

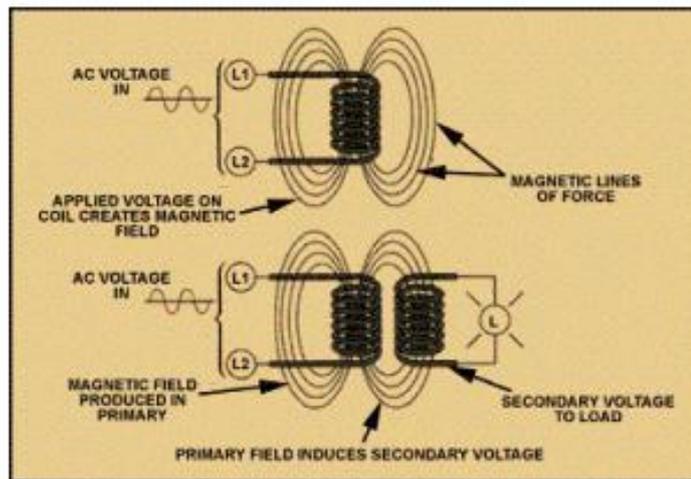
## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Transformator<sup>1</sup>

##### 2.1.1. Pengertian Transformator

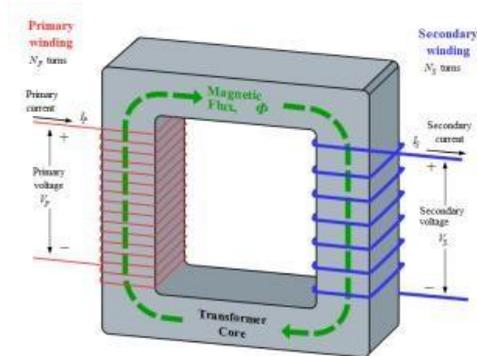
Transformator merupakan Peralatan statis dimana rangkaian magnetik dan belitan yang terdiri dari 2 atau lebih belitan, secara induksi elektromagnetik, mentransformasikan daya (arus dan tegangan) sistem AC ke sistem arus dan tegangan lain pada frekuensi yang sama (IEC 60076-1 tahun 2011). Transformator menggunakan sistem elektromagnetik yaitu hukum ampere dan induksi faraday, dimana perubahan arus atau medan listrik dapat membangkitkan medan magnet dan perubahan medan magnet/fluks medan magnet dapat membangkitkan tegangan induksi.



Gambar 2. 1 Prinsip hukum elektromagnetik

Arus AC yang mengalir pada belitan primer membangkitkan fluks magnet yang mengalir melalui inti besi yang terdapat diantara dua belitan, flux magnet tersebut menginduksikan belitan sekunder sehingga pada ujung belitan sekunder akan terdapat beda potensial/ tegangan induksi (Gambar 2-1).

<sup>1</sup> Kelompok Kerja PT PLN (Persero), *Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga* (Jakarta Selatan : PT PLN (PERSERO),2014), Hal 1-12



Gambar 2. 2 Elektromagnetik pada transformator

### 2.1.2. Jenis Transformator

Berdasarkan fungsinya trafo tenaga dapat dibedakan menjadi :

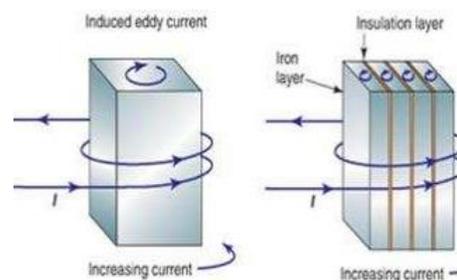
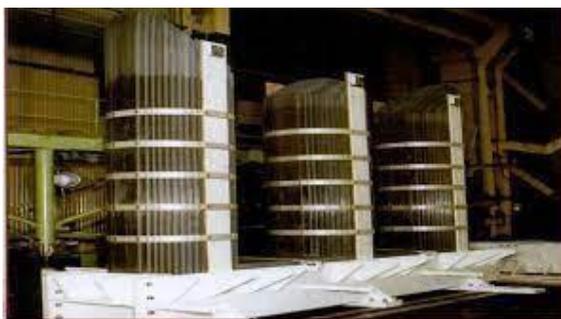
1. Transformator pembangkit.
2. Transformator gardu induk/ penyaluran.
3. Transformator distribusi.

### 2.1.3. Bagian-Bagian Transformator

Transformator memiliki beberapa komponen beberapa bagian pada umumnya diantaranya :

1. Inti Besi

Inti besi digunakan sebagai media mengalirnya flux yang timbul akibat induksi arus bolak balik pada kumparan yang mengelilingi inti besi sehingga dapat menginduksi kembali ke kumparan yang lain. Dibentuk dari lempengan – lempengan besi tipis berisolasi dengan maksud untuk mengurangi *eddy current* yang merupakan arus sirkulasi pada inti besi hasil induksi medan magnet, dimana arus tersebut akan mengakibatkan rugi- rugi (*losses*).

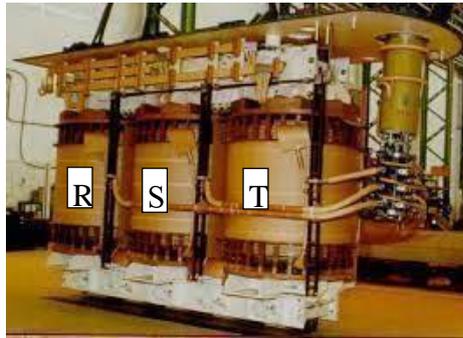


Gambar 2. 3 Inti besi



## 2. *Current Carrying Circuit (Winding)*

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. 4 Kumparan transformator

## 3. *Bushing*

*Bushing* yaitu 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. 5 Bushing

## 4. Pendingin

Suhu pada transformator yang sedang beroperasi akan dipengaruhi oleh kualitas tegangan jaringan, rugi – rugi pada transformator 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 padasirip – sirip radiator. Adapun proses pendinginan ini dapat dibantu oleh adanya kipas dan pompa sirkulasi guna meningkatkan efisiensi pendinginan.



