kerja rele differensial ini dibantu oleh dua buah transformator arus (CT) dimana dalam keadaan normal, transformator arus yang pertama dan transformator yang kedua dibuat suatu ratio sedemikian rupa, sehingga arus pada kedua transformator arus tersebut sama besar.

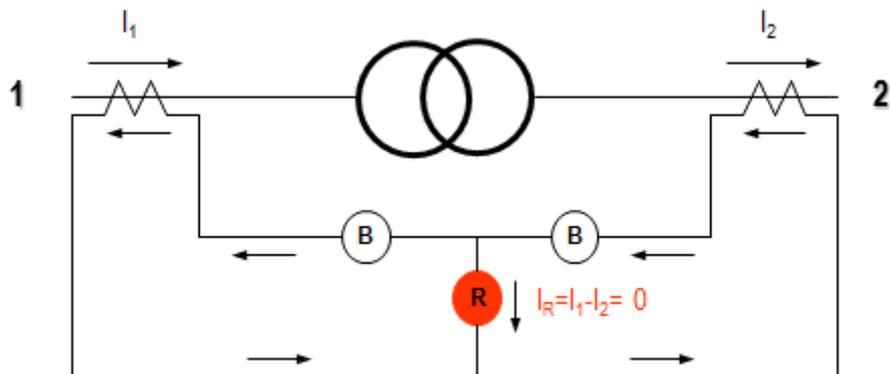
Adapun prinsip kerja rele diferensial ini terjadi dalam tiga keadaan, yaitu dalam keadaan normal, keadaan gangguan diluar daerah proteksi dan gangguan didalam daerah proteksi.¹⁴

1. Rele differensial pada keadaan normal

Dalam keadaan normal, arus mengalir melalui peralatan/insulasi listrik yang diproteksi yaitu transformator daya, dan arus-arus transformator arus, yaitu I_1 dan I_2 bersirkulasi melalui "path" I_A . jika rele differensial dipasang antara terminal 1 dan terminal 2, maka dalam kondisi normal tidak akan ada arus yang mengalir melaluinya.¹⁵

¹⁴ PT. PLN (Persero) Differensial Protection, PPT

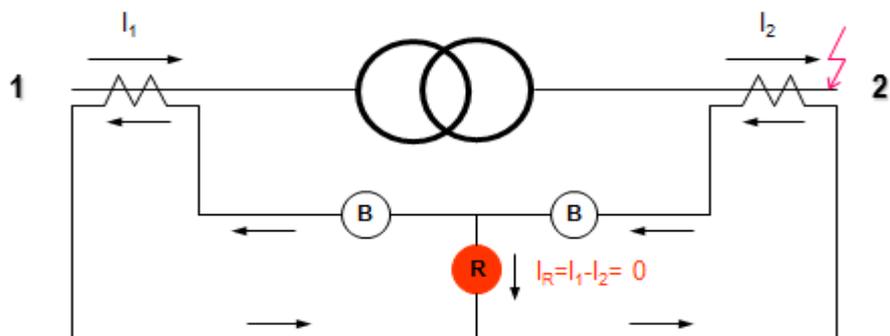
¹⁵ Hazairin Samaulah, 2004, Dasar-dasar Sistem Proteksi Tenaga Listrik, Hal 37



Gambar 2.16 Rele differensial dalam keadaan normal

2. Rele differensial pada gangguan di luar daerah proteksi

Bila dalam keadaan gangguan diluar dari transformator daya yang diproteksi (“external fault”), maka arus yang mengalir akan bertambah besar, akan tetapi sirkulasi akan tetap sama dengan pada kondisi normal dengan demikian rele differensial tidak akan bekerja.¹⁶



