

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Listrik memiliki peranan penting dan strategis, keteserediaannya harus memenuhi aspek handal, aman dan akrab dengan lingkungan. Keandalan sistem tenaga listrik ditentukan oleh sistem dan konstruksi instalasi listrik yang memenuhi ketentuan dan persyaratan yang berlaku. Keamanan sistem tenaga listrik ditentukan oleh sistem pengamanan yang baik, benar, andal atau tepat sesuai dengan kebutuhan sistem yang ada. Proteksi sistem tenaga listrik merupakan perlindungan atau pengaman pembangkitan (pembangkit tenaga listrik), penyalur (transmisi), pendistribusian (distribusi) dan instalasi pemanfaatan.

Transformator daya merupakan suatu peralatan yang sangat vital yang berfungsi menyalurkan daya listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya dan tidak pernah lepas dari gangguan. Adanya gangguan yang terjadi pada transformator dapat menghambat proses penyaluran energi listrik ke konsumen. Oleh karena itu, sistem proteksi yang handal sangat dibutuhkan untuk melindungi transformator dari gangguan.

Transformator adalah unsur utama dan merupakan mata rantai terpenting dalam penyaluran dan distribusi tenaga listrik. Seiring dengan semakin meningkatnya permintaan energi listrik maka keperluan akan transformator dengan sendirinya meningkat mengikuti bertambah besarnya daya listrik yang dibangkitkan. Oleh karena itu transformator merupakan unsur utama dari sistem penyaluran dan distribusi listrik dan merupakan peralatan yang paling mahal harganya, maka sistem proteksi atau pengaman terhadap sebuah transformator baik terhadap gangguan-gangguan yang terjadi dari dalam transformator itu sendiri maupun dari luar transformator tersebut sangat perlu diperhatikan.

1.2 Permasalahan Penelitian

1.2.1 Identifikasi Masalah

Hal yang akan diidentifikasi pada skripsi ini yaitu mengenai setting relai REF (*Restricted Earth Fault*) terhadap gangguan arus hubung singkat fasa ke tanah pada transformator tenaga PLTA PB. Soedirman.

1.2.2 Ruang Lingkup Masalah

Ruang lingkup masalah yang ada dalam skripsi ini yaitu khusus membahas pada relai REF (*Restricted Earth Fault*) dan gangguan arus hubung singkat fasa ke tanah.

1.2.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka permasalahan yang akan dibahas dalam skripsi ini yaitu :

1. Bagaimana perhitungan arus hubung singkat antar fasa dan fasa ke tanah pada transformator tenaga PLTA PB. Soedirman?
2. Bagaimana prinsip kerja dan fungsi relai REF (*Restricted Earth Fault*) ?
3. Bagaimana setting relai REF (*Restricted Earth Fault*) pada transformator tenaga PLTA PB. Soedirman?

1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

1.3.1 Tujuan Penelitian

Tujuan penulisan Skripsi ini adalah :

1. Menghitung arus hubung singkat fasa ke tanah pada transformator tenaga PLTA PB. Soedirman.
2. Memahami prinsip kerja dan fungsi dari relai REF (*Restricted Earth Fault*).
3. Melakukan setting relai REF (*Restricted Earth Fault*) pada transformator tenaga PLTA PB. Soedirman.

1.3.2 Manfaat Penelitian

Manfaat penulisan yang hendak dicapai dari penulisan skripsi ini adalah :

1. Secara teoritis penulisan ini bermanfaat agar para pembaca bisa mengetahui lebih dalam tentang relai REF (*Restricted Earth Fault*).
2. Mengetahui cara setting relai REF (*Restricted Earth Fault*).
3. Mengetahui lebih dalam tentang perhitungan arus hubung singkat fasa ke tanah.

1.4 Sistematika Penulisan

Skripsi ini dibagi menjadi lima bab, bab satu membahas mengenai latar belakang, batasan masalah, tujuan penulisan, manfaat penelitian dan sistematika penulisan. Bab dua membahas mengenai proteksi gangguan tanah terbatas yang berhubungan dengan topic tugas akhir yang didasarkan pada studi literatur dengan menguraikan tentang pengertian, bagian-bagian, jenis-jenis gangguan sistem tenaga listrik, dan macam-macam sistem proteksi termasuk *restricted earth fault relay*. Bab tiga membahas tentang metode yang akan digunakan untuk mengolah data yang didapat pada proteksi gangguan tanah terbatas. Bab empat membahas mengenai pengolahan data yang didapat secara pengujian, perhitungan data yang didapat berdasarkan teori dan rumus yang ada, dan analisa hasil antara data pengujian dengan data perhitungan. Bab lima membahas mengenai simpulan dari skripsi ini.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Beberapa penelitian maupun jurnal ilmiah yang telah didaftarkan sebelumnya terkait sistem proteksi pada transformator dapat dijadikan sebagai referensi dalam pengembangan pembahasan pada skripsi ini. Hal ini dilakukan dengan tujuan untuk menentukan batasan-batasan masalah yang akan dibahas pada penelitian ini.

(Ir. Wahyudi Sarimun Nindiyobudoyo, 2016) dengan buku yang berjudul Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik menjelaskan bahwa proteksi pengaman listrik pada sistem tenaga listrik yang terpasang pada; sistem distribusi tenaga listrik, trafo tenaga, transmisi tenaga listrik dan generator listrik dipergunakan untuk mengamankan sistem tenaga listrik dari gangguan listrik atau beban lebih, dengan cara memisahkan bagian sistem tenaga listrik yang terganggu dengan sistem tenaga listrik yang tidak terganggu, sehingga sistem kelistrikan yang tidak terganggu dapat terus bekerja (mengalirkan arus ke beban). Jadi hakekatnya pengamanan arus pada sistem tenaga listrik mengamankan seluruh sistem tenaga listrik, supaya keandalan tetap terjaga.

Gangguan adalah suatu ketidaknormalan (*interferes*) dalam sistem tenaga listrik yang mengakibatkan mengalirnya arus yang tidak seimbang dalam sistem tiga fasa. Gangguan dapat juga didefinisikan sebagai semua kecacatan yang mengganggu aliran normal arus ke beban (Adnal Mardensyah, 2008). Tujuan dilakukan analisa gangguan adalah :

- a. Penyelidikan terhadap unjuk kerja relai proteksi untuk mengetahui kapasitas rating maksimum dari pemutus tenaga. Untuk mengetahui distribusi arus gangguan dan tingkat tegangan sistem pada saat terjadinya gangguan. Berikut adalah klasifikasi gangguan :

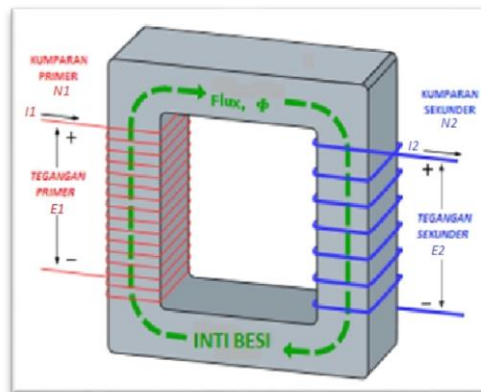
1. Berdasarkan kesimetrisannya gangguan asimetris merupakan gangguan yang mengakibatkan tegangan dan arus yang mengalir pada setiap fasanya menjadi tidak seimbang, gangguan ini terdiri dari gangguan hubung singkat dua fasa, gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah, gangguan hubung singkat satu fasa, dan gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah.
2. Gangguan Simetris merupakan gangguan yang terjadi pada semua fasanya sehingga arus maupun tegangan setiap fasanya tetap seimbang setelah gangguan terjadi. Gangguan ini terdiri dari gangguan hubung singkat tiga fasa dan gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah.

2.2 Transformator Tenaga

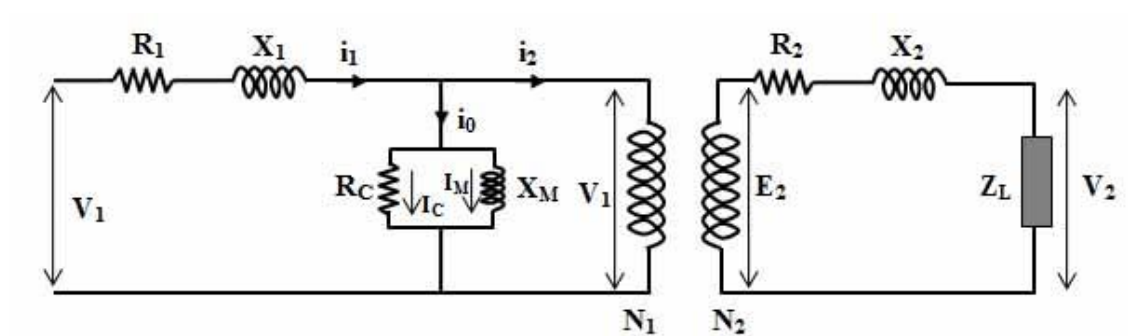
2.2.1 Definisi Dan Prinsip Kerja Transformator Tenaga

Transformator daya merupakan peralatan listrik yang berfungsi untuk menyalurkan daya/tenaga dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya tanpa merubah frekuensi. Transformator menggunakan prinsip hukum induksi faraday 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 fluks magnet dan fluks magnet ini akan menginduksi belitan sekunder sehingga pada ujung belitan sekunder akan terdapat beda potensial.