Gambar 2. 6 Pendingin transformator

Pendingin pada transformator di PLTU 3×10 MW Tanjung Enim menggunakan sistem pendingin ONAN (*Oil Natural Air Natural*). Pada tipe ini udara dan *oil* akan bersirkulasi dengan alami. Perputaran *oil* akan dipengaruhi oleh suhu dari *oil* tersebut. Metode ini banyak digunakan oleh transformator dengan kapasitas daya sampai dengan 30 MVA. Transformator dipasangi radiator tipe sirip untuk sirkulasi minyak secara alami/*natural*.

**Tabel 2. 1** Macam-macam pendingin pada transformator

No	Macam Sistem Pendingin	Media			
		Dalam Trafo		Diluar Trafo	
		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			



## 5. Tangki konsevector

Saat terjadi kenaikan suhu operasi pada trafo, 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 trafo mengalami kenaikan suhu.



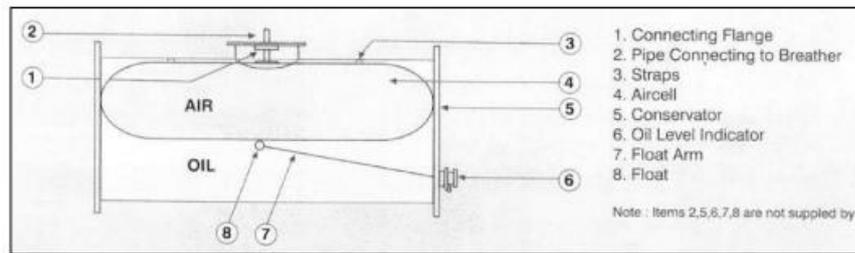
Gambar 2. 7 Tangki konsevector

Seiring dengan naik turunnya volume minyak di konservator akibat pemuaian dan penyusutan minyak, volume udara di dalam konservator pun akan bertambah dan berkurang. Penambahan atau pembuangan udara di dalam konservator akan berhubungan dengan udara luar. Agar minyak isolasi trafo tidak terkontaminasi oleh kelembaban dan oksigen dari luar (untuk tipe konservator tanpa *rubber bag*), maka udara yang akan masuk ke dalam konservator akan difilter melalui silicagel sehingga kandungan uap air dapat diminimalkan.



Gambar 2. 8 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 di dalam tangki konservator.



Gambar 2. 9 Konstruksi konsevator dengan rubber bag

Silica gel sendiri memiliki batasan kemampuan untuk menyerap kandungan uap air sehingga pada periode tertentu silicagel tersebut harus dipanaskan bahkan perlu dilakukan penggantian. *Dehydrating Breather* merupakan teknologi yang berfungsi untuk mempermudah pemeliharaan silica gel, dimana terdapat pemanasan otomatis ketika silicagel mencapai kejenuhan tertentu.

Gambar 2. 10 *Dehydrating Breather*

#### 6. Minyak transformator

Minyak isolasi pada trafo 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. 11 Minyak transformator



## 7. Tap charger



Gambar 2. 12 Tap charger

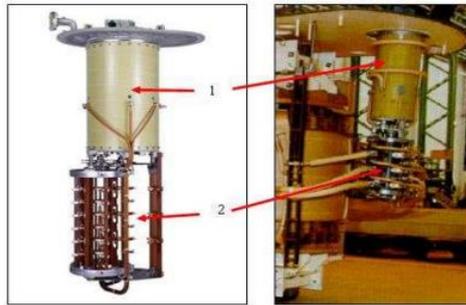
Kestabilan tegangan dalam suatu jaringan merupakan salah satu hal yang dinilai sebagai kualitas tegangan. Trafo dituntut memiliki nilai tegangan output yang stabil sedangkan besarnya tegangan input tidak selalu sama. Dengan mengubah banyaknya belitan sehingga dapat merubah ratio antara belitan primer 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 Circuit tap changer/ De Energize Tap Charger*).

Tap changer terdiri dari:

1. *Selector Switch*
2. *Diverter Switch*
3. 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.



Gambar 2. 13 OLTC pada transformator

Keterangan:

1. Kompartemen Diverter Switch
2. Selektor Switch

#### 2.1.4. Prinsip Kerja Transformator<sup>2</sup>

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 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.

<sup>2</sup> Lilikwatil, Yakob. Mesin-mesin listrik untuk program D3, Deepublish, Yogyakarta, Maret 2014, Hlm 198-199



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 transformator).

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

### 2.1.5. Gangguan pada Transformator<sup>4</sup>

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

#### 2.1.5.1. Gangguan Internal

Gangguan internal adalah gangguan yang terjadi di daerah proteksi trafo, baik didalam trafo maupun diluar trafo sebatas lokasi CT.

