



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Transformator

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

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

Berdasarkan frekuensi, transformator dapat dikelompokkan sebagai berikut :

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

Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi :

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

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



Keadaan prinsipnya yang sederhana namun mempunyai arti penting sebagai dasar pembahasan mesin listrik, pembahasan transformator patut didahulukan.¹

2.1.1 Transformator daya

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

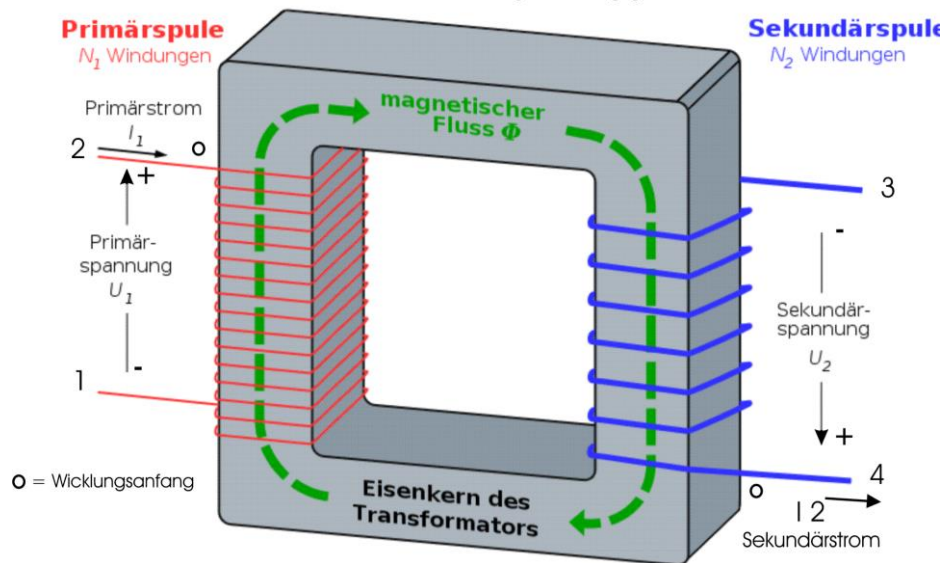
Landasan fisik transformator adalah induktansi mutual (timbang balik) antara kedua rangkaian yang dibutuhkan oleh suatu fluks magnetik bersama yang melewati suatu jalur dengan reluktansi rendah. Kedua kumparan memiliki induktansi mutual yang tinggi. Jika suatu kumparan disambungkan pada suatu sumber tegangan bolak balik, suatu fluks bolak balik terjadi di dalam inti berlaminasi, yang sebagian besar akan mengait pada kumparan lainnya, dan di dalamnya akan terinduksi suatu gaya gerak listrik (GGL).²

2.1.2 Prinsip-prinsip dasar transformator

Transformator menggunakan prinsip hukum induksi faraday dan hukum Lorentz dalam menyalurkan daya, dimana arus bolak balik yang mengalir mengelilingi suatu inti besi maka inti besi itu akan berubah menjadi magnet. Dan apabila magnet tersebut dikelilingi oleh suatu belitan maka pada kedua ujung belitan tersebut akan terjadi beda potensial. Arus yang mengalir pada belitan primer akan menginduksi inti besi transformator sehingga didalam inti besi akan mengalir flux magnet dan flux magnet ini akan menginduksi belitan sekunder sehingga pada ujung belitan sekunder akan terdapat beda potensial.

