

## **BAB II**

### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1 Tinjauan Pustaka**

Menurut Ir. Djiteng Marsudi dalam buku Pembangkitan Energi Listrik. Rele diferensial transformator dilengkapi dengan alat yang memblokir rele bekerja jika terdapat harmonisa genap dalam arus gangguan yang dideteksinya. Hal ini diperlukan untuk mencegah rele bekerja sewaktu meng-*energize* transformator, yaitu pada waktu memberi tegangan ke transformator yang semula tidak bertegangan. Misalnya sehabis terjadi gangguan dimana tegangan sistem hilang. Dalam menghidupkan kembali sistem, tegangan dikirim ke sebuah transformator yang tidak bertegangan. Arus beban nol akan mengalir dari satu sisi saja, hal ini akan menyebabkan rele diferensial bekerja men-*trip* PMT transformator sehingga pemulihan tegangan dalam sistem 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 rele bekerja, rele tidak akan bekerja walaupun hanya ada arus beban nol di satu sisi saja. Dengan demikian proses pemulihan tegangan dalam sistem tidak akan terhambat oleh *trip*-nya transformator yang di-*energize*

Menurut Ir. Hasan Basri dalam buku Proteksi Sistem Tenaga Listrik. Prinsip kerja rele diferensial tergantung pada adanya perbedaan arus yang masuk dan yang keluar dari bagian yang dilindungi, yaitu perbedaan arus dari dua buah trafo-arus yang masuk ke-rele. Pada rele diferensial, diperlukan dua trafo-arus yang dipasang dikedua sisinya, yaitu sisi masuk dan sisi keluar dari bagian yang dilindungi. Rele diferensial merupakan komparator sederhana yang membandingkan besaran arus, arah atau fasa relatif dari arus dikedua ujung dari daerah yang dilindungi. Pada rele elektromagnet, rele ini terdiri dari dua elektromagnet yang membangkitkan kopel yang berlawanan pada armature dimana armaturenya dilengkapi dengan kontak. Elektromagnet tersebut dialiri arus dari dua trafo-arus. Kerja rele differensial ada gangguan diluar daerah yang dilindungi dan gangguan didalam daerah yang dilindungi.

Dalam buku Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik yang ditulis oleh Ir. Wahyudi Sarimun N., MT. Rele diferensial berfungsi untuk mengamankan transformator dari gangguan yang dapat terjadi antara belitan primer atau sekunder yang disebabkan oleh beberapa gangguan yaitu antara lain. (i) Gangguan hubung singkat di jaringan dengan arus besar, arus ini dapat menyebabkan gaya mekanis yang besar pada konduktor sehingga belitan atau konduktor menjadi panas, naiknya temperatur. (ii) pada konduktor dapat merusak kertas isolasi pembungkus konduktor belitan tersebut. (iii) partial discharge memburuk, akibatnya pembentukan karbon dari minyak yang terurai menjadi lebih cepat menjadi jembatan gangguan antar lilitan.

## **2.2 Landasan Teori**

### **2.2.1 Transformator Tenaga**

#### **2.2.1.1 Umum**

Transformator merupakan suatu peralatan listrik yang berfungsi untuk menyalurkan dan mengubah level tegangan listrik dari suatu rangkaian listrik ke rangkaian listrik lainnya, melalui suatu gandingan magnet dan bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetis, dimana perbandingan tegangan antara sisi primer dan sisi sekunder berbanding lurus dengan perbandingan jumlah lilitan dan berbanding terbalik dengan perbandingan arusnya.

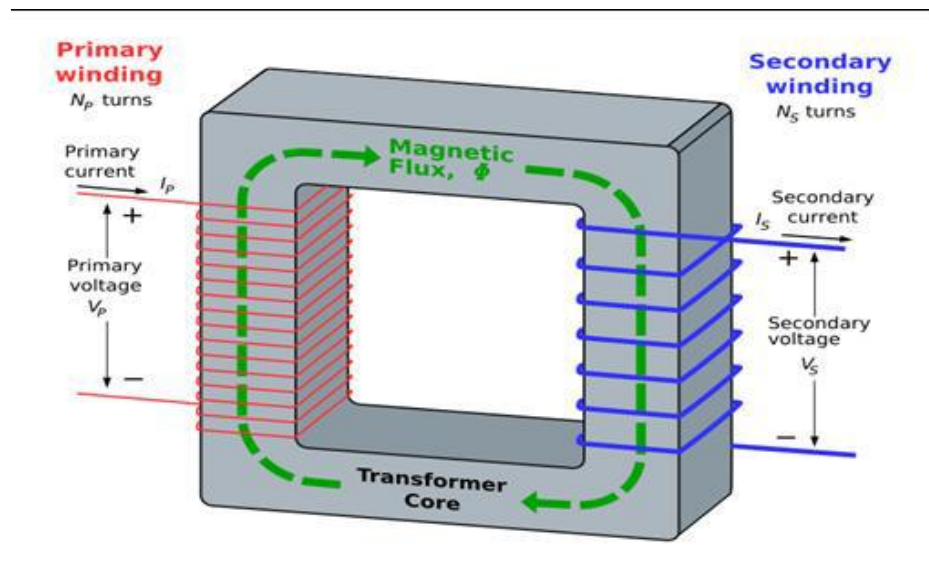
Pada suatu sistem pembangkitan diperlukan beberapa trafo tenaga diantaranya trafo penaik tegangan (*step up*) yaitu trafo generator dan trafo penurun tegangan (*step down*) yaitu *auxillary transformer*, SST (*Service Station Transformer*) dan trafo beban. Salah satu contoh trafo tenaga seperti digambarkan pada gambar 2.1



Gambar 2.1 Transformator Tenaga

#### 2.2.1.2 Prinsip Kerja Transformator

Transformator tenaga terdiri dari dua belitan atau lebih. Dimana arus listrik AC yang dialirkan pada suatu belitan maka akan menimbulkan medan magnet AC. Medan magnet AC mempunyai karakteristik seperti arus listrik. Medan magnet AC seperti arus listrik ini akan mengalir atau beredar pada medium – medium yang mempunyai reluktansi rendah. Agar medan magnet AC itu beredar pada suatu media maka belitan primer dililitkan pada suatu bahan feromagnetis yang disebut inti besi. Karena hampir semua flux magnet yang ditimbulkan oleh arus pada belitan primer tersebut bisa ditangkap pada semua sisi sekunder, maka pada sisi sekunder juga dililitkan suatu belitan yang berbahan feromagnetis yg disebut inti besi sehingga didalam inti besi akan mengalir flux magnet AC dan flux magnet AC ini akan menginduksikan GGL pada terminal belitan sekunder sehingga pada ujung belitan sekunder terdapat beda potensial seperti digambarkan pada gambar 2.2