Penyebab gangguan internal biasanya akibat:

1. Kegagalan isolasi pada belitan, lempengan inti atau baut pengikat inti penurunan nilai isolasi minyak yang dapat disebabkan oleh kualitas minyak buruk, tercemar uap air dan adanya dekomposisi karena overheating, oksidasi akibat sambungan listrik yang buruk;
2. Kebocoran minyak;
3. Ketidaktahanan terhadap arus gangguan (electrical dan mechanical stresses);
4. Gangguan pada tap charger;

<sup>4</sup> PT. PLN (PERSERO) PUSDIKLAT. *Dasar – Dasar Sistem Proteksi Tegangan Tinggi* (Jakarta:2009 PT PLN (Persero)), Hal 1-3



5. Gangguan pada sistem pendingin;

6. Gangguan pada bushing.

Gangguan internal dapat dikelompokkan menjadi 2 (dua) kelompok, yaitu:

1. *Incipient Faults*

Adalah gangguan terbentuk lambat, dan akan berkembang menjadi gangguan besar jika tidak terdeteksi dan tidak diatasi. Yang termasuk kedalam gangguan *incipient fault*, yaitu: *overheating*, *overfluxing*, dan *overpressure*.

a. Penyebab *overheating*

1. Ketidaktepatan sambungan baik elektrik maupun magnetik;
2. Kebocoran minyak;
3. Aliran sistem pendingin tersumbat;
4. Kegagalan kipas atau pompa sistem pendingin.

b. Penyebab *overfluxing*

Terjadi saat *overvoltage* dan under frekuensi, dapat menyebabkan bertambahnya rugi-rugi besi sehingga terjadi pemanasan yang dapat menyebabkan kerusakan isolasi lempengan inti dan bahkan isolasi belitan.

c. Penyebab *overpressure*

1. Pelepasan gas akibat *overheating*;
2. Hubung singkat belitan – belitan sefasa;
3. Pelepasan gas akibat proses kimia.

2. *Active fault*

Disebabkan oleh kegagalan isolasi atau komponen lainnya yang terjadi secara cepat dan biasanya dapat menyebabkan kerusakan yang parah.

Penyebab dari gangguan *active fault* sebagai berikut:

- a. Hubung singkat fasa – fasa atau fasa dengan ground;
- b. Hubung singkat antara lilitan sefasa (*intern turn*);
- c. *Core fault*;
- d. *Tank faults*;
- e. *Bushing flashovers*.



### 2.1.5.2. Gangguan Eksternal

Gangguan eksternal yaitu gangguan yang terjadi diluar daerah proteksi trafo. Umumnya gangguan ini terjadi pada jaringan yang akan dirasakan dan berdampak terhadap ketahanan kumparan primer maupun sekunder/tersier trafo. Fenomena gangguan eksternal seperti:

1. Hubung singkat pada jaringan sekunder atau tersier (penyulang) yang mmenimbullkan *through fault current*. Frekuensi dan besaran arus gangguan diprediksi akan mengurangi umur operasi trafo;
2. Pembebanan lebih (*overload*);
3. *Overvoltage* akibat surja hubung atau surja petir;
4. *Under* atau *over* frekuensi akibat gangguan sistem;
5. *External system short circuit*.

### 2.1.6. Dasar - Dasar Sistem Proteksi

Sistem proteksi pada sistem tenaga listrik adalah sistem pengamanan pada peralatan – peralatan listrik yang terpasang pada sistem tenaga listrik, seperti generator, transformator, jaringan transmisi/distribusi dan lain – lain. Sistem ini akan mengamankan peralatan – peralatan terhadap kondisi operasi abnormal<sup>6</sup>

Suatu sistem proteksi harus memiliki kriteria operasi yang handal, selektif dan sederhana agar dapat mencegah gangguan dengan cepat, tepat dan benar. Komponen- komponen utama pada sistem proteksi yaitu pemutus tenaga atau *circuit breaker* (CB), peralatan ukur yang terdiri dari transformator arus (CT) dan atau transformator tegangan (PT) dan relay untuk memonitor besaran gangguan.

#### 1. Pemutus Tenaga atau Circuit Breaker (CB)

Komponen yang berfungsi untuk memutuskan atau menghubungkan rangkaian sistem tenaga listrik sesuai dengan kapasitas pemutusannya. Syarat- syarat yang harus dipenuhi oleh pemutus tenaga dalam sistem tenaga listrik yaitu:

- a. Mampu menyalurkan arus maksimum sistem tenaga listrik secara kontinyu.

<sup>6</sup> Ahmad Deni Mulyadi, Ali Mashar, and Prio Wijaksono, "Perancangan Sistem Proteksi Arus Pada Trafo Pemakaian Sendiri Kapasitas 54 MVA Untuk Sistem PLTU," *Jurnal Teknik Energi* 6, no. 1 (February 18, 2020): hal 432



- 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.
  2. Transformator Ukur
 

Tranformator ukur merupakan suatu peralatan yang dapat merubah suatu besaran listrik ke besaran yang sama dengan harga yang berbeda. Memiliki belitan primer yang dihubungkan ke jaringan sistem tenaga listrik dan belitan sekunder yang dihubungkan ke peralatan ukur dan peralatan pengaman. Oleh karena pada sistem tenaga listrik memiliki besaran dengan nilai yang cukup besar maka transformator ukur berfungsi menurunkan nilai besaran.

    - a. Transformator Arus (*Current Transformer/CT*)
 

Transformator arus memiliki fungsi mengkonversi arus pada sistem tenaga listrik dari arus besaran primer menjadi besaran sekunder yang dihubungkan ke peralatan ukur atau relay pengaman. Standarisasi besaran arus sekunder dengan nominal 1A dan 5A.
    - b. Tranformator Tegangan (*Potensial Transformer/PT*)
 

Transformator tegangan berfungsi mentransformasikan besaran tegangan yang tinggi atau tegangan primer menjadi tegangan yang rendah atau tegangan sekunder yang dihubungkan ke peralatan ukur atau relay pengaman. Penerapan tegangan sekunder pada trafo tegangan dengan nilai nominal  $100/\sqrt{3}$  V dan  $110/\sqrt{3}$  V.
3. Relay Proteksi
 

Relay proteksi adalah susunan peralatan pengaman yang dapat merasakan, mendeteksi atau melihat adanya gangguan, yang kemudian secara otomatis memberikan respon berupa sinyal untuk menggerakkan sistem mekanis pemutus tenaga agar dapat memisahkan bagian yang terganggu.