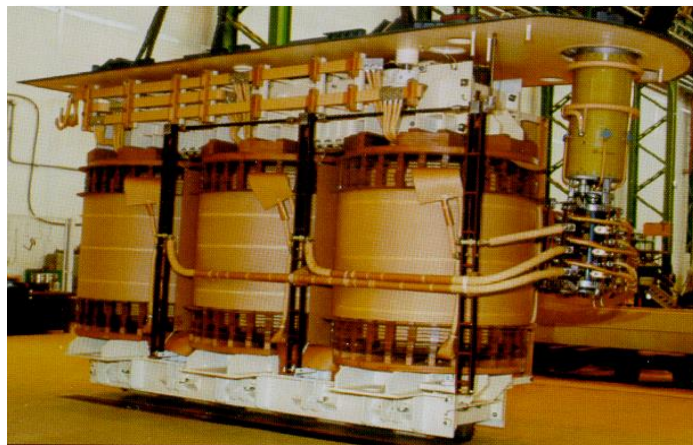
Gambar 2.1 Prinsip kerja transformator



Gambar 2.2 Rangkaian Ekvivalen Transformator

2.2.2 Konstruksi Bagian-Bagian Transformator

1. Belitan

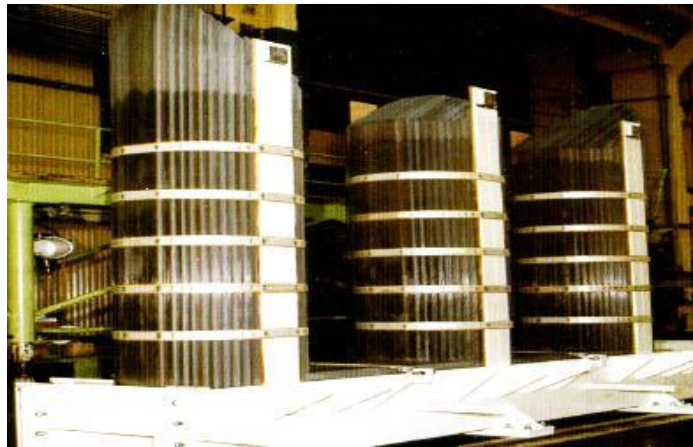


Gambar 2.3. Belitan transformator

Belitan primer merupakan bagian transformator yang terhubung dengan rangkaian sumber energi (catu daya). Belitan sekunder merupakan bagian transformator yang terhubung dengan rangkaian beban. 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 fluks magnetik.

2. Inti Besi

Inti besi digunakan sebagai media jalannya fluks 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 yang di susun sedemikian rupa untuk mengurangi panas (rugi – rugi besi) yang ditimbulkan oleh Eddy Current.



Gambar 2.4 Inti besi transformator daya

3. Minyak Transformator

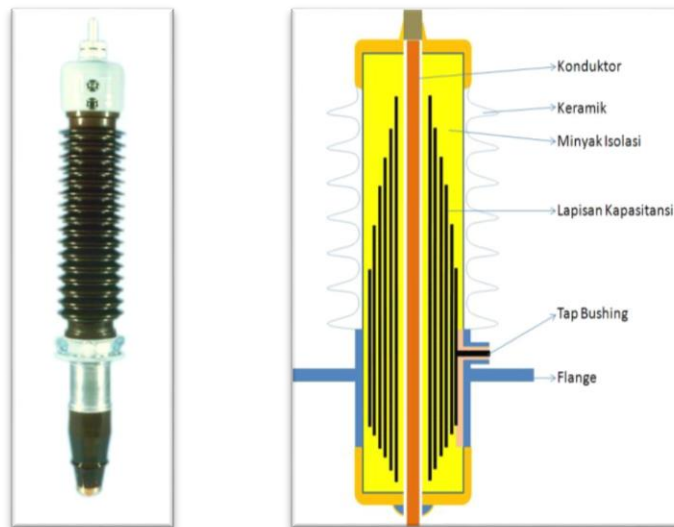
Minyak transformator berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi. Minyak transformator mempunyai sifat media pemindah panas (disirkulasi) dan mempunyai daya tegangan tembus tinggi. Pada *power transformer*, terutama yang berkapasitas besar, kumparan-

kumparan dan inti besi transformator direndam dalam minyak transformator. Syarat suatu cairan bisa dijadikan sebagai minyak transformator adalah sebagai berikut:

- a. Mempunyai kekuatan elektrik yang tinggi.
- b. Mempunyai daya hantar panas yang baik.
- c. Mempunyai berat jenis yang rendah. Jika minyak berberat jenis rendah, maka partikel-partikel yang melayang-layang didalam minyak akan segera mengendap pada dasar tangki. Hal ini sangat membantu dalam mempertahankan homogenitas minyak.
- d. Memiliki kekentalan yang rendah. Minyak yang encer lebih mudah dialirkan atau bersirkulasi, sehingga mendinginkan transformator lebih baik.
- e. Memiliki titik tuang rendah. Minyak dengan titik tuang yang rendah akan berhenti mengalir pada suhu yang rendah.
- f. Mempunyai titik nyala yang tinggi. Karakteristik titik nyala menentukan terjadinya penguapan dalam minyak. Jika titik nyala minyak rendah, maka minyak mudah menguap. Ketika minyak mengap, volumenya berkurang, minyak semakin kental dan campuran dengan udara di atas permukaan minyak membentuk bahan yang dapat meledak.
- g. Tidak merusak material isolasi dan material lain transformator.
- h. Unsur kimianya harus stabil agar usia pelayanannya panjang.

4. 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 transformer*.



Gambar 2.5 Bushing dan Bagian Bushing

5. Tangki dan Konservator

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 2.6 Konservator

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.

2.2.3 Peralatan Bantu Transformator

Transformator juga memiliki beberapa peralatan bantu yang terdiri dari pendingin, tap changer dan peralatan proteksi.

1. Pendingin

Suhu pada trafo yang sedang beroperasi akan dipengaruhi oleh kualitas tegangan jaringan, rugi-rugi pada trafo itu sendiri dan suhu lingkungan. Suhu operasi yang tinggi akan mengakibatkan rusaknya isolasi kertas pada trafo. Oleh karena itu pendinginan yang efektif sangat diperlukan. Minyak isolasi trafo 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. Macam – macam sistem pendingin transformator berdasarkan media dan cara pengalirannya dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

1. A.N (*Air Natural*) : Sistem pendinginan transformator menggunakan udara sekitar. Metode ini biasanya dipakai untuk transformator tipe kering dengan kapasitas daya sampai 1.5 MVA.
2. A.F (*Air Forced*) : Sistem pendinginan ini digunakan pada transformator tipekering. Udara ditiupkan paksa ke permukaan tangki untuk menambah laju disipasi panas. Kipas – kipas pendingin dinyalakan saat temperatur pada belitan meningkat di atas batas yang diperbolehkan.
3. O.N.A.N (*Oil Natural Air Natural*) : Metode ini banyak digunakan oleh transformator dengan kapasitas daya s.d 30

MVA. Transformator dipasang radiator tipe sirip untuk sirkulasi minyak secara alami atau natural.

4. O.N.A.F (*Oil Natural Air Forced*) : Metode ini banyak digunakan oleh transformator dengan kapasitas daya antara 30 MVA dan 60MVA. Menggunakan radiator tipe sirip yang dilengkapi dengan kipas pendingin. Kipas – kipas dinyalakan saat pembebanan yang berat saja.
5. O.F.A.F (*Oil Forced Air Forced*) : Metode ini digunakan untuk transformator dengan kapasitas daya di atas 60 MVA. Minyak isolator disirkulasikan melewati radiator menggunakan pompa. Tiap – tiap radiator memiliki kipas pendingin untuk pertukaran panas dari minyak ke udara.
6. O.F.W.F (*Oil Forced Water Forced*) : Panas ditransfer melalui minyak dan air yang disirkulasikan melalui saluran pembuangan panas menggunakan pompa.

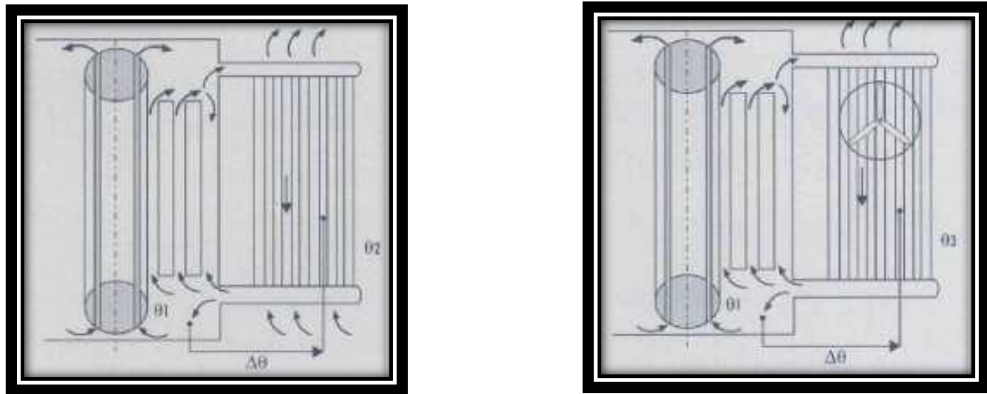


a. Pendinginan dengan kipas (Type ONAF)



b. Pendinginan dengan motor sirkulasi minyak (Type OFAF)