Gambar 2.2 Prinsip Kerja Transformator Tenaga

Menurut Hukum Induksi Faraday apabila suatu belitan menangkap suatu fluksi magnetis yang nilainya berubah – ubah terhadap waktu maka kedua ujung belitan tersebut akan timbul ggl yang besarnya dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$\varepsilon = N \frac{d\phi}{dt} \qquad \varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt} \qquad \dots\dots\dots( 2.1 )$$

Dimana:

$N$  : Jumlah lilitan ( Turn )

$\varepsilon$  : Gaya Gerak Listrik ( Volt )

$\frac{d\phi}{dt}$  : Kecepatan perubahan fluks magnet ( Weber / detik )

Nilai GGL induksi yang dihasilkan dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut :

$$E = \frac{2\pi f N \phi}{\sqrt{2}} \qquad \dots\dots\dots( 2.2 )$$

$$E = 4,44 f N \phi \qquad \dots\dots\dots( 2.3 )$$

Dimana:

$E$  : Tegangan Induksi

$f$  : Frekuensi ( Hz )

$N$  : Jumlah Lilitan ( Turn )

$\emptyset$  : Flux ( Weber )

Maka untuk transformator satu fasa rumusnya sebagai berikut :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44 f_1 N_1 \emptyset_1}{4,44 f_2 N_2 \emptyset_2}$$

Karena  $f_1 = f_2$  dan dianggap tidak ada fluks bocor sehingga  $\emptyset_1 = \emptyset_2$ ,

sehingga:  $\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$ , dimana  $\frac{N_1}{N_2} = a$

maka persamaan perbandingan belitan ( turn ratio ) menjadi :

$$E_2 = \frac{N_2}{N_1} \times E_1 \text{ atau } |E_2| = \frac{1}{a} \times |E_1| \dots\dots\dots( 2.4 )$$

Dimana:

$E_1$  : Tegangan primer ( volt )

$E_2$  : Tegangan sekunder ( volt )

$N_1$  : Lilitan primer ( Turn )

$N_2$  : Lilitansekunder ( Turn )

Untuk trafo ideal , dimana dianggap tidak ada rugi – rugi daya trafo

$$|VA|_{primer} = |VA|_{sekunder}$$

$$|E_1||I_1| = |E_2||I_2|$$

$$\frac{|E_1|}{|E_2|} = \frac{|I_2|}{|I_1|}$$

$$|I_2| = \frac{|E_1|}{|E_2|} |I_1|$$

$$|I_2| = a |I_1| \dots\dots\dots( 2.4 )$$

Dimana:

$|I_1|$  : Arus primer ( A )

$|I_2|$  : Arus sekunder ( A )

Berdasarkan perbandingan antara jumlah lilitan primer dan lilitan sekunder transformator ada dua jenis yaitu :

- a) Transformator *step up* yaitu transformator yang mengubah tegangan bolak – balik rendah menjadi tinggi, transformator ini mempunyai jumlah lilitan kumparan sekunder lebih banyak dari pada jumlah lilitan primer (  $N_s > N_p$  )
- b) Transformator *step down* yaitu transformator yang mengubah tegangan bolak – balik tinggi menjadi rendah, transformator ini mempunyai jumlah lilitan kumparan primer lebih banyak dari pada jumlah lilitan sekunder (  $N_p > N_s$  )

#### 2.2.1.3 Jenis-Jenis Transformator

Jenis - jenis transformator tenaga pada pusat listrik antara lain :

- a) Transformator Generator

Transformator generator digunakan untuk menaikkan tegangan keluaran dari generator, kemudian sisi sekunder atau sisi tegangan tinggi dihubungkan rel ( busbar TT / TET ) pada switchyard untuk diinterkoneksi ke sistem. Di Indonesia, terdapat beberapa jenis tegangan untuk sistem interkoneksi ini, yaitu 70 kV, 150 kV dan 500 kV.

b) SST (*Service Station Transformer*)

SST (*Service Station Transformer*) adalah transformator tenaga yang digunakan untuk menyuplai daya pemakaian sendiri pada pusat pembangkit listrik yang berasal dari tegangan tinggi pada switch yard.

c) Transformator Pemakaian Sendiri (*Auxillary Transformer*)

Auxillary transformer adalah transformator yang digunakan untuk menyuplai daya pemakaian sendiri pada pusat pembangkit listrik yang berasal langsung dari keluaran generator.

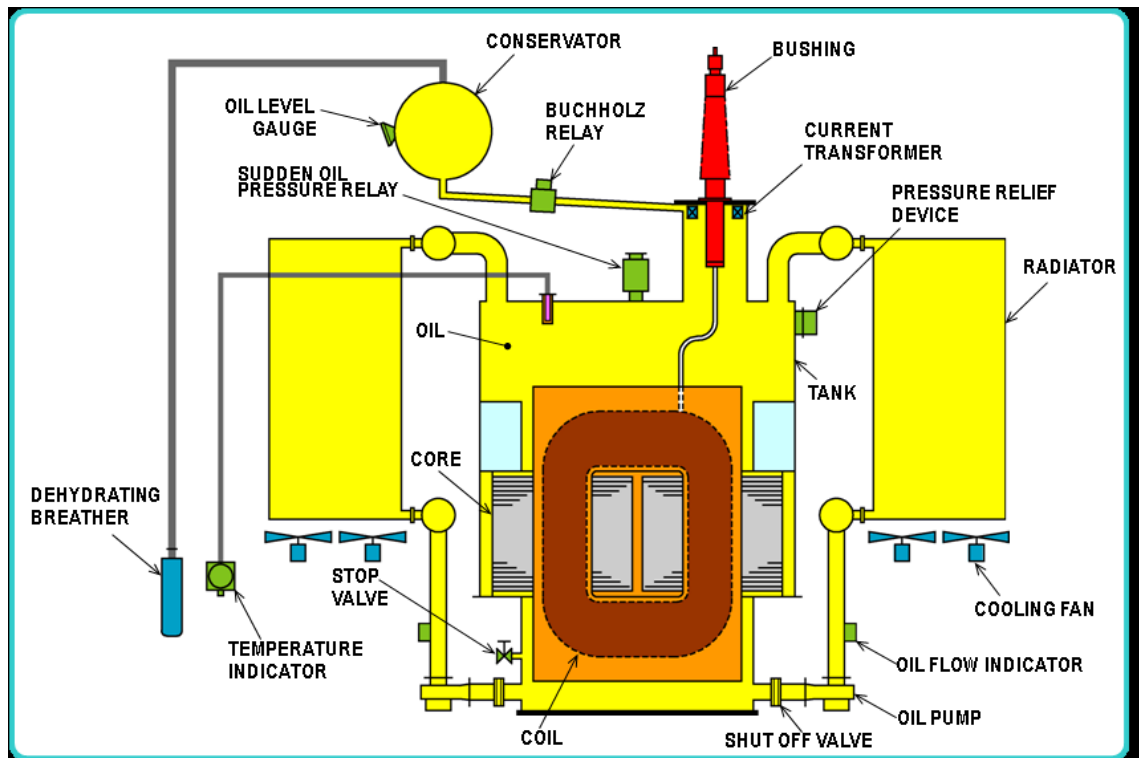
d) Transformator Beban

Transformator beban adalah transformator penurun tegangan dari tegangan tinggi ke tegangan menengah sistem distribusi primer yang berfungsi untuk menyuplai sistem distribusi tegangan menengah ( JTM ) untuk menyuplai tenaga listrik ke instalasi listrik konsumen di daerah - daerah yang berada di sekitar pusat pembangkit listrik. Pada umumnya tegangan sistem ini sebesar 20 kV.