Relay proteksi mempunyai peranan sebagai berikut :

- a. Memberi tanda atau melepas pemutus tenaga (circuit breaker) dengan tujuan mengisolir gangguan atau kondisi yang tidak normal seperti
- b. Melepas/mentrip peralatan yang berfungsi tidak normal secara cepat untuk mencegah timbulnya kerusakan atau mengurangi kerusakan yang lebih berat.
- c. Melokalisir kemungkinan dampak akibat gangguan dengan memisahkan peralatan yang terganggu dari sistem.
- d. Melepas peralatan/bagian yang terganggu secara cepat dengan maksud menjaga stabilitas sistem, kontinuitas pelayanan dan untuk kerja sistem.

Tujuan Relay proteksi :

- 1) Mencegah kerusakan peralatan-peralatan pada sistem tenaga listrik akibat terjadinya gangguan atau kondisi operasi sistem yang tidak normal.
- 2) Mengurangi kerusakan peralatan pada sistem tenaga listrik akibat terjadinya gangguan.
- 3) Mempersempit daerah yang terganggu sehingga gangguan tidak melebar pada sistem yang lebih luas.
- 4) Memberikan pelayanan tenaga listrik dengan kehandalan dan mutu tinggi pada konsumen.
- 5) Mengamankan manusia dari bahaya yang ditimbulkan oleh tenaga listrik.

Fungsi Relay proteksi sebagai berikut:

- 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 diatas maka Relay pengaman harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :



1. Dapat diandalkan (*reliable*)
2. Selektif
3. Waktu kerja Relay cepat
4. Peka (*sensitif*)
5. Ekonomis dan sederhana.

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

Hal yang menimbulkan kegagalan pengaman dapat dikelompokkan sebagai berikut :

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

Karena adanya kemungkinan kegagalan pada sistem pengaman maka harus dapat diatasi yaitu dengan penggunaan pengaman cadangan (*Back up Protection*).

Dengan demikian pengamanan menurut fungsinya dapat dikelompokkan menjadi :

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



### 2.1.7. Klasifikasi Relay Proteksi

Relay-relay yang akan digunakan dalam sistem tenaga listrik dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

- a. Berdasarkan prinsip kerjanya
  1. Relay *Temperature (Thermal Relay)*  
Relay jenis ini bekerja karena pengaruh panas arus listrik yaitu mendeteksi arus dengan pertambahan temperature yang ditimbulkan arus yang melewatinya. Relay ini dapat juga bekerja karena ketidak seimbangan arus yang menyebabkan kenaikan temperatur akibat komponen urutan negatif. Relay jenis ini sering dipakai untuk proteksi terhadap keadaan arus lebih yaitu dengan mendeteksi panas yang terjadi akibat arus lebih tersebut.
  2. Relay Elektromagnetik (*Elektromagnetic Relay*)  
Jenis relay ini dapat menggunakan sumber arus bolak-balik atau sumber arus searah sebagai tenaga penggerak relay.
  3. Relay Statis (*Static Relay*)  
Relay jenis statis adalah relay yang bekerja dengan menggunakan komponen-komponen statis, seperti transistor, diode dan lain-lain guna mendapatkan karakteristik yang diinginkan.
- b. Berdasarkan besaran ukur dan fungsinya
  1. Relay-relay akan bekerja bila besaran ukurnya turun sampai harga tertentu. Relay jenis ini misalnya relay tegangan kurang (*under voltage relay*) dan relay frekuensi kurang (*under frekuensi relay*).
  2. Relay - relay akan bekerja bila besaran ukurnya melebihi suatu harga tertentu, misalnya : relay arus lebih (*over current relay*) dan relay tegangan lebih (*over voltage relay*).
  3. Relay daya adalah jenis relay besaran (*directional relay*) yang akan bekerja bila arah daya mengalir kesuatu arah tertentu yang tidak dikehendaki.
  4. Relay diferensial yaitu relay yang akan bekerja berdasarkan perbedaan tegangan, arus atau fasa antar dua tempat atau lebih.
  5. Relay jarak yaitu relay yang bekerja berdasarkan pada perbandingan harga tegangan dan arus. Jadi dapat dikatakan bahwa besaran yang dideteksi

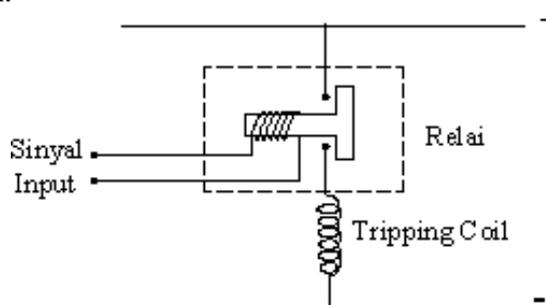


adalah impedansi.

### 2.1.8. Prinsip Kerja Relay Proteksi

Relay dapat bekerja apabila mendapatkan sinyal-sinyal input yang melebihi dari setting relay tersebut. Besaran ukur yang dipakai untuk sinyal input yaitu berupa arus, tegangan, impedansi, daya, arah daya, pemanasan, pembentukan gas, frekuensi, gelombang eksplosi dan sebagainya. Relay dikatakan kerja (operasi), apabila kontak-kontak dari Relay tersebut bergerak membuka dan menutup dari kondisi awalnya.