Gambar 2.7 Sistem pendinginan ONAF dan OFAF pada transformator



Gambar 2.8 Sistem pendingan ONAN dan ONAF

2. Tap Changer

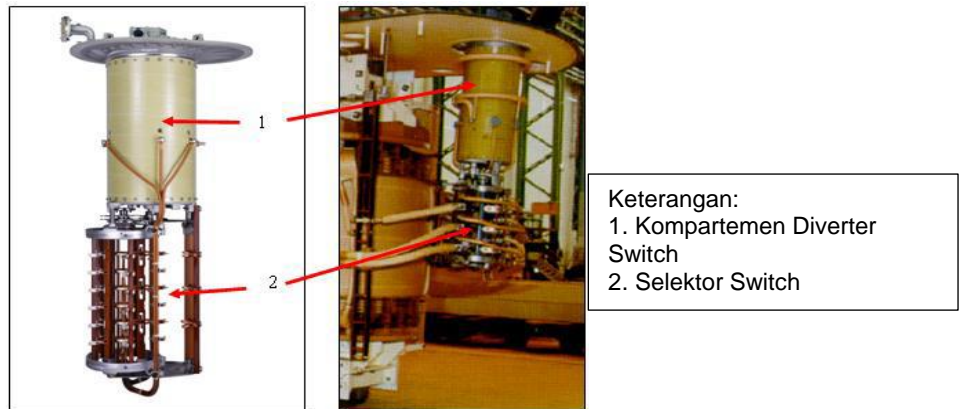
Kestabilan tegangan dalam suatu jaringan merupakan salah satu hal yang dinilai sebagai kualitas tegangan. Trafo dituntut memiliki nilai tegangan output yang stabil sedangkan besarnya tegangan input tidak selalu sama. Dengan mengubah banyaknya belitan sehingga dapat merubah ratio antara belitan primer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

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.



Gambar 2.9 OLTC pada transformator

Media pendingin atau pemadam proses switching pada diverter switch yang dikenal sampai saat ini terdiri dari dua jenis, yaitu media minyak dan media vaccum. Jenis pemadaman dengan media minyak akan menghasilkan energi arcing yang membuat minyak terurai menjadi gas C_2H_2 dan karbon sehingga perlu dilakukan penggantian minyak pada periode tertentu. Sedangkan dengan metoda pemadam vaccum proses pemadaman arcing pada waktu switching akan dilokalisir dan tidak merusak minyak.

2.2.4 Proteksi Transformator

1. Relay Bucholz

Pada saat transformator mengalami gangguan internal yang berdampak kepada suhu yang sangat tinggi dan pergerakan mekanis di dalam transformator, maka akan timbul tekanan aliran minyak yang besar dan pembentukan gelembung gas yang mudah terbakar. Tekanan atau gelembung gas tersebut akan naik ke konservator melalui pipa penghubung dan Relay bucholz. Tekanan minyak maupun gelembung gas ini akan dideteksi oleh Relay bucholz sebagai indikasi telah terjadinya gangguan internal.

2. Relay Jensen

Sama halnya seperti Relay Bucholz yang memanfaatkan tekanan minyak dan gas yang terbentuk sebagai indikasi adanya ketidaknormalan/ gangguan, hanya saja Relay ini digunakan untuk memproteksi kompartemen OLTC. Relay ini juga dipasang pada pipa saluran yang menghubungkan kompartemen OLTC dengan konservator.

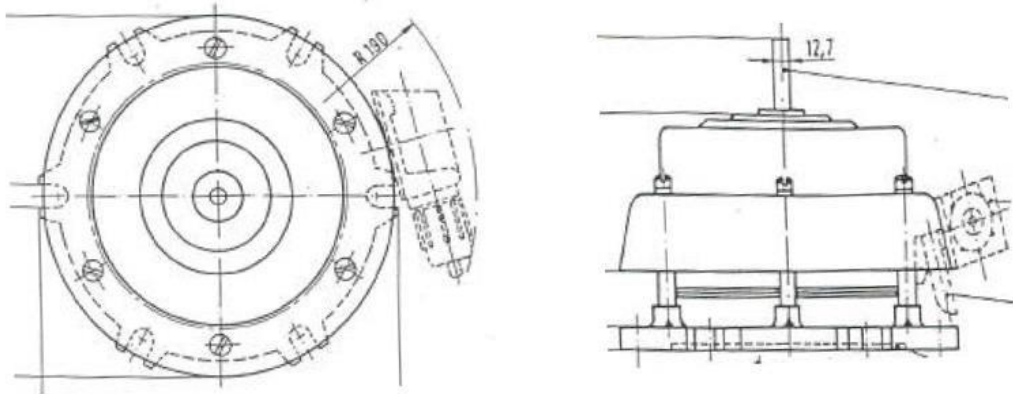


Gambar 2.10 Relay Jensen

3. Relay *Sudden Pressure*

Relay sudden pressure ini didesain sebagai titik terlemah saat tekanan didalam transformator muncul akibat gangguan. Dengan menyediakan titik terlemah maka tekanan akan tersalurkan melalui sudden pressure dan tidak akan merusak bagian lainnya pada maintank.

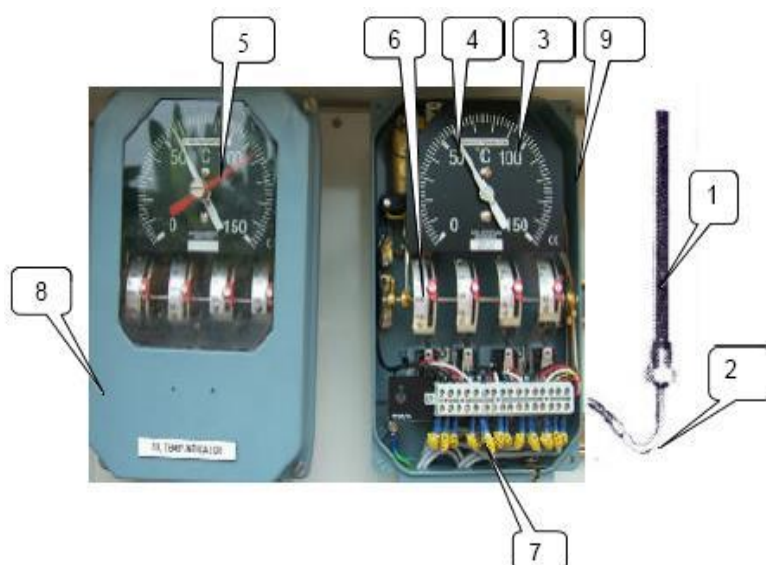




Gambar 2.11 Relay Sudden Pressure

4. Relay Thermal

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. Untuk mengetahui suhu operasi dan indikasi ketidaknormalan suhu operasi pada transformator digunakan Relay thermal. Relay thermal ini terdiri dari sensor suhu berupa *thermocouple*, pipa kapiler dan meter penunjukan.



Keterangan :

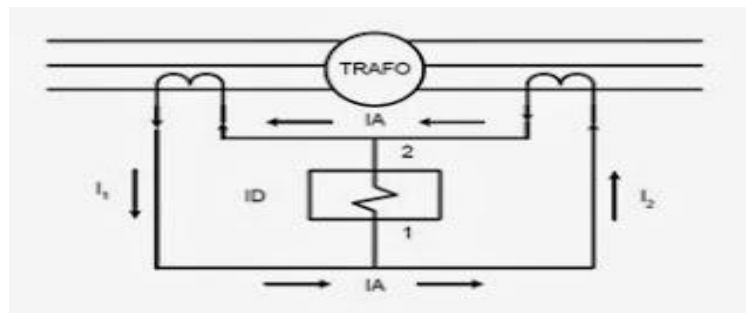
1. Sensor Suhu
2. Pipa Kapiler
3. Skala Meter
4. Jarum Putih (penunjukan suhu setiap saat)
5. Jarum merah (penunjukan suhu max tercapai)
6. Piringan Cakram
7. Terminasi Kabel
8. Tutup Thermometer
9. Packing / Gasket

Gambar 2.12 Bagian – bagian dari Relay thermal

5. Relay Differensial

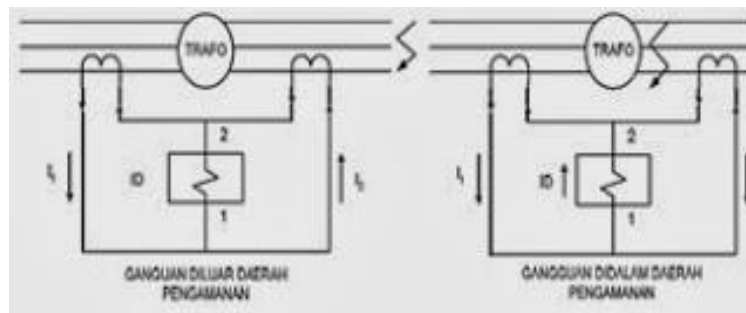
Relay differensial merupakan suatu relay yang prinsip kerjanya berdasarkan keseimbangan (*balance*), yang membandingkan arus- arus sekunder transformator arus (CT) terpasang pada terminal-terminal peralatan atau instalasi listrik yang diamankan. Penggunaan relay differensial sebagai relay pengaman, antara lain pada generator, transformator daya, bus bar, dan saluran transmisi. Relay differensial 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.