#### 2.2.1.4 Bagian-Bagian Transformator

Transformator merupakan salah satu peralatan yang penting pada suatu pembangkit tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan daya yang dibangkitkan oleh generator yang disalurkan ke jaringan transmisi dengan mengubah besaran tegangan. Transformator dari waktu ke waktu berkembang baik dari segi kapasitasnya maupun dari segi tegangannya. Kapasitas transformator di Indonesia sangat bervariasi karena pembangunannya disesuaikan dengan kebutuhan tenaga listrik.

Bagian – bagian utama dan peralatan bantu transformator tenaga secara garis besar seperti digambarkan pada gambar 2.3 adalah sebagai berikut :

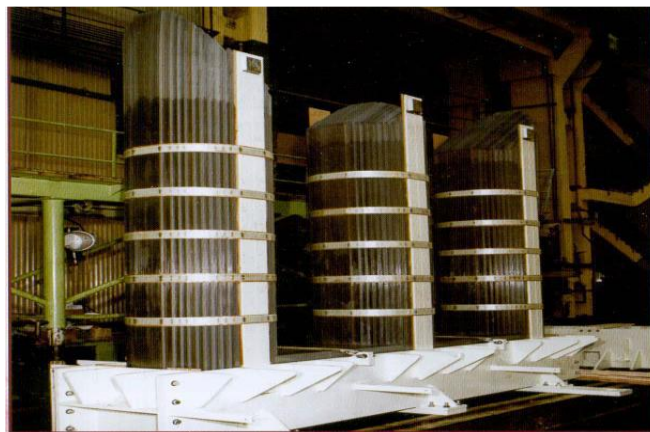


Gambar 2.3 Bagian-Bagian pada Transformator Tenaga

#### 2.2.1.4.1 Bagian Utama

##### a. Inti Besi

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.



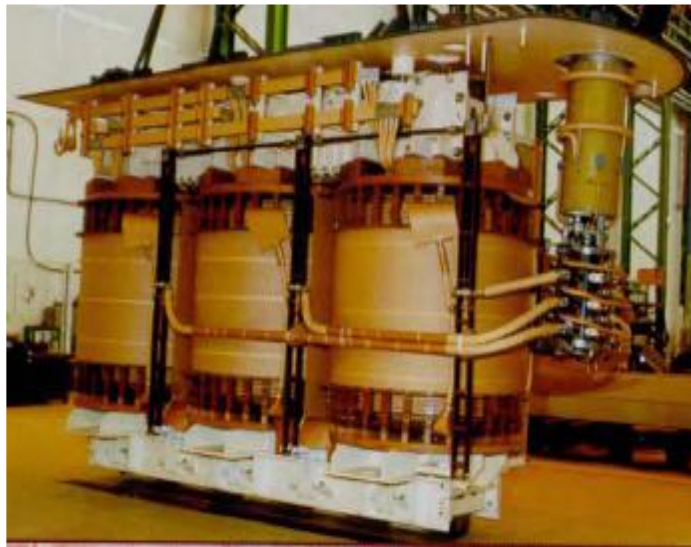
Gambar 2.4 Inti Besi Trafo



b. Kumparan Transformator

Beberapa lilitan kawat berisolasi membentuk suatu kumparan, dan kumparan tersebut diisolasi, baik terhadap inti besi maupun terhadap kumparan lain dengan menggunakan isolasi padat seperti karton, *pertinax* dan lain-lain.

Gambar 2.5 Kumparan Trafo



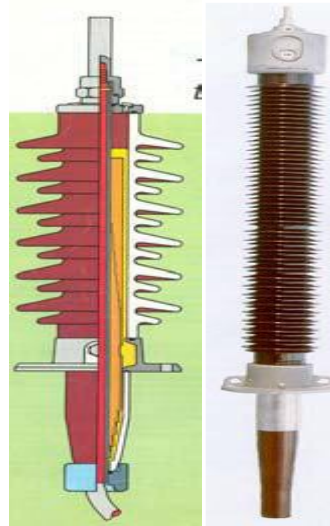
c. Minyak Transformator

Minyak transformator berfungsi sebagai pendingin dan juga sebagai isolasi dan memiliki persyaratan :

- Kekuatan isolasi tinggi
- Penyalur panas yang baik, berat jenis yang kecil, sehingga partikel-partikel dalam minyak dapat mengendap dengan cepat
- Viskositas yang rendah, agar lebih mudah bersirkulasi dan memiliki kemampuan pendinginan menjadi lebih baik
- Titik nyala yang tinggi dan tidak mudah menguap yang dapat menimbulkan bahaya
- Tidak merusak bahan isolasi padat
- Sifat kimia yang stabil

d. Bushing

Hubungan antara kumparan transformator ke jaringan luar melalui sebuah *bushing*, yaitu sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator, yang sekaligus berfungsi sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan tangki transformator.



Gambar 2.6 Bushing

e. Tangki Konservator

Pada umumnya bagian-bagian dari trafo yang terendam minyak trafo berada / (ditempatkan) di dalam tangki. Untuk menampung pemuaian pada minyak trafo, pada tangki dilengkapi dengan sebuah konservator.



Gambar 2.7 Tangki Konservator

f. Pentanahan

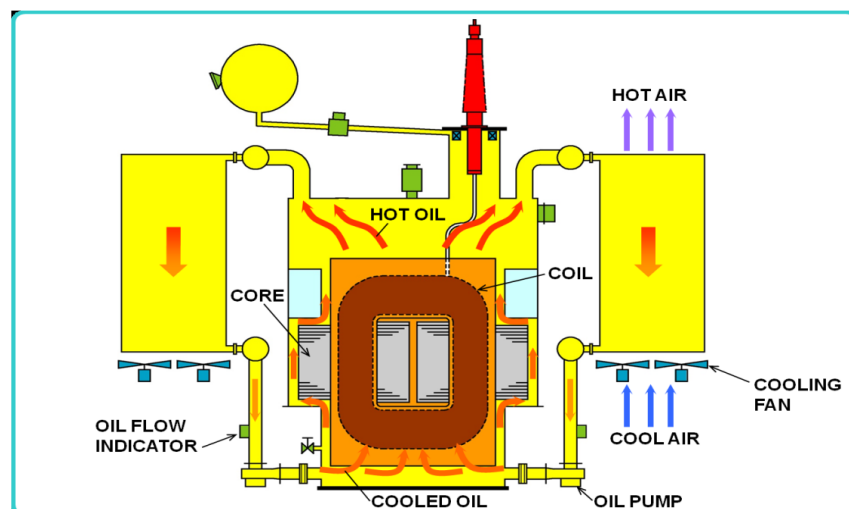
Tujuan umum dari suatu sistem pentanahan titik netral adalah untuk memberikan perlindungan terhadap manusia maupun terhadap peralatan pada saat terjadi gangguan 50/60 Hz (*short-circuit*) maupun saat kondisi transien (*lightning*/petir, *switching*).