Apabila relay mendapat satu atau beberapa sinyal input sehingga dicapai suatu harga pick-up tertentu, maka Relay kerja dengan menutup kontak-kontaknya. Maka Relay akan tertutup sehingga tripping coil akan bekerja untuk memutuskan beban.<sup>10</sup>



Gambar 2. 14 Prinsip kerja relay proteksi

Pada keadaan ini sistem tenaga listrik akan terputus karena disebabkan oleh adanya gangguan.

## 2.2. Proteksi Transformator

Proteksi transformator umumnya menggunakan Relay Diferensial dan Relay *Restricted Earth Fault* (REF) sebagai proteksi utama. Sedangkan proteksi cadangan menggunakan relay arus lebih (OCR) Relay gangguan ke tanah *Ground Fault Relay* (GFR). Sedangkan *Standby Earth Fault* (SEF) umumnya hanya dipergunakan pada transformator dengan belitan Y yang ditanahkan dengan resistor, dan fungsinya lebih mengamankan NGR. Umumnya skema proteksi di sesuaikan dengan kebutuhan.

<sup>10</sup> Elvy Sahnur Nasution and Faisal Irsan Pasaribu, "Relay Diferensial Sebagai Proteksi Pada Transformator Daya Pada Gardu Induk," n.d., 8.



Relay pengamanan transformator daya harus dapat mendeteksi adanya sumber gangguan yang berada di dalam maupun di luar transformator yang berada di daerah pengamanannya. Di samping itu adanya gangguan di luar daerah pengamanannya bila relay yang terkait tidak bekerja salah satu relay pada transformator harus bekerja.

### **2.3. Relay Differensial**

Relay differensial adalah salah satu relay pengamanan utama sistem tenaga listrik yang bekerja seketika tanpa koordinasi relay disekitarnya sehingga waktu kerja dapat dibuat secepat mungkin (Bien and Helna, 2007).

Daerah pengamanannya dibatasi oleh pasangan trafo arus dimana relay differensial dipasang sehingga relay differensial tidak dapat dijadikan sebagai pengamanan cadangan untuk daerah berikutnya. Proteksi relay differensial bekerja dengan prinsip keseimbangan arus (*current balance*).

Prinsip relay differensial berdasarkan Hukum Kirchoff, “*Dimana arus yang masuk pada suatu titik, sama dengan arus yang keluar dari titik tersebut*”. Prinsip kerja relay differensial adalah dengan membandingkan atau menjumlahkan nilai arus pada CT di sisi kumparan primer dan CT sisi kumparan sekunder.<sup>7</sup>

Jika hasil penjumlahan arus dari kedua CT tersebut melebihi nilai setelan yang telah ditentukan, maka relay akan trip dan mengirim perintah kepada CB sisi kumparan primer dan CB sisi kumparan sekunder untuk membebaskan transformator tenaga dari tegangan. Sebagai proteksi utama relay ini bekerja dengan waktu seketika (*instantaneous*) atau bekerja dengan kecepatan dibawah 100 ms atau periodewaktu nol (ketika pengaturan penundaan waktu < 0.05 detik) maka penundaan waktunya tidak lebih besar dari 50 ms. Selektifitas relay harus terbukti, relay harus trip jika terjadi gangguan di daerah pengamanannya. Relay tidak boleh trip ketika terjadi gangguan di luar daerah pengamanannya.

---

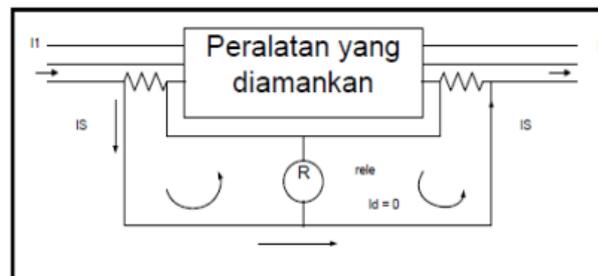
<sup>[7]</sup> Bien,L.E.,& Helna,D. *Jurnal Studi Penyetelan Relay Diferensial Pada Transformator PT CHEVRON PACIFIC INDONESIA*. Relay Diferensial,2007. Hal 42-43



Jenis-jenis relay differensial antara lain:<sup>5</sup>

### 1. Relay Arus Differensial

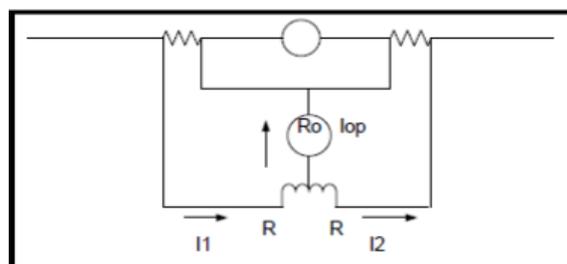
Relay arus differensial menggunakan besaran-besaran arus yang masuk dan yang keluar dari peralatan yang diamankan untuk dibandingkan di dalam sirkit differensial. Setiap perbedaan arus digunakan untuk menggerakkan relay tersebut dengan demikian masing-masing fasa dibandingkan.



Gambar 2. 15 Relay arus differensial

### 2. Relay *Persentase* Differensial

Relay presentase differensial mempunyai ciri kerja yang hampir sama dengan relay arus diferensial, hanya saja rangkaian differensialnya melalui kumparan penahan (*restraining coil*). Arus differensial yang diperlukan untuk mengerjakan relay mempunyai besaran yang bervariasi, dengan perkataan lain dimungkinkan adanya setting Relay. Arus differensial yang mengalir masuk ke relay 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*).