Relay differensial adalah suatu alat proteksi yang sangat cepat bekerjanya dan sangat selektif berdasarkan keseimbangan (*balance*) yaitu perbandingan arus yang mengalir pada kedua sisi trafo daya melalui suatu perantara yaitu trafo arus (CT). Dalam kondisi normal, arus mengalir melalui peralatan listrik yang diamankan seperti generator, transformator. Arus-arus sekunder transformator arus, yaitu I1 dan I2 bersikulasi melalui jalur IA. Jika relay pengaman dipasang antara terminal 1 dan 2, maka dalam kondisi normal tidak akan ada arus yang mengalir melaluinya. Dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



Gambar 2.13 Pengawatan Dasar Relay Differensial

Jika terjadi gangguan diluar peralatan listrik peralatan listrik yang diamankan (*external fault*), maka arus yang mengalir akan bertambah besar, akan tetapi sirkulasinya akan tetap sama dengan pada kondisi normal, sehingga relay pengaman tidak akan bekerja untuk gangguan luar tersebut. Jika gangguan terjadi didalam (*internal fault*), maka arah sirkulasi arus disalah satu sisi akan terbalik, menyebabkan keseimbangan pada kondisi normal terganggu, akibatnya arus ID akan mengalir melalui relay pengaman dari terminal 1 menuju ke terminal 2. Selama arus-arus sekunder transformator arus sama besar, maka tidak akan ada arus yang mengalir melalui kumparan kerja (*operating coil*) relay pengaman, tetapi setiap gangguan (antar fasa atau ke tanah) yang mengakibatkan sistem keseimbangan terganggu, akan menyebabkan arus mengalir melalui *Operating Coil* relay pengaman, maka relay pengaman akan bekerja dan memberikan perintah putus (*tripping*) kepada *circuit breaker* (CB) sehingga peralatan atau instalasi listrik yang terganggu dapat diisolir dari sistem tenaga listrik.



Gambar 2.14 Sistem Pengaman Relay Differensial

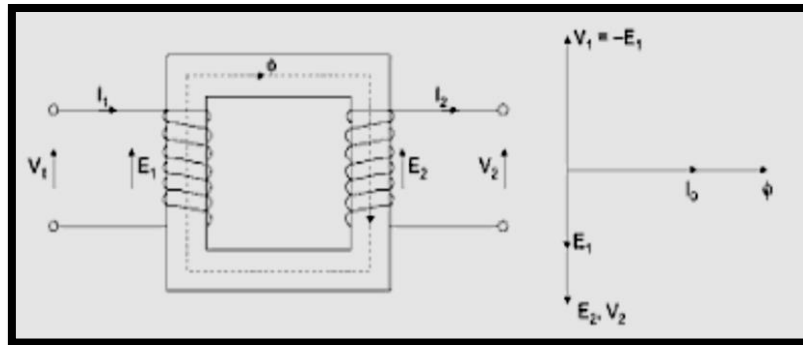
6. Relay Arus Lebih

Relay arus lebih bekerja berdasarkan adanya kenaikan arus yang melebihi suatu nilai pengaman yang telah ditentukan dan dalam jangka waktu yang telah ditetapkan. Relay arus lebih akan pick up jika besar arus melebihi nilai setting. Pada proteksi transformator daya, relay arus lebih digunakan sebagai tambahan bagi relay differensial untuk memberikan tanggapan terhadap gangguan luar. Relay ini digunakan untuk mengamankan peralatan terhadap gangguan hubung singkat antar fasa, hubung singkat satu fasa ke tanah dan beberapa hal dapat digunakan sebagai pengaman beban lebih.



Gambar 2.15 Relay Arus Lebih (Over Current Relay)

2.2.5 Transformator Dalam Keadaan Tanpa Beban



Gambar 2.16 Rangkaian transformator tanpa beban

Bila kumparan primer transformator dihubungkan dengan sumber tegangan V_1 yang sinusoidal akan mengalir arus primer I_0 yang juga sinusoidal dan dengan menganggap belitan N_1 relatif murni, I_0 akan tertinggal 90° dari V_1 arus primer I_0 menimbulkan fluks (ϕ) yang sefasa dan juga berbentuk sinusoidal.

$$= \phi_{\text{maks}} \sin \omega t$$

Fluks yang sinusoidal ini akan menghasilkan tegangan induksi E_1 (Hukum Faraday).

$$E_1 = -N_1 \frac{d\theta}{dt}$$

$$E_1 = -N_1 \frac{d(\phi_{\text{maks}} \sin \omega t)}{dt} = -N_1 \omega \phi_{\text{maks}} \cos \omega t \dots \dots \dots (2.1)$$

Tertinggal 90° dari ϕ

Harga efektif :

$$E_1 = \frac{N_1 \cdot 2\pi \cdot f \cdot \phi_{\text{maks}}}{\sqrt{2}} = 4,44 N_1 f \phi_{\text{maks}}$$

Pada rangkaian sekunder fluks (ϕ) bersama tadi menimbulkan :

$$E_2 = -N_2 \frac{d\theta}{dt}$$

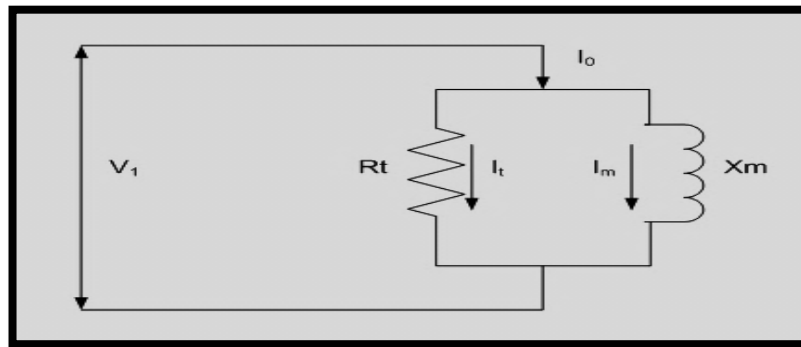
$$E_2 = -N_2 \phi_{\text{maks}} \cos \omega t$$

$$E_2 = 4.44 N_2 f \phi_{\text{maks}} \quad \text{sehingga} \quad \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Dengan mengabaikan rugi tahanan dan adanya fluks bocor, maka :

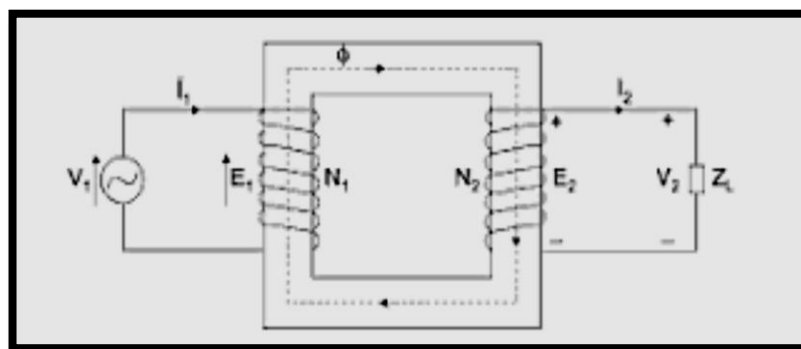
$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \dots \dots \dots (2.2)$$

Dalam hal ini tegangan induksi E_1 mempunyai kebesaran yang sama tetapi berlawanan arah dengan sumber tegangan V_1 . Arus pada kumparan primer I_0 yang mengalir pada saat kumparan sekundernya tidak dibebani disebut arus penguat. Dalam kenyataannya arus primer I_0 bukan merupakan arus induktif murni sehingga terdiri dari dua komponen.



Gambar 2.17 Rangkaian primer transformator

2.2.6 Transformator Dalam Keadaan Berbeban



Gambar 2.18 Rangkaian transformator berbeban

Apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban Z_L , I_2 mengalir pada kumparan sekunder, dimana $I_a = V_2 / Z_L$ dengan ϕ_2 faktor kerja beban. Arus beban I_2 ini akan menimbulkan gaya gerak magnet N_2

I_1 yang cenderung melawan fluks bersama yang telah ada akibat arus pemagnetan I_m . Agar fluks bersama itu tidak berubah nilainya, pada kumparan primer harus mengalir I_2 yang menentang fluks yang dibangkitkan oleh arus beban I_2 hingga keseluruhan arus yang mengalir pada kumparan primer menjadi :

$$I_1 = I_0 + I_2'$$

Bila rugi besi ddiabaikan, maka $I_0 = I_m$

$$I_1 = I_m + I_2'$$

Untuk menjaga agar fluks tetap tidak berubah sebesar gaya gerak magnet yang dibangkitkan oleh arus pemagnetan saja, berlaku hubungan :

$$\begin{aligned} N_1 \cdot I_m &= N_1 \cdot I_1 - N_2 \cdot I_2 \\ &= N_1 (I_1 + I_2') - N_2 \cdot I_2 \end{aligned}$$

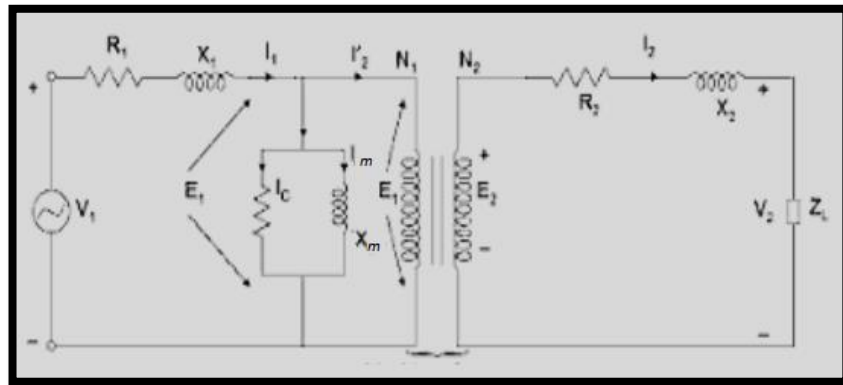
Sehingga : $N_1 \cdot I_2' = N_2 \cdot I_2$

Dikarenakan nilai I_m sangat kecil maka $I_2' = I_1$

$$\text{Jadi : } N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2 \quad \text{Atau} \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \dots \dots \dots (2.3)$$

Untuk analisis selanjutnya dengan memperhitungkan adanya tahanan dan fluks bocor, tidak seluruh fluks yang dihasilkan oleh arus pemagnetan I_m merupakan fluks bersama, sebagian dari padanya hanya mencakup kumparan primer (ϕ_1) atau kumparan sekunder saja.