2.2.1.4.2 Peralatan Bantu

a. Sistem Pendingin

Pada inti besi dan kumparan-kumparan akan timbul panas akibat rugi-rugi besi dan rugi-rugi tembaga. Bila panas tersebut mengakibatkan kenaikan suhu yang berlebihan, akan merusak isolasi transformator, maka untuk mengurangi adanya kenaikan suhu yang berlebihan tersebut pada transformator perlu juga dilengkapi dengan sistem pendingin yang berfungsi untuk menyalurkan panas keluar transformator.

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. Dapat dijelaskan pada gambar 2.8



Gambar 2.8 Sistem Pendingin

Pada umumnya sistem pendingin pada transformator adalah ONAN, yaitu pendinginan lilitan transformator dengan menggunakan minyak isolasi yang bekerja secara alamiah dan pendinginan kembali minyak isolasi menggunakan udara yang bekerja secara alamiah melalui dinding tangki dan sirip-sirip. Secara lengkap pada tabel 2.1 diperlihatkan metode sistem pendingin pada transformator.

Tabel 2.1 Macam – Macam Sistem Pendingin pada Trafo

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			

b. Tap Changer

Perubah perbandingan transformator untuk mendapatkan tegangan operasi sekunder sesuai yang diinginkan dari tegangan jaringan/primer yang berubah-ubah.





Gambar 2.10 Indikator

#### 2.2.1.5 Gangguan Pada Transformator

##### 2.2.1.5.1 Gangguan di dalam Transformator

Gangguan didalam sangat serius dan selalu ada resiko terjadinya kebakaran, gangguan didalam dapat dikelompokkan menjadi dua kelompok sebagai berikut :

1. Gangguan hubung singkat.

Gangguan ini umumnya dapat dideteksi oleh adanya arus atau tegangan yang tidak seimbang, seperti :

- a. Gangguan satu fasa pada sisi tegangan tinggi atau tegangan rendah di terminal luar.
- b. Hubung singkat pada belitan tegangan tinggi atau tegangan rendah.
- c. Gangguan tanah pada belitan tertier atau hubungan singkat antar belitan tertier.

Hubung singkat antar lilitan akibat kerusakan isolasi sebagai akibat beban yang berlebihan atau sambungan yang longgar, isolasi transformator gagal oleh tegangan impuls.

## 2. Gangguan pada inti

Gangguan ini yang bermula dari gangguan kecil atau tidak berarti, namun secara lambat laun akan menimbulkan kerusakan. Gangguan yang termasuk seperti ini adalah :

- a. Sambungan-sambungan penghantar secara elektrik kurang baik dan gangguan pada inti trafo, misalnya tembusnya lapisan isolasi inti, klem-klem yang kurang kencang, yang akan menimbulkan busur api yang terbatas pada minyak.
- b. Gangguan sistem pendingin yang akan menyebabkan pemanasan lebih walaupun bebannya belum mencapai nominal.
- c. Kurangnya minyak pada tangki transformator dapat juga menyebabkan butir (b) terjadi atau tersumbatnya aliran minyak sehingga menimbulkan pemanasan setempat pada belitan.
- d. Gangguan pada pengatur tegangan dan pembagian beban yang tidak baik antar dua transformator yang bekerja paralel, yang akan menyebabkan pemanasan lebih karena adanya arus sirkulasi.

### 2.2.1.5.2 Gangguan di luar Transformator

Gangguan diluar transformator sumber gangguannya berasal dari luar pengamanan transformator, tetapi dampaknya dirasakan oleh transformator tersebut, diantaranya :

#### 1. Gangguan hubung singkat pada jaringan.

##### a. Gangguan satu fasa – tanah

Gangguan satu fasa –tanah dapat terjadi, bila salah satu penghantar terkena pohon atau kawat yang terhubung ke tanah. Kalau penghantar tidak tersentuh (terhubung) tanah, maka tidak akan terjadi gangguan.

##### b. Gangguan dua fasa

Gangguan hubung singkat terjadi antara fasa satu dan fasa dua. Impedansi yang terhubung antara fasa disebut impedansi hubung singkat.

c. Gangguan dua fasa – tanah

Gangguan hubung singkat terjadi antara fasa satu dan fasa dua yang terhubung ke tanah.

d. Gangguan tiga fasa

Gangguan tiga fasa dapat terjadi pada jaringan tenaga listrik, karena terhubungnya ketiga fasanya.

2. Beban lebih

Pembebanan lebih yang melampaui kapasitas transformator, sehingga menyebabkan pemanasan berlebihan akibat kenaikan suhu.

Suhu yang tinggi dapat mengakibatkan :

- a. Memperpendek umur transformator
- b. Merusak isolasi dan material belitan

3. Surja Petir

Gangguan yang diakibatkan karena sambaran petir (gelombang surja) yang dapat mengakibatkan tegangan lebih pada trafo, gangguan internal pada trafo dan berkurangnya keandalan trafo.

## **2.2.2 Peralatan Proteksi Pada Transformator**

### **2.2.2.1 Umum**

Dalam melaksanakan pembangkitan, penyaluran dan distribusi tenaga listrik, gangguan tidak dapat dihindari. Gangguan kebanyakan merupakan hubung singkat antar fasa atau antara fasa dengan tanah atau keduanya. Gangguan hubung singkat semacam ini menimbulkan arus yang besar yang dapat merusak peralatan sehingga diperlukan sistem proteksi untuk mengamankan peralatan tersebut. Sistem proteksi yaitu suatu sistem yang terdiri dari peralatan – peralatan yang berfungsi untuk melindungi peralatan dari terjadinya kerusakan apabila terjadi gangguan. Sistem proteksi selain harus mengamankan peralatan instalasi terhadap gangguan juga berfungsi melokalisir gangguan. Ini berarti apabila terjadi gangguan disuatu bagian instalasi, sistem proteksi hanya akan men-trip PMT yang berdekatan dengan gangguan sehingga interupsi pasokan daya dapat dilakukan disekitar tempat terjadinya gangguan saja.



Persyaratan utama sistem proteksi yaitu kepekaan (*sensitivity*), keandalan (*reliability*), selektif (*selectivity*), kecepatan (*speed*).