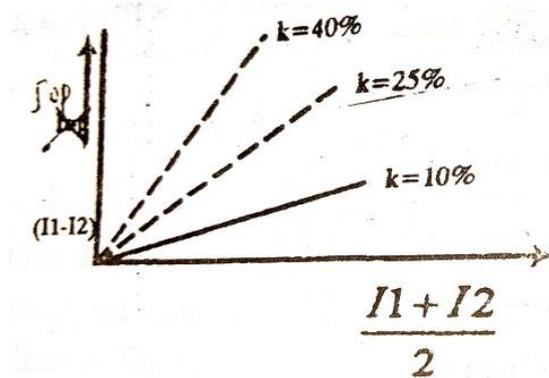
Gambar 2. 16 Relay persentase differensial

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

<sup>5</sup> Samaulah, Hazairin. *Dasar – Dasar Sistem Proteksi Tenaga Listrik*. 2004. (Hal 37- 40)



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



Gambar 2. 17 Karakteristik relay persentase differensial

### 2.3.1. Fungsi Relay Differensial

Pengaman relay 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. Relay differensial arus membandingkan arus yang melalui daerah pengamanan.
3. Relay ini harus bekerja kalau terjadi gangguan di daerah pengamanan, dan tidak boleh bekerja dalam keadaan normal atau gangguan di luar daerah pengamanan.
4. Relay ini merupakan unit pengamanan dan mempunyai selektifitas mutlak.

### 2.3.2. Sifat Pengaman Relay Differensial

Adapun sifat pengaman pada relay differensial yaitu sebagai berikut :

1. Sangat selektif dan cepat tidak perlu dikoordinasi dengan relay lain.
2. Sebagai relay pengaman utama.
3. Daerah pengamanannya dibatasi oleh pasangan trafo arus, dimana relay differensial dipasang. penggunaan relay diferensial untuk pengaman generator, trafo daya, saluran transmisi yang pendek dan motor-motor yang kapasitasnya besar.



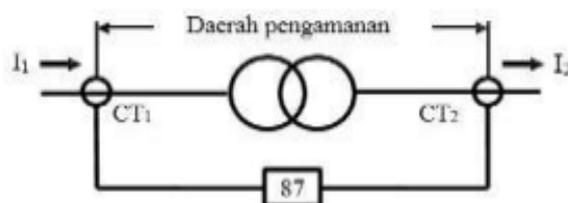
### 2.3.3. Persyaratan Pada Relay Differensial

Relay diferensial sendiri mempunyai beberapa syarat yang harus dipenuhi sebagai pengaman (Yuniarto, 2015) diantaranya :

1. Trafo arus yang digunakan oleh relay diferensial ini harus memiliki rasio perbandingan  $CT_1$  dan  $CT_2$  sama, contohnya 200:5 dan 1500:5, sehingga  $I_p = I_s$ , serta sambungan dan polaritas  $CT_1$  dan  $CT_2$  sama.
2. Adanya pergeseran fasa akibat hubungan trafo tenaga yang terhubung delta ( $\Delta$ ) - (Y) maka untuk mengembalikan sudut phasa arus yang tergeser tersebut, hubungan trafo arus di buat berbeda dan sudut pada CT di sisi primer dan CT di sisi sekunder trafo berbeda  $180^\circ$  .
3. Karakteristik kejenuhan  $CT_1$  dan  $CT_2$  harus sama.<sup>7</sup>

### 2.3.4. Prinsip Kerja Relay Differensial

Relay diferensial merupakan suatu relay 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 relay diferensial sebagai relay pengaman, antara lain pada generator, transformator daya, busbar, dan saluran transmisi. Relay diferensial digunakan sebagai pengaman utama (main protection) pada transformator daya yang berguna untuk mengamankan belitan transformator bila terjadi suatu gangguan. Relay ini sangat selektif dan sistem kerjanya sangat cepat



Gambar 2. 18 Daerah pengamanan relay diferensial pada transformator daya

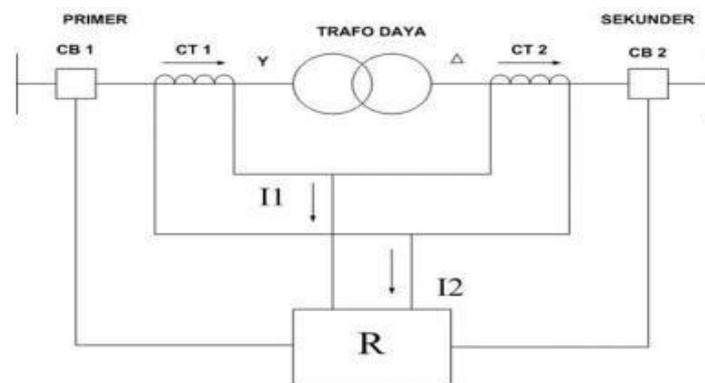
Prinsip kerja relay diferensial adalah membandingkan dua vektor arus atau lebih yang masuk ke relay (lihat Gambar 2.18), apabila pada sisi primer

<sup>7</sup> Ibid Hal 48-49



transformator arus ( $CT_1$ ) dialiri arus  $I_1$ , maka pada sisi sekunder transformator arus ( $CT_2$ ) akan dialiri arus  $I_2$ , pada saat yang sama sisi sekunder kedua transformator arus, akan mengalir arus  $I_1$  dan  $I_2$  yang besarnya tergantung dari rasio yang terpasang, jika besarnya  $I_1 = I_2$  maka relay tidak bekerja, karena tidak ada selisih arus, tetapi jika besarnya arus  $I_1 \neq I_2$  maka relay akan bekerja, karena adanya selisih dan gangguan didalam daerah proteksi.<sup>10</sup>

1. Relay differensial pada keadaan normal.



Gambar 2. 19 Relay differensial dalam keadaan normal

Dalam keadaan normal, arus mengalir melalui peralatan/inslatasi listrik yang diproteksi yaitu transformator daya, dan arus-arus tranformator arus, yaitu  $I_1$  dan  $I_2$ , Jika relay differensial dipasang antara terminal 1 dan terminal 2, maka dalam kondisi normal tidak akan ada arus yang mengalir melaluinya. Maka dapat didefinisikan dengan persamaan 2.4 :

$$I_R = I_1 - I_2 = 0 \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana :

$CB_1$  : circuit breaker pada sisi primer

$CT_1$  : current transformator pada sisi primer

Y : kumparan trafo hubungan Y (bintang).