¹ Zuhail, *Dasar Tenaga Listrik*, Penerbit ITB Bandung, 1991, Hal 15

² Abdul Kadir, *Transmisi Tenaga Listrik*, Penerbit UI, 1998, Hal 43



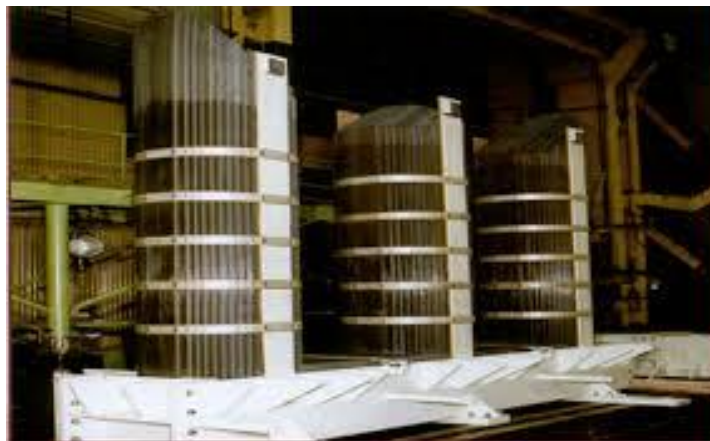
Gambar 2.1 Prinsip Kerja Transformator

2.1.3 Bagian-bagian transformator

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

1. Bagian utama

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

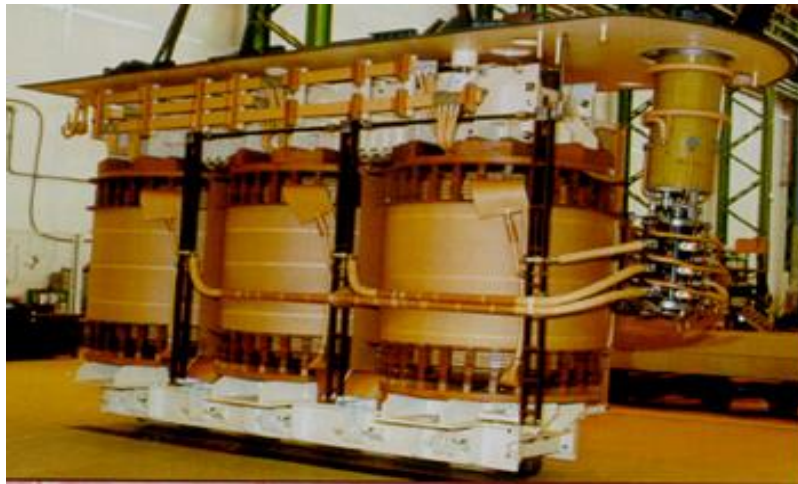


Gambar 2.2 Inti Besi Transformator



2. Kumparan transformator

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



Gambar 2.3 Kumparan transformator

3. Bushing

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



Gambar 2.4 Bushing Transformator



4. Oil preservation & ekspansion (konservator)

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



Gambar 2.5 Konservator

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



Gambar 2.6 Silica Gel



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

5. Pendingin

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

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

Tabel 2.1 Macam-macam Pendingin Pada Transformator

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



6. Dielectric (Minyak isolasi transformator & isolasi kertas)

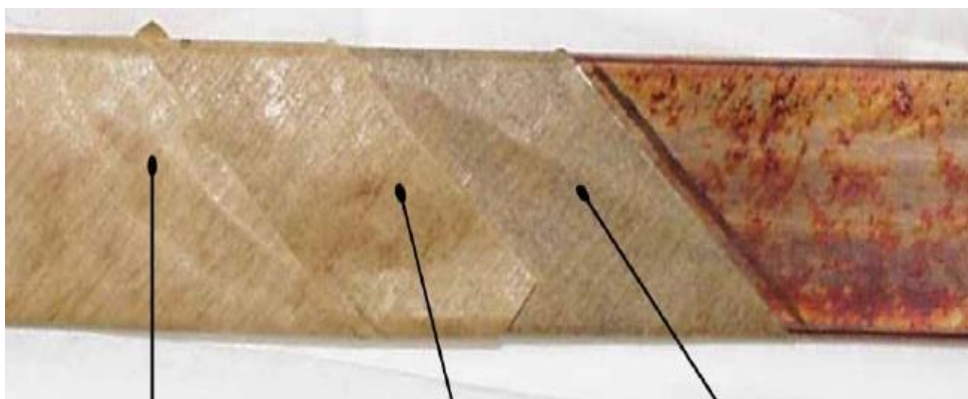
Minyak isolasi pada transformator berfungsi sebagai media isolasi, pendingin dan pelindung belitan dari oksidasi. Minyak isolasi trafo merupakan minyak mineral yang secara umum terbagi menjadi tiga jenis, yaitu parafinik, naphthanik dan aromatic. Antara ketiga jenis minyak dasar tersebut tidak boleh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