1. Kepekaan (*sensitivity*), pada prinsipnya sistem proteksi harus cukup peka sehingga dapat mendeteksi gangguan di kawasan pengamanannya, termasuk kawasan pengamanan cadangannya.
2. Keandalan (*reliability*), keandalan adalah istilah kuantitatif. Kebanyakan dinyatakan sebagai kemungkinan terjadinya kegagalan, merupakan ukuran tingkat sistem perlindungan tersebut terhadap fungsi-fungsinya, yaitu dapat dipercaya bekerja sesuai dengan apa yang diinginkan dan dijamin aman yaitu terhindar dari operasi yang tidak diperlukan.
3. Selektif (*selectivity*), kualitas sistem proteksi ditentukan oleh dapat atau tidaknya membedakan antara dua kondisi, yaitu kondisi harus beroperasi, dan kondisi harus tidak beroperasi. Sistem proteksi harus mampu mengenal gangguan dan mentripkan PMT seminimal mungkin. Untuk itu rele - rele yang didalam sistem terletak secara seri, dikoordinasikan dengan mengatur peningkatan waktu (*time grading*) atau peningkatan setting arus (*current grading*), atau gabungan dari keduanya. Untuk itulah rele dibuat dengan bermacam-macam jenis dan karakteristiknya. Dengan pemilihan jenis dan karakteristik rele yang tepat, spesifikasi trafo arus yang benar, serta penentuan setting rele yang terkoordinir dengan baik, selektifitas yang baik dapat diperoleh.
4. Kecepatan (*speed*), untuk memperkecil kerugian/kerusakan akibat gangguan, maka bagian yang terganggu harus dipisahkan secepat mungkin dari bagian sistem lainnya. Waktu total pembebasan sistem dari gangguan adalah waktu sejak munculnya gangguan, sampai bagian yang terganggu benar-benar terpisah dari bagian sistem lainnya.

Tujuan di pasang nya sistem proteksi pada suatu sistem tenaga listrik adalah sebagai berikut :

1. Menghindari atau mengurangi kerusakan peralatan listrik akibat adanya gangguan (kondisi abnormal). Contoh dari kondisi abnormal adalah terjadi hubung singkat pada sistem listrik., tegangan lebih atau tegangan kurang, beban lebih, frekuensi naik turun, dan sebagainya.
2. Mencegah meluasnya daerah gangguan, sehingga daerah yang terganggu menjadi sekecil mungkin. Dalam arti apabila terjadi gangguan di suatu instalasi maka sistem proteksi akan mentrip PMT (pemutus tenaga) yang berdekatan dengan gangguan itu saja.
3. Meningkatkan keandalan dan mutu pelayanan listrik terhadap konsumen.
4. Menyelamatkan manusia terhadap bahaya yang dapat ditimbulkan oleh listrik.

#### 2.2.2.2 Rele Proteksi Pada Transformator Tenaga

Peralatan proteksi dipasang pada transformator bertujuan untuk mencegah terjadinya kerusakan yang lebih besar dan meluas. Peralatan proteksi tersebut terdiri dari rele - rele yang mendeteksi gangguan kemudian mengirimkan perintah trip ke pemutus tenaga (PMT). Rele tersebut terdiri dari :

##### a. Rele Bucholz

Alat yang berfungsi mendeteksi dan mengamankan terhadap gangguan transformator yang menimbulkan gas. Timbulnya gas dapat diakibatkan oleh beberapa hal, diantaranya adalah:

- Hubung singkat antar lilitan pada atau dalam phasa
- Hubung singkat antar phasa
- Hubung singkat antar phasa ke tanah
- Busur api listrik antar laminasi
- Busur api listrik karena kontak yang kurang baik.



Gambar 2.11 Rele Bucholz

b. Rele Tekanan Lebih

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



Gambar 2.12 Rele Tekanan Lebih

c. Rele 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

d. Rele 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.

e. Rele Tangki Tanah

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

f. Rele Hubung Tanah

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

g. Rele 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 rele ini adalah kenaikan temperatur.

### 2.2.3 Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat adalah gangguan yang terjadi karena adanya kesalahan antara bagian-bagian yang bertegangan. Gangguan hubung singkat dapat terjadi akibat adanya isolasi yang tembus atau rusak karena tidak tahan terhadap tegangan lebih, baik yang berasal dari dalam maupun yang berasal dari luar (akibat sambaran petir). Gangguan hubung singkat adalah suatu kondisi pada sistem tenaga dimana penghantar yang berarus terhubung dengan penghantar lain atau dengan tanah. Gangguan hubung singkat yang mungkin terjadi yaitu :

1. Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa
2. Gangguan Hubung Singkat 2 Fasa
3. Gangguan Hubung Singkat 1 Fasa ke Tanah

Semua gangguan hubung singkat tersebut arus gangguan dapat dihitung dengan menggunakan rumus dasar :

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

Dimana :

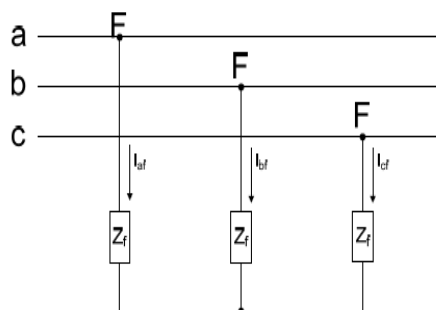
I : Arus yang mengalir pada impedansi Z (Ampere)

V: Tegangan Sumber (Volt)

Z: Impedansi ( $\Omega$ )

#### 2.2.3.1 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa

Apabila terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa, maka akan timbul arus gangguan yang sangat besar. Nilai arus gangguan hubung singkat tiga fasa diperoleh sebesar. Dan dapat digambarkan pada gambar 2.13.



Gambar 2.13 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa

$$I_{f3\phi} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_f}$$

Dimana:

$I_{f3\phi}$  : Arus hubung singkat 3 fasa (ampere)

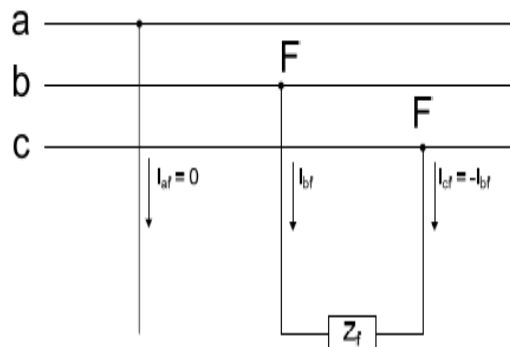
$V_f$  : Tegangan gangguan (volt)

$Z_1$  : Impedansi positif total urutan positif (ohm)

$Z_f$  : Impedansi gangguan (ohm)

### 2.2.3.2 Gangguan Hubung Singkat 2 Fasa

Pada gangguan ini diasumsikan gangguan terjadi pada dua fasa yaitu fasa R dan S yang mengalami gangguan. Gangguan ini dapat di gambarkan pada gambar 2.14.