$\Delta$  : kumparan trafo hubungan (segitiga)

$CB_2$  : circuit breaker pada sisi primer

$CT_2$  : current transformator pada sisi primer

<sup>10</sup> Ibid Hal 181

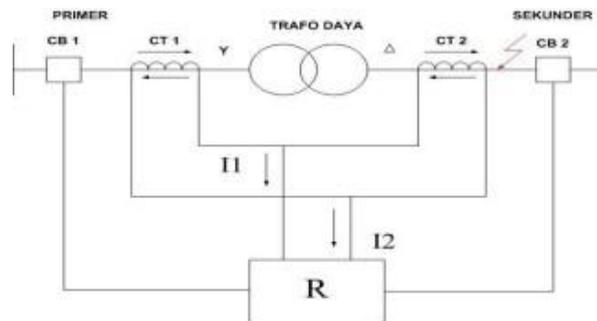


$I_1$  : arus sisi primer

$I_2$  : arus sisi sekunder

R : relay differensial

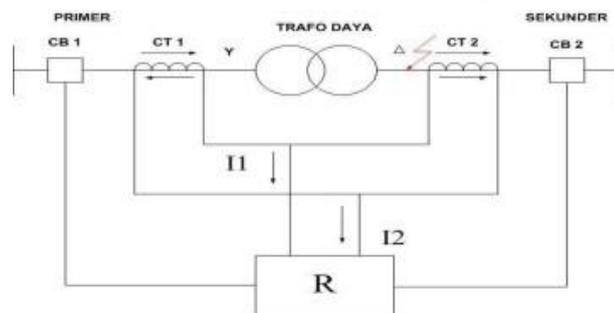
2. Relay differensial pada gangguan di luar daerah proteksi



Gambar 2. 20 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 relay differensial tidak akan bekerja.

3. Relay differensial pada gangguan di dalam daerah proteksi



Gambar 2. 21 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  $I_d$  akan mengalir melalui Relay differensial dari terminal 1 menuju ke terminal 2 maka terjadi selisih arus didalam relay, selanjutnya relay tersebut akan mengoperasikan CB untuk memutuskannya.

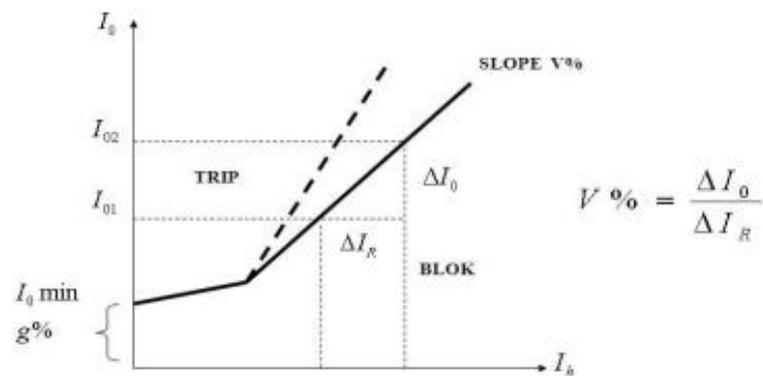
Selama arus-arus sekunder transformator arus sama besar, maka tidak akan ada arus yang mengalir melalui operating coil relay differensial, tetapi setiap



gangguan yang mengakibatkan arus yang mengalir melalui operating coil relay differensial, maka relay differensial akan bekerja dan memberikan komando trapping kepada circuit breaker sehingga transformator daya yang terganggu dapat diisolir dari sistem tenaga listrik.

### 2.3.5. Karakteristik Relay Differensial

Relay differensial merupakan suatu relay yang karakteristik kerjanya berdasarkan keseimbangan (*balance*), yang membandingkan arus-arus sekunder transformator arus (CT) terpasang pada terminal-terminal peralatan atau instalasi listrik yang diamankan.<sup>8</sup>



Gambar 2. 22 Karakteristik relay differensial

### 2.3.6. Pemasangan Relay Differensial

Di dalam pemasangan relay differensial pada transformator daya, sering mengalami kesulitan ketepatan kerja relay, sehingga pada akhirnya Relay akan mengalami salah kerja. Salah kerja pada relay 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 relay differensial ke transformator daya, maka perlu sekali untuk mengetahui persyaratan relay differensial tersebut, yaitu:

- a. Besar arus-arus yang masuk ke relay harus sama.
- b. Fasa-fasa tersebut harus berlawanan.