Dalam model rangkaian ekuivalen yang dipakai untuk menganalisis kerja suatu transformator, adanya fluks bocor ϕ_1 dan ϕ_2 ditunjukkan sebagai reaktansi X_1 dan X_2 . Sedangkan rugi tahanan ditunjukkan dengan R_1 dan R_2 dengan demikian rangkaian ekuivalen dapat digambarkan sebagai berikut.



Gambar 2.19 Rangkaian transformator satu sisi tegangan

$$V_1 = E_1 + I_1 R_1 + I_1 X_1$$

$$E_2 = V_2 + I_2 R_2 + I_2 X_2$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad \text{atau} \quad E_1 = a E_2$$

Sehingga : $E_1 = a(I_2 Z_L + I_2 R_2 + I_2 X_2)$

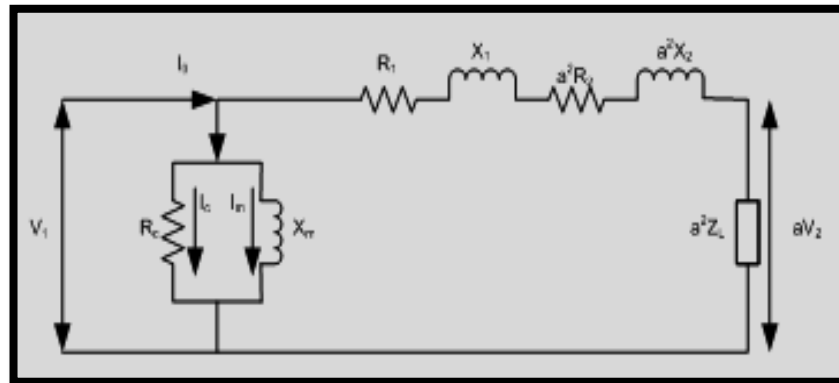
Karena : $\frac{I_2'}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \quad \text{atau} \quad I_2 = a I_2'$

Maka : $E_1 = a^2 \cdot I_2' \cdot Z_L + a^2 I_2' R_2 + a^2 \cdot I_2' \cdot X_2$

Dan : $V_1 = a^2 \cdot I_2 \cdot Z_L + a^2 I_2 R_2 + a^2 \cdot I_2 \cdot X_2 + I_1 R_1 + I_1 X_1$

Jadi : $V_1 = a^2 \cdot I_2 \cdot (Z_L \cdot R_2 \cdot X_2) + I_1 R_1 + I_1 X_1 \dots \dots \dots (2.4)$

Persamaan terakhir ini mengandung pengertian apabila parameter rangkaian sekunder dinyatakan dalam harga rangkaian primer perlu dikalikan dengan faktor a^2 , sehingga sekarang model rangkaian menjadi sebagai berikut.



Gambar 2.20 Rangkaian ekivalen transformator berbeban

2.2.7 Rugi – Rugi Transformator

Rugi daya transformator adalah daya listrik dalam transformator yang berubah menjadi panas. Rugi daya ini adalah daya listrik yang tidak dapat dipakai untuk melakukan kerja, melainkan diubah menjadi panas, dan panas tersebut yang menaikkan temperatur pada transformator. Panas – panas yang tinggi tersebut dapat merusak transformator, sehingga pada transformator daya yang ukurannya besar panas tersebut didinginkan dengan media pendingin. Umumnya digunakan minyak transformator sebagai media khusus untuk mendinginkan transformator.

Bila pada rangkaian sekunder ditutup (rangkaian berbeban) maka akan mengalir arus pada kumparan sekunder. Jika efisiensi sempurna (100%), semua daya pada lilitan primer akan dilimpahkan ke lilitan sekunder. Tetapi karena adanya rugi daya ini, maka daya output transformator menjadi lebih kecil dibandingkan daya inputnya. Dalam transformator hanya ada dua buah rugi – rugi yaitu rugi inti (*core loss*) dan rugi tembaga (*copper loss*).

a. Rugi Inti

1. Rugi Histerisis

Arus magnetisasi dalam trafo tidak linier yang berupa loop histerisis, merupakan salah satu bentuk kerugian dari inti. Rugi histerisis, yaitu rugi yang disebabkan fluks bolak balik pada inti besi, yang dinyatakan sebagai :

$$P_h = K_h f B_{\text{maks}} \text{ watt} \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana : K_h = konstanta

B_{maks} = fluks maksimum (weber)

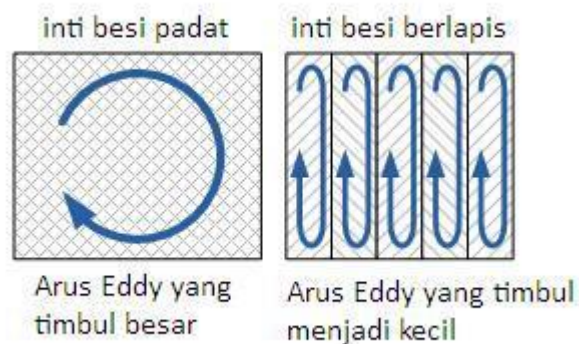
Arus magnetisasi yang tidak linier atau melawan aliran gaya magnet di dalam inti besi dapat menimbulkan panas. Panas yang timbul ini menunjukkan kerugian energi karena sebagian kecil energi listrik tidak dipindahkan, tetapi diubah menjadi energi panas. Sebuah transformator dibuat untuk bekerja pada rentang frekuensi tertentu, sehingga jika frekuensi arus listrik menurun maka dapat meningkatkan rugi – rugi histerisis dan menurunkan kapasitas transformator.

2. Rugi Arus Eddy

Kerugian inti yang lain adalah timbulnya induksi arus dalam inti yang disebabkan oleh fluks dalam inti. Kerugian arus eddy disebabkan oleh aliran yang menginduksi logam. Karena inti besi terbuat dari konduktor, maka arus eddy yang menginduksi inti besi akan semakin besar. Arus yang terinduksi dalam inti disebut arus eddy, yang akan menimbulkan pemanasan dalam inti. Rugi arus eddy dirumuskan sebagai :

$$P_a = K_a f B_{\text{maks}} \text{ watt} \dots \dots \dots (2.6)$$

Untuk mengurangi arus eddy, inti besi transformator dibuat berlapis-lapis, yang bertujuan untuk memecah induksi arus eddy yang terbentuk dalam inti besi.



Gambar 2.21 Inti besi utuh dan inti besi berlapis

Jadi rugi besi (rugi inti) dapat disimpulkan dengan rumus sebagai berikut :

$$P_i = P_h + P_a \dots \dots \dots (2.7)$$

3. Rugi Tembaga

Rugi - rugi tembaga terjadi di kedua kumparan. Kumparan primer atau sekunder dibuat dari gulungan kawat tembaga yang dilapisi oleh isolator tipis yang disebut enamel. Umumnya kumparan dibuat dari gulungan kawat yang cukup panjang. Gulungan kawat yang panjang ini akan meningkatkan hambatan dalam kumparan. Pada saat trafo dialiri arus listrik maka hambatan kumparan ini akan mengubah sejumlah kecil arus listrik menjadi panas yaitu sebesar (i^2R). Semakin besar harga R maka semakin besar pula energi panas yang timbul di dalam kumparan. Mutu kawat yang bagus dengan nilai hambatan jenis yang kecil dapat mengurangi rugi – rugi tembaga. Rugi yang disebabkan arus yang mengalir pada kawat tembaga dapat ditulis sebagai berikut :

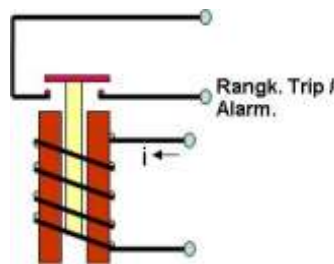
$$P_{cu} = I^2 R \dots \dots \dots (2.8)$$

Karena arus berubah ubah, rugi tembaga juga tidak konstan bergantung pada beban.

2.3 Relai Proteksi

2.3.1 Pengertian Relai Proteksi

Relai adalah sebuah alat yang bekerja secara otomatis memasukkan (menghubungkan) suatu rangkaian listrik (rangkaian trip atau alarm) akibat adanya perubahan rangkaian lain. Seperti pada gambar 2.2 rangkaian trip atau alarm akan masuk (terhubung) apabila adanya dorongan atau gerakan mekanis yang diakibatkan oleh tekanan yang mencapai nilai tertentu karena adanya perubahan dari tekanan hydraulic atau pneumatic. Relai ini biasa disebut relai hydraulic atau relai pneumatic.