Gambar 2.14 Gangguan Hubung Singkat 2 Fasa

$$I_{f2\phi} = \pm \frac{j x \sqrt{3} V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (3.3)$$

Dimana:

$I_{f2\phi}$  : Arus hubung singkat fasa ke fasa (ampere)

$V_f$  : Tegangan gangguan (volt)

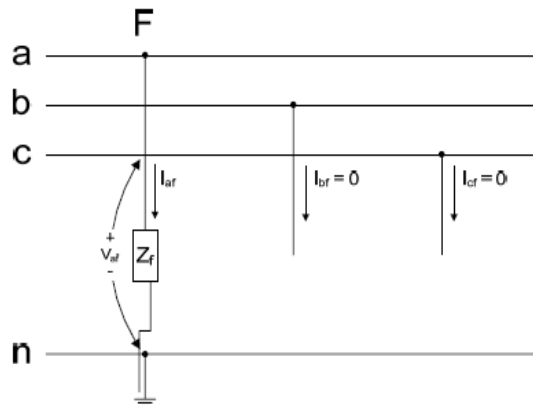
$Z_1$  : Impedansi urutan positif total (ohm)

$Z_2$  : Impedansi urutan negatif total (ohm)

$Z_f$  : Impedansi gangguan (ohm)

### 2.2.3.3 Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Gangguan ini hanya terjadi pada satu fasa yang mengalami gangguan dengan berhubungan langsung dengan tanah. Gangguan ini dapat di gambarkan pada gambar 2.15.



Gambar 2.15 Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa Ke Tanah

$$I_{f-T} = \frac{3 V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_n}$$

Dimana:

$I_{f-T}$  : Arus hubung singkat satu fasa ke tanah (ampere)

$V_f$  : Tegangan gangguan (volt)

$Z_1$  : Impedansi urutan positif total (ohm)

$Z_2$  : Impedansi urutan negatif total (ohm)

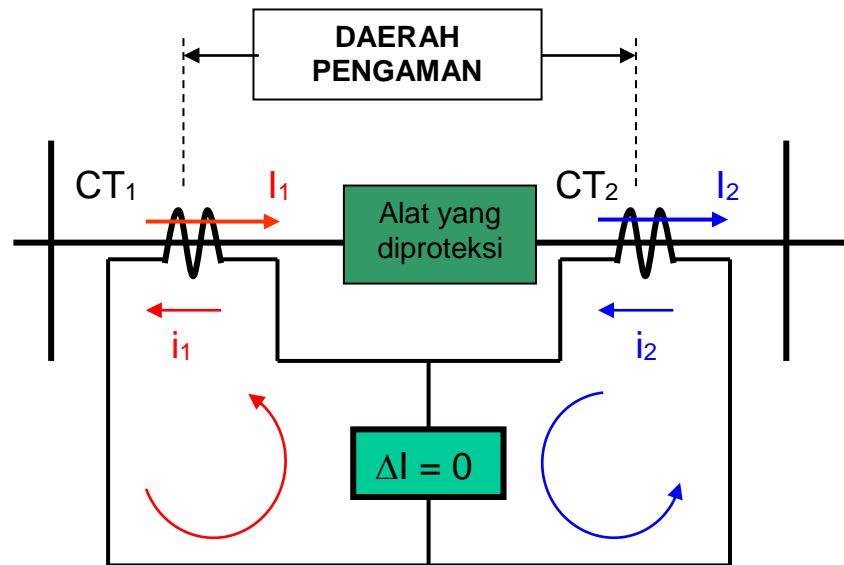
$Z_0$  : Impedansi urutan nol (ohm)

$Z_n$  : Impedansi pentanahan (ohm)

#### 2.2.4 Rele Diferensial

Rele diferensial merupakan suatu rele yang prinsip kerjanya berdasarkan keseimbangan (*balance*), yang membandingkan arus-arus sekunder transformator arus (CT) terpasang pada terminal-terminal peralatan atau instalasi listrik yang diamankan. Penggunaan rele diferensial sebagai rele pengaman, antara lain pada generator, transformator daya, bus bar, dan saluran transmisi. Rele diferensial digunakan sebagai pengaman utama (*main protection*) pada transformator daya yang berguna untuk mengamankan belitan transformator bila terjadi suatu gangguan. Rele ini sangat selektif dan sistem kerjanya sangat cepat.

#### 2.2.4.1 Prinsip Kerja Rele Diferensial



Gambar 2.16 Daerah Kerja Rele Diferensial

Rele dengan kode 87T ini berfungsi melindungi transformator terhadap arus hubung singkat yang timbul akibat gangguan hubung singkat yang terjadi dari dalam (internal) transformator tersebut. Cara kerja rele diferensial 87T dapat di jelaskan melalui gambar 2.16 yaitu sebagai berikut Apabila terjadi gangguan dari dalam transormator, maka timbul selisih antara arus yang masuk ( $i_1$ ) dan arus keluar ( $i_2$ ) dari transformator dan selisih arus inilah yang mengoperasikan rele ini bekerja. Gangguan yang biasa membuat rele ini bekerja antara lain, flashover antara kumparan dengan kumparan, atau kumparan dengan tangki, atau belitan dengan belitan di dalam kumparan ataupun beda kumparan.

Agar rele diferensial dalam kondisi normal atau tidak terjadi gangguan, maka persyaratan adalah sebagai berikut :

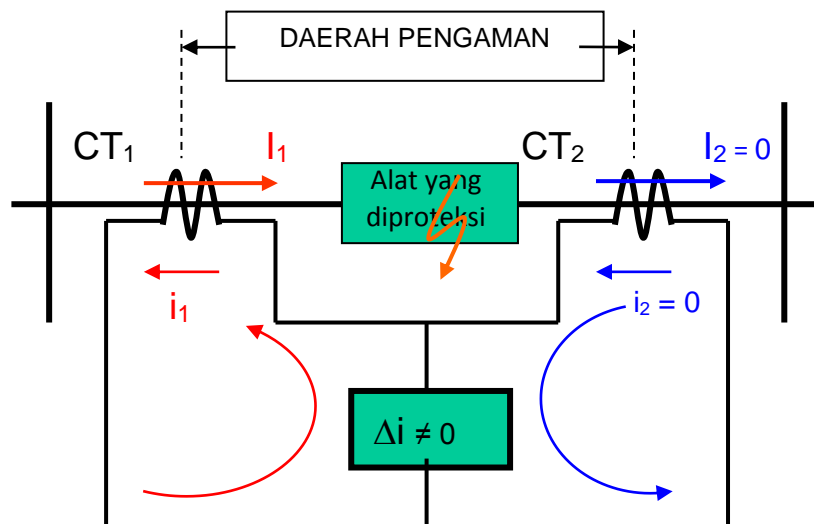
1. CT1 dan CT2 (maupun ACTnya) harus mempunyai ratio sebesar arus  $I_1=I_2$ .
2. Sambungan dan polaritas CT1 dan CT2 maupun ACT nya harus benar.