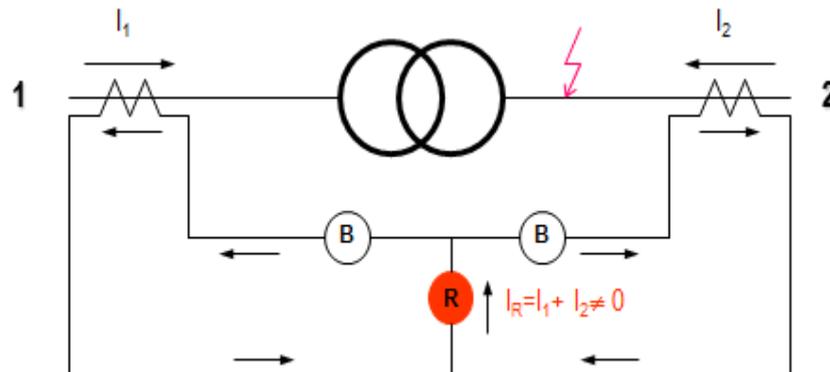
Gambar 2.17 Gangguan di luar daerah proteksi

3. Rele differensial pada gangguan di dalam daerah proteksi

Jika gangguan terjadi didalam proteksinya pada transformator daya yang diproteksi (“internal fault”); maka arah sirkulasi arus disalah satu sisi akan terbalik, menyebabkan “keseimbangan” pada kondisi normal terganggu, akibatnya arus ID akan mengalir melalui rele differensial dari terminal 1 menuju ke terminal

¹⁶ Ibid, Hal 37

2 maka terjadi selisih arus didalam rele, selanjutnya rele tersebut akan mengoperasikan CB untuk memutus.¹⁷



Gambar 2.18 Gangguan di dalam daerah proteksi

2.6.8 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.¹⁸



Gambar 2.19 Karakteristik Rele Differensial

Keterangan : I_{op} = Arus differensial

I_1 = Arus primer

I_2 = Arus sekunder

¹⁷ Ibid Hal 37

¹⁸ Ibid, Hal 40



2.6.9 Setting kerja rele differensial

Arus dasar pada kedua sisi transformator diturunkan lagi dengan menggunakan trafo arus menjadi arus keluaran sekunder trafo arus adalah :

$$I_{SA} = \frac{IN_1}{KCT_1} \dots\dots\dots (2.9)$$

$$I_{SA} = \frac{IN_2}{KCT_2} \dots\dots\dots (2.10)$$

Dimana:

- IN_1 = Arus Nominal pada sisi primer transformator daya
- IN_2 = Arus Nominal pada sisi sekunder transformator daya
- I_{SA} = Arus sekunder trafo arus CT1 dari sisi primer transformator
- I_{SB} = Arus sekunder trafo arus CT2 dari sisi sekunder transformator daya
- KCT_1 = Rasio transformator CT1 dari sisi primer transformator daya
- KCT_2 = Rasio transformator CT2 dari sisi sekunder transformator daya

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

$$I_{setting} = Slope \times I_r \dots\dots\dots (2.12)$$

$$I_r = (I_1 + I_2) / 2 \dots\dots\dots (2.13)$$

$$Slope = \frac{I_d}{I_r} \times 100\% \dots\dots\dots (2.14)$$

Dimana:

- I_d = Arus differensial
- I_r = Arus restrain (penahan)
- Slope = Batas ambang kemampuan kumparan penahan

2.6.10 Arus nominal primer dan sekunder

Arus nominal pada transformator daya dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut :

Arus Primer

$$I_{N1} = \frac{S}{V_P \cdot \sqrt{3}} \dots\dots\dots (2.15)$$



Arus Sekunder

$$I_{N2} = \frac{S}{V_S \cdot \sqrt{3}} \dots\dots\dots(2.16)$$

Dimana :

- I_{N1} = Arus nominal pada sisi primer
- I_{N2} = Arus nominal pada sisi sekunder
- S = Daya semu pada transformator daya
- V_P = Tegangan pada sisi primer
- V_S = Tegangan pada sisi sekunder