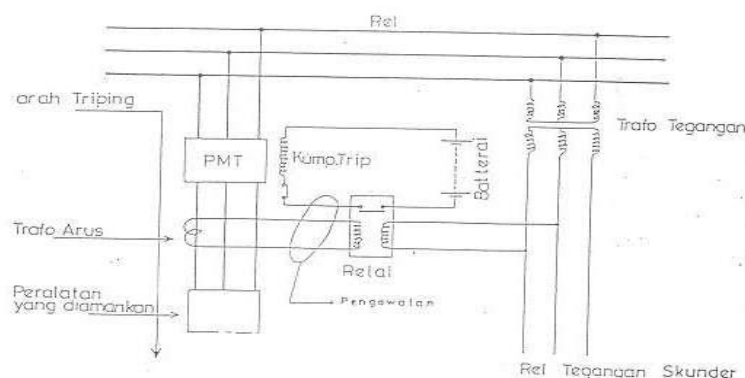
Gambar 2.22 Konstruksi Relai Proteksi

Untuk mengamankan peralatan listrik terhadap kondisi abnormal, digunakan sistem proteksi yang terdiri dari seperangkat peralatan proteksi yang komponen-komponen terpentingnya adalah :

1. Relai Proteksi : Sebagai elemen perasa yang mendeteksi adanya gangguan atau keadaan abnormal lainnya (fault detection).
2. Pemutus Tenaga (PMT) : Sebagai pemutus arus gangguan didalam sirkit tenaga untuk melepaskan bagian sistim yang terganggu. Dengan kata lain membebaskan sistim dari gangguan (fault clearing). PMT menerima perintah (sinyal trip) dari relai proteksi untuk membuka rangkaian.
3. Trafo Arus dan/atau Trafo Tegangan : Untuk meneruskan arus dan/atau tegangan dengan perbandingan tertentu dari sirkit primer

(sirkuit tenaga) ke sirkuit sekunder (sirkuit relai) dan mengisolasi sirkuit sekunder terhadap sirkuit primernya.

4. Baterai (Sumber DC) : Sebagai sumber tenaga untuk mengetriplekan PMT dan catu daya untuk relai (relai digital/relai statik) dan relai bantu (auxiliary relai)
5. Pengawatan



Gambar 2.23 Rangkaian Dasar Sistem Relai Proteksi

2.3.2 Fungsi Dan Peranan Relai Proteksi

Nilai investasi Transformator sedemikian besarnya sehingga perhatian yang khusus harus diutamakan agar transformator tidak hanya dapat beroperasi dengan efisiensi optimal, tetapi juga harus teramankan dari kecelakaan atau kerusakan yang fatal. Kerusakan yang fatal dapat menimbulkan :

1. Kerugian biaya investasi
2. Kerugian operasi (*long outages*)
3. Terganggunya pelayanan (*services*)

Untuk itu relai proteksi sangat diperlukan pada Transformator. Relai proteksi adalah suatu perangkat kerja proteksi yang mempunyai fungsi dan peranan :

1. Memberikan sinyal alarm atau melepas pemutus tenaga (PMT) dengan tujuan mengisolir gangguan atau kondisi yang tidak normal

seperti adanya hubung singkat, beban lebih dan kondisi tidak normal lainnya.

2. Melepas/ mentriapkan peralatan yang berfungsi tidak normal untuk mencegah timbulnya kerusakan.
3. Melepas/ mentriapkan peralatan yang terganggu secara cepat dengan tujuan mengurangi kerusakan yang lebih besar.
4. Melokalisir kemungkinan dampak akibat gangguan dengan memisahkan peralatan yang terganggu dari sistim. Peralatan yang terganggu dapat menyebabkan gangguan pada peralatan lain yang berada pada sistim.
5. Melepas peralatan/ bagian yang terganggu secara cepat dengan maksud menjaga stabilitas sistim, kontinuitas pelayanan dan unjuk kerja sistem.

Secara umum fungsi dan peranan relai proteksi adalah :

1. Mencegah kerusakan
2. Membatasi kerusakan
3. Mencegah meluasnya gangguan sistim

2.3.3 Persyaratan Relai Proteksi

Untuk mendapatkan pengaman yang sebaik-baiknya diperlukan persyaratan relai proteksi sebagai berikut :

1. Kepekaan (*sensitivity*)

Relai pengaman harus cukup peka terhadap gangguan, sehingga dapat mendeteksi gangguan dikawasan pengamannya dengan pasti pada saat yang di perlukan, termasuk kawasan pengaman cadangan jauhnya, meskipun dalam kondisi yang memberikan deviasi yang minimum.

2. Keandalan (*reliability*)

Ada 3 aspek, yaitu :

a. *Dependability*

Yaitu tingkat kepastian bekerjanya (keandalan kemampuan bekerjanya). Pada prinsipnya proteksi harus dapat diandalkan bekerjanya (dapat mendeteksi dan melepaskan bagian yang terganggu), tidak boleh gagal bekerja. Dengan kata lain *dependability* harus tinggi.

b. *Security*

Yaitu tingkat kepastian untuk tidak salah kerja (keandalan untuk tidak salah kerja). Salah kerja adalah kerja yang semestinya tidak harus dilakukan, misalnya kerana lokasi gangguan diluar kawasan pengamannya atau sama sekali tidak ada gangguan atau kerja yang terlalu cepat atau terlalu lambat. Salah kerja mengakibatkan pemadaman yang sebenarnya tidak perlu terjadi. Jadi pada prinsipnya pengaman tidak boleh salah kerja, dengan kata lain security nya harus bagus.

c. *Availability*

Yaitu perbandingan antara waktu dimana pengaman dalam keadaan berfungsi/siap kerja dan waktu total dalam operasinya.

3. Selektivitas (*selectivity*)

Yaitu pengaman harus dapat memisahkan bagian sistim yang terganggu sekecil mungkin yaitu hanya seksi atau peralatan yang terganggu saja yang termasuk dalam pengaman utamanya. Pengaman sedemikian disebut pengaman yang selektif. Jadi relai harus dapat membedakan apakah :

1. Gangguan terletak dikawasan pengaman utamanya dimana ia harus bekerja cepat, atau
2. Gangguan terletak di seksi berikutnya dimana ia harus berkeja dengan waktu tunda (sebagai pengaman cadangan jauh), atau menahan diri untuk tidak trip, atau

3. Gangguan diluar daerah pengamannya, atau sama sekali tidak ada gangguan, dimana ia harus tidak berkeja sama sekali.

Untuk itu relai-relai yang didalam sistim terletak secara seri, dikoordinir dengan mengatur peningkatan waktu (*time grading*) atau peningkatan setting arus (*current grading*), atau gabungan dari keduanya.

4. Kecepatan (*Speed*)

Untuk memperkecil kerugian/kerusakan akibat gangguan, maka bagian yang terganggu harus dipisahkan secepat mungkin dari bagian sistem lainnya. Waktu total pembebasan sistim dari gangguan atau disingkat waktu total pembebasan gangguan (*total fault clearing time*) adalah waktu sejak munculnya gangguan sampai bagian yang terganggu benar-benar terpisah dari bagian sistim lainnya.

2.4 Jenis Gangguan Pada Transformator

Gangguan dalam transformator tenaga dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

- a. Gangguan Awal

Gangguan ini tidak dapat dideteksi pada terminal-terminal transformator karena tidak menimbulkan keadaan ketidak seimbangan.

Gangguan pada tingkat awal ini diantaranya :

1. Gangguan karena sambungan-sambungan listrik yang tidak sempurna, gangguan pada inti transformator yang disebabkan karena *break down* atau kerusakan pada isolasi dari laminasinya yang dapat menimbulkan busur api (*arcing*) di dalam minyak transformator.

2. Gangguan pada sistem pendingin yang dapat mengakibatkan kenaikan temperatur terutama pada keadaan beban penuh.

b. Gangguan Hubung Singkat Dalam Transformator

Gangguan ini dapat menyebabkan kerusakan yang serius, dan dapat dideteksi dengan adanya ketidak seimbangan arus. Gangguan hubung singkat yang terjadi dalam transformator tenaga adalah :

1. Gangguan pada bushing.
2. Gangguan antar lilitan pada kumparan yang sama.
3. Gangguan tanah terbatas pada netral belitan.

Arus gangguan pada gangguan hubung singkat di dalam transformator dapat dibagi menjadi 3 macam, yaitu :

1. Arus gangguan tiga fasa.
2. Arus gangguan dua fasa.
3. Arus gangguan satu fasa ke tanah.

Untuk menghitung arus gangguan ini, maka bila terjadi ketidak seimbangan di dalam sistem tenaga listrik tiga fasa akan selalu dapat diuraikan kembali menjadi tiga buah sistem simetris yang masing-masing sistem tersebut terdiri dari tiga buah vektor. Di dalam teknik listrik, ketiga sistem simetris yang merupakan hasil uraian tersebut dikenal dengan nama :

1. Komponen urutan positif
2. Komponen urutan negatif
3. Komponen urutan nol

Pada suatu sistem tenaga listrik yang normal, yang ada hanya komponen urutan positif. Apabila terjadi ketidakseimbangan didalam sistem tiga fasa, baik dikarenakan pembebanan yang tidak simetris antar masing-masing fasa maupun dikarenakan gangguan, maka kemungkinan komponen urutan negatif atau komponen urutan nol akan hadir di sistem.