#### 2.2.4.2 Gangguan Pada Rele Diferensial

##### 1. Gangguan Internal

Jika rele diferensial dipasang sebagai proteksi suatu peralatan dan terjadi gangguan didaerah pengamanannya maka rele diferensial harus bekerja, seperti terlihat pada gambar 2.17, pada saat CT<sub>1</sub> mengalir arus  $I_1$  maka pada CT<sub>2</sub> tidak ada arus yang mengalir ( $I_2 = 0$ ), disebabkan karena arus gangguan mengalir pada titik gangguan sehingga pada CT<sub>2</sub> tidak ada arus yang mengalir, maka disisi sekunder CT<sub>2</sub> tidak ada arus yang mengalir ( $i_2 = 0$ ) yang mengakibatkan  $i_1 \neq i_2$  ( $\Delta i \neq 0$ ) sehingga rele diferensial bekerja .

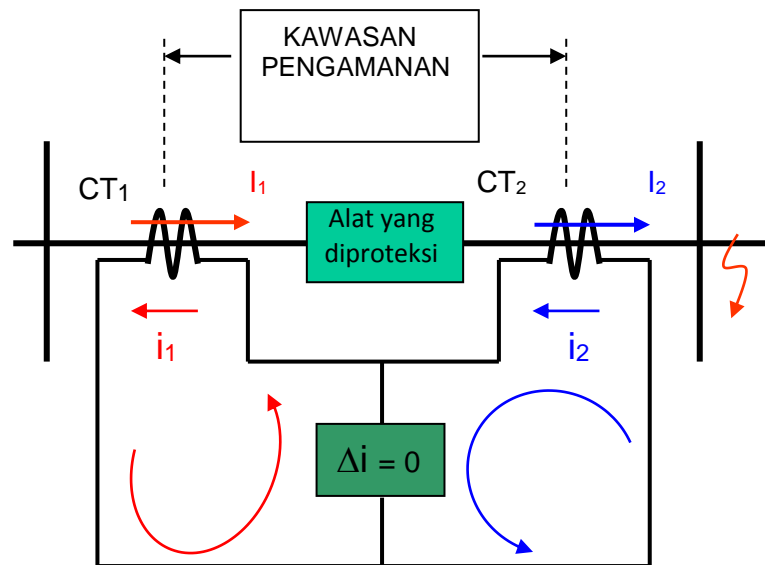


Gambar 2.17 Rele Diferensial jika Terjadi Gangguan didalam Daerah Pengamanan

##### 2. Gangguan Eksternal

Apabila terjadinya gangguan diluar daerah pengamanannya maka rele diferensial tidak bekerja lihat gambar 2.18, pada saat sisi primer kedua CT dialiri arus  $I_1$  dan  $I_2$ , dengan adanya rasio CT<sub>1</sub> dan CT<sub>2</sub> yang sedemikian, maka besar arus yang mengalir pada sekunder CT<sub>1</sub> dan CT<sub>2</sub> yang menuju rele besarnya sama ( $i_1 = i_2$ ) atau dengan kata lain tidak ada selisih arus yang mengalir pada rele sehingga rele tidak bekerja, karena sirkulasi arus gangguan diluar daerah

pengamanan kerja rele diferensial tidak mempengaruhi arus yang mengalir pada kedua CT yang terpasang pada peralatan yang diproteksi, karena apa bila pada arus primer  $CT_1$  dan  $CT_2$  mengalir arus gangguan dengan adanya perbandingan rasio trafo arus pada sisi sekunder juga akan mengalir arus gangguan yang besarnya  $i_1 = i_2$  sehingga rele diferensial tidak bekerja karena tidak ada perbandingan arus ( $\Delta i = 0$ ).



Gambar 2.18 Rele Diferensial jika Terjadi Gangguan diluar Daerah Pengamanannya.

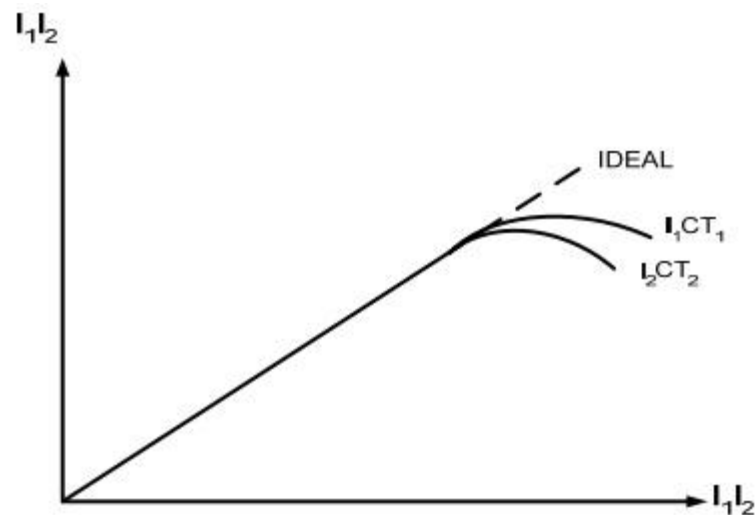
#### 2.2.4.3 Tinjauan Beberapa Masalah Terhadap Rele Diferensial

##### 1. Karakteristik CT

Rele diferensial dalam operasinya bahwa dalam keadaan normal atau terjadi gangguan diluar daerah pengamannya arus pada rele sama dengan nol. Karena itu kemungkinan salah kerja dari rele diferensial dapat terjadi, arus yang dapat menyebabkan rele salah kerja tersebut dinamakan arus ketidakseimbangan. Bila suatu arus yang besar mengalir melalui suatu trafo arus maka arus pada terminal sekunder tidak lagi linear terhadap arus primer. Hal ini disebabkan kejenuhan pada intinya. Pada rele diferensial trafo arusnya harus

identik, namun kejenuhan intinya tidak dapat sama betul. Hal ini disebabkan perbedaan beban dari masing-masing trafo arus tersebut.

Karakteristik trafo arus pada rele diferensial, seperti gambar 2.19 berikut ini



Gambar 2.19 Karakteristik Trafo Arus (CT) pada Rele Diferensial

## 2. Perubahan sadapan berbeban

Pada saat ini umumnya transformator sudah dilengkapi dengan pengubah sadapan berbeban dimana tap input dapat dirubah untuk mendapatkan output yang dikehendaki. Penyetelan dari trafo-trafo arus pada transformator daya telah diset pada tegangan nominal dari transformator daya tersebut. Dengan demikian bila terjadi gangguan pada waktu operasi transformator tersebut, maka tegangan pada sisi primernya harus dirubah agar tegangan pada sisi sekundernya tetap. Oleh karena itu harga-harga tap trafo yang telah diset pada tegangan nominalnya tadi tidak akan tepat lagi. Hal tersebutlah yang menyebabkan terjadinya arus ketidak seimbangan yang dapat membuat rele salah kerja.