<sup>8</sup> Fernanda, Muhammad Gusti, "Sistem Proteksi Dengan Menggunakan Relay Differensial Pada Transformator Daya 54 MVA Di PT. PLN (Persero) Sektor Pembangunan Keragaman Palembang," (Palembang: Polsri, 2019) hal.22



### 2.3.7. Perhitungan Teori Setting Relay Differensial

#### 2.3.7.1. Perhitungan Rasio CT<sup>[3]</sup>

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

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

$$I_{rating} = 110\% \times I_{nominal} \dots\dots\dots(2.5)$$

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

$$S = V \times I \dots\dots\dots(2.6)$$

- Arus nominal pada sisi primer

$$I_{N1} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V_p} \dots\dots\dots(2.7)$$

- Arus nominal pada sisi sekunder

$$I_{N2} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V_s} \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana :

$I_{N1}$  = Arus nominal pada sisi primer;

$I_{N2}$  = Arus nominal pada sisi sekunder;

$S$  = Daya pada transformator daya,

$V_p$  = Tegangan pada sisi primer;

$V_s$  = Tegangan pada sisi sekunder.

<sup>[3]</sup> Panjaitan, Bonar. 2012. *Praktik-Praktik Proteksi Sistem Tenaga Listrik*. Jakarta: Erlangga (Hal 331)



### 2.3.7.2. Perhitungan Error Mismatch<sup>9</sup>

*Error mismatch* merupakan kesalahan dalam membaca perbedaan arus dan tegangan di sisi primer dan sekunder transformator serta pergeseran fasa di trafo tersebut.

Menghitung besarnya arus mismatch yaitu dengan cara membandingkan rasio CT ideal dengan CT yang ada di pasaran, dengan ketentuan error tidak boleh melebihi 5% dari rasio CT yang dipilih sesuai dengan standar PLN.

Untuk menghitung besarnya nilai *error mismatch* menggunakan rumus :

$$Error\ Mismatch = \frac{CT\ Ideal}{CT\ Terpasang} \% \dots\dots\dots (2.9)$$

$$\frac{CT_2}{CT_1} = \frac{V_p}{V_s} \dots\dots\dots (2.10)$$

$$CT_1\ (Ideal) = CT_2 \times \frac{V_s}{V_p} \dots\dots\dots (2.11)$$

$$CT_2\ (Ideal) = CT_1 \times \frac{V_p}{V_s} \dots\dots\dots (2.12)$$

Dimana :

$C_T$  (ideal) = Trafo arus (ideal);

$V_p$  = Tegangan dibagian sisi primer;

$V_s$  = Tegangan dibagian sisi sekunder.

### 2.4.7.2. Perhitungan Arus Sekunder CT

Arus sekunder CT merupakan arus yang terbaca oleh transformator arus.

Persamaan yang digunakan untuk mencari arus sekunder CT adalah :

$$I_{sekunder} = \frac{1}{rasio\ CT} \times I_n \dots\dots\dots (2.13)$$

Dimana:

$I_n$  = Arus nominal

<sup>9</sup> Firnanda, M. Adhitya, Ishak Effendi, Dyah Utari Y. W., *Jurnal Perancangan Setting Relay Differential sebagai Proteksi Utama Transformator 500 MVA GITET 500/275 KV Muara Enim PT. PLN (PERSERO) UIP SUMBAGSEL*. Perhitungan Setting Relay Differensial, 2019, Hal. 123-125.



### 2.3.7.3. Perhitungan Arus Diferensial

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

$$I_d = I_2 - I_1 \dots \dots \dots (2.14)$$

Dimana :

$I_d$  = Arus differensial

$I_1$  = Arus sekunder CT<sub>1</sub>

$I_2$  = Arus sekunder CT<sub>2</sub>

### 2.3.7.4. Perhitungan Arus Restrain

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

$$I_r = \frac{I_1 + I_2}{2} \dots \dots \dots (2.15)$$

Dimana :

$I_r$  = Arus restrain

$I_1$  = Arus sekunder CT<sub>1</sub>

$I_2$  = Arus sekunder CT<sub>2</sub>

### 2.3.7.5. Perhitungan Percent Slope

Untuk mengetahui slope didapatkan dari arus differensial dibagi dengan arus restrain. Dari slope 1 dapat diketahui arus differensial dan arus restrain saat kondisi normal dan untuk memastikan Relay dapat bekerja saat ada gangguan internal dengan arus gangguan kecil. Untuk slope 2 dapat berguna agar Relay tidak bekerja saat terjadi gangguan eksternal dengan arus gangguan besar sekalipun. Menentukan slope :

$$Slope 1 = \frac{I_d}{I_r} \times 100\% \dots \dots \dots (2.16)$$



$$Slope2 = \left(\frac{I_d}{I_r} \times 2\right) \times 100\% \dots\dots\dots (2.17)$$

Dimana :

slope1 = setting kecuraman 1

slope2 = setting kecuraman 2

$I_d$  = Arus Diferensial (A)

$I_r$  = Arus Restrain (A)

### 2.3.7.6. Perhitungan Arus Setting

Arus setting merupakan batasan dan 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 :

$$I_{Setting} = \%Slope1 \times I_r \dots\dots\dots (2.18)$$

Dimana :

$I_{Setting}$  = Arus setting pada Relay differensial

slope1 = setting kecuraman 1

$I_r$  = Arus restrain

### 2.3.7.8. 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 :

$$I_{SekunderCT} = \frac{I_f}{CT2} \dots\dots\dots (2.19)$$

$$I_{SekunderACT} = \frac{I_{sekunderCT}}{I_2} \dots\dots\dots (2.20)$$

$$I_d = I_{SekunderACT} - I_1 \dots\dots\dots (2.21)$$

Dimana :

$I_{sekunderCT}$  = Arus gangguan yang dibaca relay (A)

$I_{sekunderACT}$  = Arus sekunder auxiliary current transformer (ACT)



$I_f$  = Arus gangguan (A)

$I_1$  = Arus sekunder CT1 (A)

$I_2$  = Arus sekunder CT2 (A)