2.5 Kriteria Deteksi Gangguan

a. Arus Lebih

Arus lebih adalah arus yang melampaui arus beban maksimum yang di perbolehkan. Arus lebih bisa dipakai untuk mendeteksi adanya beban lebih, gangguan hubung singkat (dua fasa atau tiga fasa) atau gangguan satu fasa ke tanah dengan menggunakan relai arus lebih (*over current relay*). Pengaman ini disebut proteksi arus lebih. Ada 3 macam proteksi arus lebih

1. Proteksi beban lebih
2. Proteksi hubung singkat
3. Proteksi gangguan tanah

Relai hubung singkat terhubung dikawat fasa yang juga dialiri arus beban, oleh karena itu settingnya harus lebih besar dari arus beban maksimum, demikian pula relai beban lebih.

Karena arus beban pada umumnya seimbang maka relai beban lebih sebenarnya cukup dipasang disalah satu fasanya, namun banyak pula yang dipasang diketiga fasanya. Arus hubung singkat bisa mencapai 10-20 kali arus nominalnya atau lebih tinggi, sedangkan arus beban lebih biasanya 1,05-2,0 kali nominalnya. Oleh karena itu daerah kerja dan karakteristik relai beban lebih sangat berbeda dengan relai hubung singkat.

Relai beban lebih harus dapat menghindari panas yang berlebihan pada alat yang diamankannya, namun harus dapat memberi kesempatan bekerja dengan beban lebih selama suhunya belum berlebihan. Oleh karena itu karakteristik relai beban lebih mengikuti fungsi eksponensial sesuai dengan karakteristik pemanasan dan pendinginan dari sisi yang diamankan. Nilai konstan thermalnya harus dipilih sesuai konstanta thermal dari alat yang diamankan. Sebagai alternatif untuk proteksi beban lebih dapat dipakai relai suhu.

Relai hubung singkat pada umumnya mempunyai 2 tingkat, bahkan ada yang sampai 3 tingkat. Yaitu :

1. Tingkat rendah (*low set*)
2. Tingkat tinggi (*high set*)
3. Tingkat seketika (*instantaneous*)

Relai tingkat rendah digunakan sebagai relai hubung singkat yang sekaligus dapat berfungsi pula sebagai pengaman cadangan jauh bagi seksi berikutnya. Karakteristiknya adalah *inverse time* dan/atau *definite time* yang harus sesuai dengan karakteristik relai seksi lainnya dalam seri supaya bisa dikoordinir dengan mudah.

Karakteristik *inverse time* yang banyak dipakai dan telah dilakukan dalam IEC standard 255 adalah nomor *inverse*, *very inverse*, *extremely inverse* dan *long time inverse*.

Relai tingkat tinggi digunakan untuk mengamankan gangguan dihilu yang memerlukan waktu yang cepat karena besarnya arus gangguan. Supaya tidak salah kerja untuk gangguan di seksi berikutnya, setting arusnya dibuat lebih besar daripada arus gangguan maksimum di awal seksi berikutnya. Jadi relai tingkat tinggi ini tidak memberi pengaman cadangan jauh bagi seksi berikutnya.

Relai gangguan tanah terletak dikawat netral dari sirkit sekunder trafo arusnya. Jadi arus yang diukur adalah penjumlahan dari arus ketiga fasanya. Arus ini disebut arus sisa (*residual current*), atau arus urutan nol, yang memang baru muncul kalo ada gangguan tanah.

Karena letaknya yang sedemikian itu, relai gangguan tanah tidak dilalui oleh arus beban, baik yang seimbang maupun tidak seimbang, juga tidak dilalui arus hubung singkat antar fasa, 2-fasa atau 3-fasa, karena penjumlahan arus-arus itu dititik pertemuan ketiga fasanya sama dengan nol. Jadi relai gangguan tanah tidak

sensitif terhadap arus beban maupun arus hubung singkat antar fasa. Oleh karena itu nilai settingnya bisa lebih kecil daripada arus beban. Nilai setting yang kecil ini memang diperlukan karena arus gangguan 1 fasa ketanah bisa lebih kecil dari arus beban. Ini disebabkan karena 2 hal yaitu :

1. Gangguan 1 fasa ketanah hampir selalu melalui tahanan gangguan.
2. Titik netral sistim mungkin dibumikan melalui tahanan.

Relai hubung singkat yang settingnya diatas arus beban maksimum, kurang atau tidak sensitif terhadap gangguan tanah.

Gangguan tanah sebagai akibat putusnya konduktor 1 fasa dan menyentuh tanah, biasanya tahanan gangguan yang sangat tinggi sehingga tidak bisa dideteksi oleh relai gangguan tanah. Gangguan sedemikian bisa dideteksi oleh relai ketidak seimbangan arus fasa atau relai urutan negatif dan arus beban.

b. Tegangan Lebih dan Tegangan Kurang

Didalam sistim tiga fasa, tegangan fasa ke netral dan fasa ke fasa disisi beban di pengaruhi oleh jatuh tegangan (*drop voltage*) sepanjang saluran, jadi dipengaruhi oleh beban itu sendiri, tetapi tegangan hanya boleh berubah dalam batas tertentu. Jika perubahan itu melampaui batas, berarti keadaan tidak normal atau ada gangguan.

Tegangan lebih bisa disebabkan oleh gangguan pada pengatur tegangan pada generator atau transformator, beban hilang, atau karena jeleknya pengaturan faktor kerja. Tegangan lebih akibat petir tidak termasuk dalam golongan ini, karena hal ini tidak diamankan oleh arrester. Tegangan kurang kebanyakan disebabkan karean gangguan.

c. Kriteria Lain

Untuk proteksi masih ada kriteria lain yang digunakan, yaitu :

1. Suhu sebagai kriteria untuk beban lebih (untuk minyak transformator).
2. Kecepatan aliran minyak transformator, kumpula gas untuk mendeteksi adanya gangguan didalam transformator, yaitu pada relai bucholz.

2.6 Gangguan Arus Hubung Singkat

Hubung singkat merupakan suatu hubungan abnormal (termasuk busur api) pada impedansi yang relatif rendah terjadi secara kebetulan atau di sengaja antara dua titik yang mempunyai potensial yang berbeda. Istilah gangguan atau gangguan hubung singkat digunakan untuk menjelaskan suatu hubungan singkat. Untuk mengatasi gangguan-gangguan tersebut, perlu dilakukan analisis hubung singkat sehingga sistem proteksi yang tepat pada sistem tenaga listrik dapat di tentukan. Analisis hubung singkat adalah analisis yang mempelajari kontribusi arus gangguan hubung singkat yang mungkin mengalir pada setiap cabang di dalam sistem (di jaringan distribusi, transmisi, trafo tenaga atau dari pembangkit) sewaktu gangguan hubung singkat yang mungkin terjadi di dalam sistem tenaga listrik. Analisis hubung singkat memiliki fungsi sebagai berikut :

1. Untuk menentukan arus maksimum dan minimum hubung singkat.
2. Untuk menentukan arus gangguan tak simetris bagi gangguan satu dan dua fasa ke tanah, gangguan antar fasa dan rangkaian terbuka.
3. Penyelidikan operasi relai-relai proteksi.
4. Untuk menentukan kapasitas pemutus dari *circuit breaker*.
5. Untuk menentukan distribusi arus gangguan dan tingkat tegangan busbar selama gangguan.

Hubung singkat terjadi akibat adanya faktor internal dan faktor eksternal. Faktor internal dari gangguan adalah rusaknya peralatan listrik. Faktor eksternal adalah antara lain cuaca buruk, sambaran petir, dll. Gangguan hubung singkat menyebabkan terjadinya interupsi kontinuitas pelayanan daya kepada para konsumen apabila gangguan itu sampai menyebabkan terputusnya suatu rangkaian atau menyebabkan keluarnya satu unit pembangkit, penurunan tegangan yang cukup besar menyebabkan rendahnya kualitas tenaga listrik dan merintangi kerja nominal pada peralatan konsumen, pengurangan stabilitas sistem dan menyebabkan jatuhnya generator, dan merusak peralatan pada daerah terjadinya gangguan tersebut.

2.6.1 Perhitungan Arus Hubung Singkat

Perhitungan dilakukan pada sisi primer dan sisi sekunder transformator. Arus gangguan yang dihitung adalah arus gangguan fasa-fasa dan satu fasa ke tanah. Besar arus gangguan dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

1. Untuk gangguan hubung singkat tiga fasa :

$$I_{hs} 3_{fasa} = \frac{E_{ph}}{Z_1} \dots\dots\dots (2.9)$$

2. Untuk gangguan hubung singkat dua fasa :

$$I_{hs} 2_{fasa} = \frac{E_{ph} \sqrt{3}}{Z_1 + Z_2} \dots\dots\dots (2.10)$$

3. Untuk gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah :

$$I_{hs} 1_{fasa-n} = \frac{E_{ph} \sqrt{3}}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \dots\dots\dots (2.11)$$

Dalam perhitungan arus hubung singkat, perlu dilakukan terlebih dahulu langkah-langkah sebagai berikut :

1. Perhitungan impedansi sumber :

$$X_s = \frac{kV^2}{MVA_{hs}} \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana :

X_s : Impedansi Sumber

kV : Tegangan sisi primer trafo tenaga

MVA_{hs} : Data hubung singkat

2. Perhitungan Impedansi Trafo

$$X_{tf} = \frac{kV^2}{MVA} \times Z_{tf} \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana :

X_{tf} : Impedansi Sumber

kV : Tegangan sisi primer trafo tenaga

MVA_{hs} : Data hubung singkat

Z_{tf} : Reaktansi trafo

3. Perhitungan Impedansi total

$$Z_1 = jX_s + jX_{tf} \dots\dots\dots(2.14)$$

Dimana :

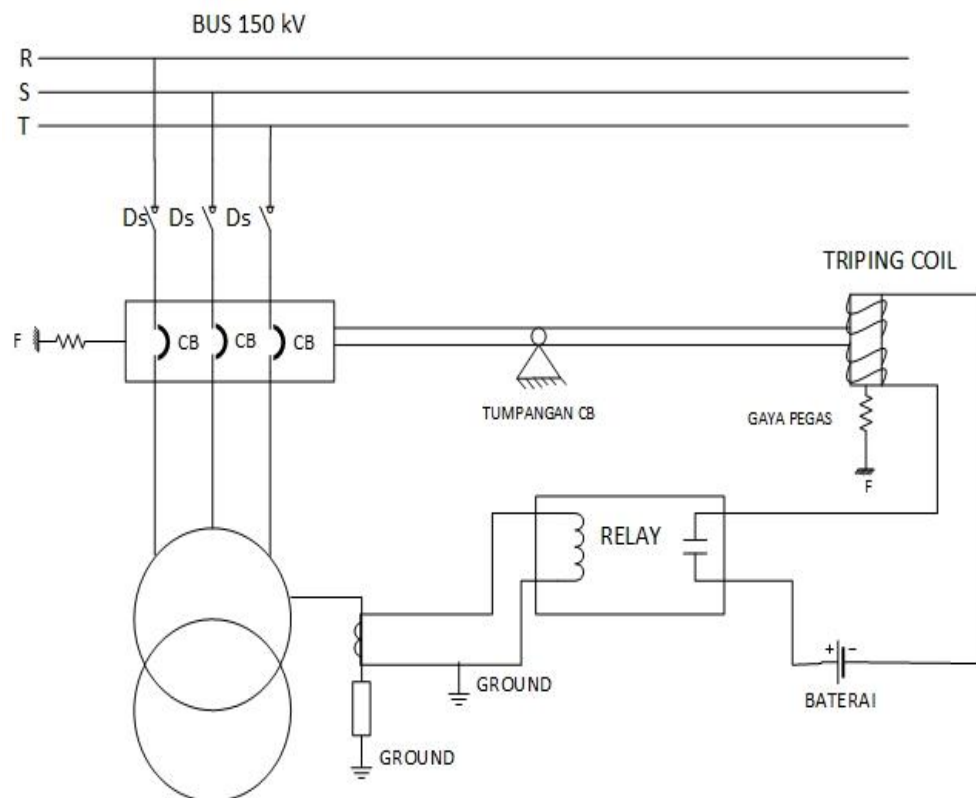
X_{tf} : Impedansi Sumber

Z_{tf} : Impedansi trafo

Setelah mendapatkan nilai dari perhitungan diatas, barulah dapat dicari nilai-nilai gangguan arus hubung singkat yang ada pada trafo.

2.7 Relai Gangguan Tanah Terbatas (*Restricted Earth Fault Relay*)

Relai ini berfungsi untuk mengamankan transformator terhadap gangguan tanah di dekat titik netral yang tidak dapat dirasakan oleh relai differensial dan hanya dipasang pada transformator yang titik netralnya ditanahkan langsung atau melalui tahanan. Relai ini diperlukan karena sensitifitas relai differensial sangat terbatas, terutama dalam mendeteksi terjadinya hubung singkat didekat titik netral. Apabila terjadi gangguan tanah di luar daerah proteksi, tidak ada arus yang mengalir di relai, tetapi jika terjadi gangguan tanah didalam daerah proteksi akan timbul arus yang mengalir di relai.



Gambar 2.24 Relai Proteksi Gangguan Tanah Terbatas

Relai ini prinsip kerjanya hampir sama dengan relai differensial tetapi mempunyai perbedaan dalam salah satu trafo arusnya (CT). Pada relai differensial kedua trafo arus (CT) diletakan pada kawat fasa. Untuk relai gangguan tanah terbatas salah satu trafo arus (CT) diletakan pada kawat hubungan netral ke tanah. Relai ini hanya mendeteksi gangguan

fasa ke tanah yang terjadi di dalam daerah perlindungannya, dalam hal ini yang terjadi yaitu di dalam transformator.

2.7.1 Jenis Relai REF (*Restricted Earth Fault Relay*)

Relai REF (*Restricted Earth Fault Relay*) ada 2 jenis dalam penentuan setting yaitu :

1. Jenis tipe tegangan (*Voltage Setting*)
2. Jenis tipe arus (*Current Setting*)

Jenis relai REF tipe tegangan (*Voltage Setting*), contohnya :

REF Relay

Merk : Asea, type RADHD

Jenis relai REF tipe arus (*Current Setting*), contohnya :

REF Relay

Merk : GEC Alsthom, type MFAC 14

2.7.2 Prinsip Dasar Penyetelan Relai REF (*Restricted Earth Fault Relay*)

Untuk setting relai REF (*Restricted Earth Fault Relay*) tipe tegangan (*Voltage Setting*) adalah :

$$\text{Setting : } V_s \geq \frac{I_f}{\text{ratio CT}} \times (R_{ct} + R_{lead}) \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

$$I_{set} = \frac{V_s}{R_s} \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

Dimana :

- | | |
|----------|---|
| V_s | : Tegangan Setting |
| I_f | : arus gangguan maksimum pada daerah pengamanan relai REF (<i>Restricted Earth Fault Relay</i>) |
| Ratio CT | : perbandingan rasio trafo arus, misal di sisi sekunder (3000/5) |
| R_{ct} | : tahanan pada kumparan pada CT |

Rlead : tahanan beban (tahanan kabel yang menghubungkan CT dengan tahanan pada REF)
Rs : Tahanan Seri

2.8 Standar Nilai Resistansi Pembumian

Nilai resistan pembumian yaitu dasar atau acuan suatu tahanan dari penghubung suatu titik sirkit listrik atau suatu penghantar yang bukan bagian dari sirkit listrik dengan bumi menurut cara tertentu. Dijelaskan pembumian tidak hanya untuk sirkit listrik saja, melainkan seluruh sirkit atau instalasi yang dibumikan disebut juga pembumian (*grounding*, *arde*, *netral*, *pentanahan*). Untuk pembumian sendiri terdiri dari beberapa macam, tergantung jenis instalasi yang terdapat perbedaan karakteristik pemasangan *grounding* di dalamnya.

Nilai standar mengacu pada Persyaratan Umum Instalasi Listrik atau PUIL 2000 (peraturan yang sesuai dan berlaku hingga saat ini) yaitu kurang dari atau sama dengan 5 (lima) ohm. Dijelaskan bahwa nilai sebesar 5 ohm merupakan nilai maksimal atau batas tertinggi dari hasil resistan pembumian (*grounding*) yang masih bisa ditoleransi. Nilai yang berada pada range 0 ohm - 5 ohm adalah nilai aman dari suatu instalasi pembumian *grounding*. Nilai tersebut berlaku untuk seluruh sistem dan instalasi yang terdapat pembumian (*grounding*) di dalamnya. Untuk standar nilai reasistansi pembumian pada bidang penangkal petir, menggunakan referensi peraturan yang berbeda. Tetapi untuk ketentuan standar nilai resistan pembumian sama dengan referensi peraturan pada PUIL 2000. Ketentuan yang hampir sama inilah yang menjadikan masing - masing peraturan akan saling berkaitan dalam memberikan solusi dan penjelasan untuk suatu permasalahan. Dengan diperkuat dengan banyak referensi di atas menjadikan standarisasi lebih kuat dan menjadikannya suatu keharusan.

Berikut referensi untuk standar nilai resistan pembumian yang bersumber dari PER02/MEN/1989, tentang pengawasan instalasi penyalur petir. Jika tidak sesuai seharusnya perlu upaya untuk

menyesuaikan dengan nilai yang telah terstandarisasi. Pertimbangannya adalah jika nilai resistan pembumian (*grounding*) lebih dari 5 ohm maka tidak mendapat pengesahan dan rekomendasi dari dinas tenaga kerja sebagai pihak pengawas dari peraturan dan perundangan tersebut serta dari pihak PLN selaku otoritas tertinggi kelistrikan di Indonesia. Hal ini bisa saja membuat perusahaan tersebut mendapat peringatan dari masalah ini. Serta dari sisi teknis jika nilai resistan pembumian *grounding* terlalu besar, akan berpengaruh negatif pada komponen dari instalasi tersebut. Dikarenakan pembumian (*grounding*) yang tidak sempurna akan menimbulkan arus sisa yang merusak komponen - komponen penyusun, terutama komponen elektronik yang sangat peka terhadap arus.

Untuk membuat instalasi pembumian (*grounding*) dengan nilai resistan pembumian yang sesuai peraturan dengan melakukan beberapa teknik. Beberapa teknik pendekatan yang sesuai yaitu memparalel, menambah kedalaman atau memperbesar luas penampang hataran. Dengan melakukan salah satu atau ketiga tehnik tersebut sehingga dapat memperoleh hasil yang diharapkan. Terdapat banyak cara untuk mendapatkan hasil nilai resistan pembumian (*grounding*) yang standar, tetapi diharapkan melakukan cara yang sesuai (legal) dan tidak mengandung unsur non legal yang dapat merugikan untuk kedepannya.