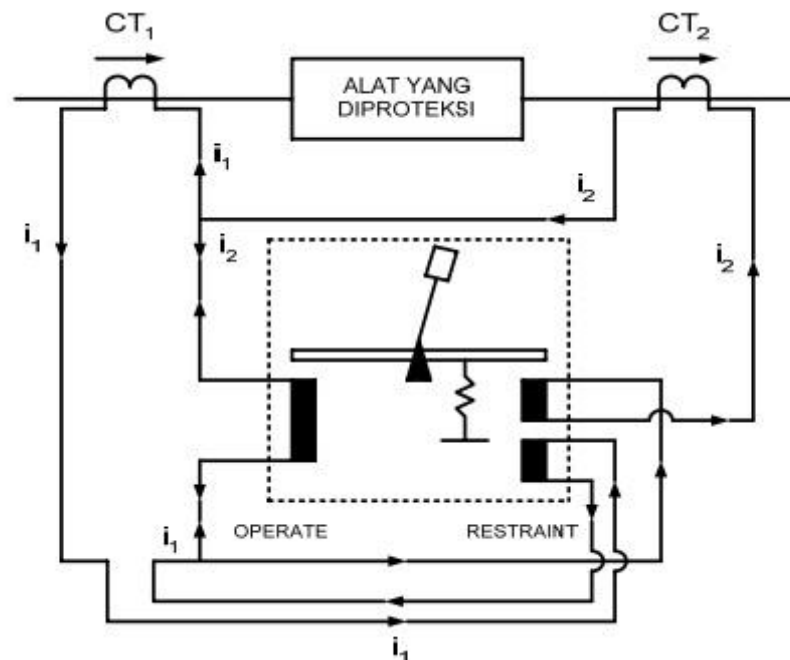
## 3. Adanya Arus Serbu Magnetisasi (Magnetising Inrush Current)

Pada Trafo Jika trafo daya dihubungkan kesuatu sumber tenaga (jaringan) maka pada sisi primernya akan terjadi proses transient yaitu menaiknya arus yang dinamakan arus serbu magnetisasi (Magnetising

Inrush Current) yang besarnya dapat mencapai 8 sampai 30 kali dari arus beban penuh yang terjadi dalam waktu relatif cepat. Peristiwa ini dapat membawa pengaruh terhadap kerja suatu rele kendatipun pada daerah pengamanan tidak terjadi kesalahan.

#### 2.2.4.4 Rele Diferensial Bias

Untuk mengatasi beberapa masalah pada rele diferensial seperti diatas, maka rele diferensial dilengkapi dengan kumparan kerja dan restraining coil (kumparan penahan) atau lebih dikenal dengan Rele Diferensial Persentase (Rele Diferensial Bias). Dengan melakukan pembaharuan rele defferensial yang berdasarkan Prinsip Sirkulasi arusnya adalah untuk mengatasi gangguan yang timbul diluar dari pada perbedaan dalam hal ratio terhadap nilai arus hubung singkat External yang tinggi. Rele diferensial dengan persentase memiliki Coil (belitan) peredam tambahan yang dihubungkan dengan pilot wire seperti gambar 2.20 berikut ini:

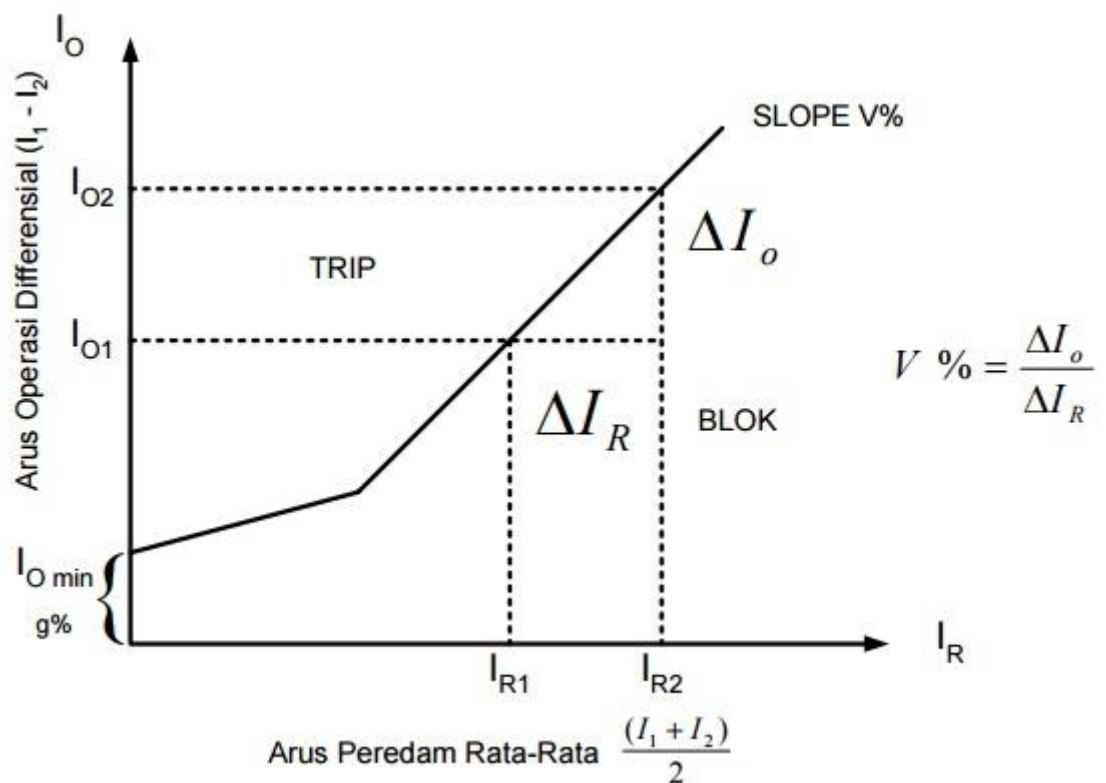


Gambar 2.20 Rele Diferensial Bias

Didalam rele ini kumparan kerjanya dihubungkan dengan titik tengah kumparan penahan (peredam), total jumlah impedansi belitan didalam

kumparan peredam sama dengan jumlah ampere belitan yang ada pada kedua  $\frac{1}{2}$  bagian kumparan yaitu  $\frac{I_1 N}{2} + \frac{I_2 N}{2}$ , yang memberikan rata-rata arus peredam sebesar  $\frac{I_1 + I_2}{2}$ , didalam belitan  $N$ . untuk gangguan luar  $I_1$  dan  $I_2$  semakin besar dan karenanya kopel peredam bertambah besar yang bisa mencegah kesalahan operasi.

Karakteristik operasi dari rele yang demikian diberikan pada gambar 2.21 dibawah ini :



Gambar 2.21 Karakteristik Operasi Rele Diferensial

Ratio arus perendaman rata-rata dari arus operasi diferensial persentasenya bisa ditetapkan, maka rele tersebut dinamakan rele diferensial dengan persentase. Rele tersebut juga disebut rele diferensial bias, sebab rele ini dilengkapi dengan flux tambahan. Persentase rele diferensial bias memiliki karakteristik pick-up yang semakin tinggi. Karena besarnya arus yang lewat semakin bertambah, maka arus peredamannya semakin bertambah.