2.7 Pemutus Tenaga (PMT)

Pemutus Tenaga/PMT (circuit breaker/CB) merupakan suatu saklar yang berfungsi untuk memutuskan atau menghubungkan rangkaian sistem tenaga listrik sesuai dengan kapasitas pemutusannya (breaking capacity). Operasi pensaklaran pada pemutus tenaga dapat dilakukan secara manual dan otomatis. Secara manual pemutus tenaga dapat menghubungkan dan memutuskan rangkaian sistem tenaga listrik dengan menggunakan tombol tekan/tuas (handle), sedangkan secara otomatis hanya dapat memutuskan rangkaian sistem tenaga listrik sesuai syarat (sinyal) yang diberikan oleh rele.

Syarat-syarat yang harus dipenuhi oleh pemutus tenaga dalam sistem tenaga listrik adalah sebagai berikut :

- a. Mampu menyalurkan arus maksimum sistem tenaga listrik secara kontinu.
- b. Mampu memutuskan dan menghubungkan jaringan dalam keadaan berbeban maupun dalam keadaan gangguan hubung singkat tanpa menimbulkan kerusakan pada pemutus tenaga itu sendiri.
- c. Dapat memutuskan arus hubung singkat dengan sangat cepat agar arus hubung singkat tidak sampai merusak peralatan sistem, membuat sistem kehilangan kestabilan dan merusak pemutus tenaga itu sendiri.¹⁹

Berikut ini adalah jenis-jenis pemutus tenaga:

A. Air Circuit Breaker (ACB)

¹⁹ Carlos RS, Rumiasih, Modul Praktikum Sistem Proteksi



ACB (Air Circuit Breaker) merupakan jenis circuit breaker dengan sarana pemadam busur api berupa udara. ACB dapat digunakan pada tegangan rendah dan tegangan menengah. Udara pada tekanan ruang atmosfer digunakan sebagai peredam busur api yang timbul akibat proses switching maupun gangguan.

B. Oil Circuit Breaker (OCB)

Oil Circuit Breaker adalah jenis CB yang menggunakan minyak sebagai sarana pemadam busur api yang timbul saat terjadi gangguan. Bila terjadi busur api dalam minyak, maka minyak yang dekat busur api akan berubah menjadi uap minyak dan busur api akan dikelilingi oleh gelembung-gelembung uap minyak dan gas. Gas yang terbentuk tersebut mempunyai sifat thermal conductivity yang baik dengan tegangan ionisasi tinggi sehingga baik sekali digunakan sebagai media pemadam loncatan busur api.

C. Vacuum Circuit Breaker (VCB)

Vacuum circuit breaker memiliki ruang hampa udara untuk memadamkan busur api, pada saat circuit breaker terbuka (open), sehingga dapat mengisolir hubungan setelah busur api terjadi, akibat gangguan atau sengaja dilepas. Salah satu tipe dari circuit breaker adalah recloser. Recloser hampa udara dibuat untuk memutuskan dan menyambung kembali arus bolak-balik pada rangkaian secara otomatis. Pada saat melakukan pengesetan besaran waktu sebelumnya atau pada saat recloser dalam keadaan terputus yang kesekian kalinya, maka recloser akan terkunci (lock out), sehingga recloser harus dikembalikan pada posisi semula secara manual.

D. SF₆CB (Sulfur Circuit Breaker)

SF₆ CB adalah pemutus rangkaian yang menggunakan gas SF₆ sebagai sarana pemadam busur api. Gas SF₆ merupakan gas berat yang mempunyai sifat dielektrik dan sifat memadamkan busur api yang baik sekali. Prinsip pemadaman busur apinya adalah Gas SF₆ ditiupkan sepanjang busur api, gas ini akan mengambil panas dari busur api tersebut dan akhirnya padam. Rating tegangan CB adalah antara 3.6 KV – 760 KV.²⁰

²⁰ <http://insyaansori.blogspot.com/2013/09/macam-macam-circuit-breaker-cb.html>