Gambar 2.7 Minyak Isolasi Transformator

Kertas isolasi trafo

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



Gambar 2.8 Tembaga Yang Dilapisi Kertas Isolasi



7. Tap changer

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

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

Tap changer terdiri dari :

- Selector Switch
- Diverter Switch
- Tahanan transisi

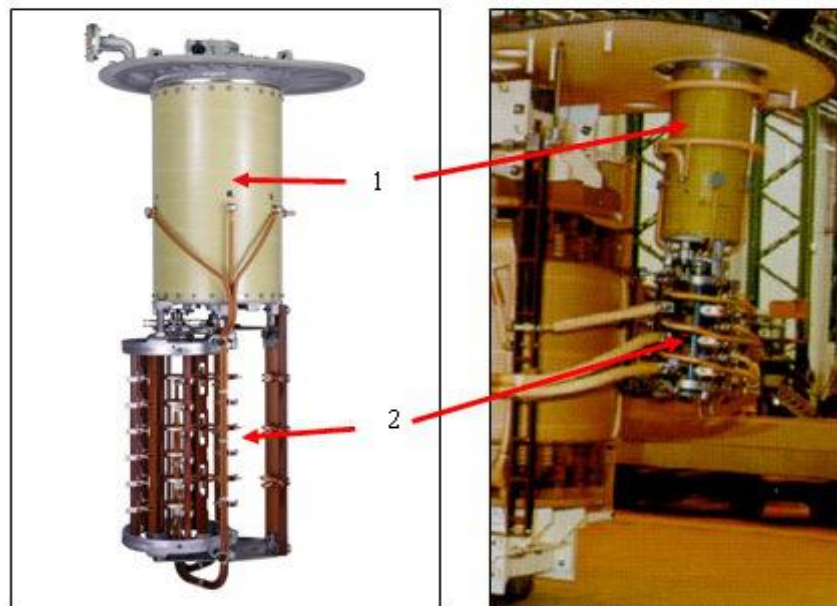
Dikarenakan aktifitas tap changer lebih dinamis dibanding dengan belitan utama dan inti besi, maka kompartemen antara belitan utama dengan tap changer dipisah.

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

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

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

Untuk mengisolasi dari bodi trafo (tanah) dan meredam panas pada saat proses perpindahan tap, maka OLTC direndam di dalam minyak isolasi yang biasanya terpisah dengan minyak isolasi utama trafo (ada beberapa trafo yang compartemennya menjadi satu dengan main tank). Karena pada proses perpindahan hubungan tap di dalam minyak terjadi fenomena listrik, mekanis, kimia dan panas, maka minyak isolasi OLTC kualitasnya akan cepat menurun. tergantung dari jumlah kerjanya dan adanya kelainan di dalam OLTC.



Gambar 2.9 OLTC Pada Transformator

Keterangan : 1. Kompartemen Diverter Switch

2. Selektor Switch

8. NGR (Neutral Grounding Resistant)

Salah satu metoda pentanahan adalah dengan menggunakan NGR. NGR adalah sebuah tahanan yang dipasang serial dengan neutral sekunder pada transformator sebelum terhubung ke ground/tanah. Tujuan dipasangnya NGR adalah untuk mengontrol besarnya arus gangguan yang mengalir dari sisi neutral ke tanah. Dan berfungsi sebagai pembatas arus dalam saluran netral trafo. Agar NGR dapat berfungsi sesuai desainnya perlu dipastikan bahwa nilai tahanan dari NGR tersebut sesuai dengan spesifikasinya dan tidak mengalami kerusakan.

Ada dua jenis NGR, Liquid dan Solid

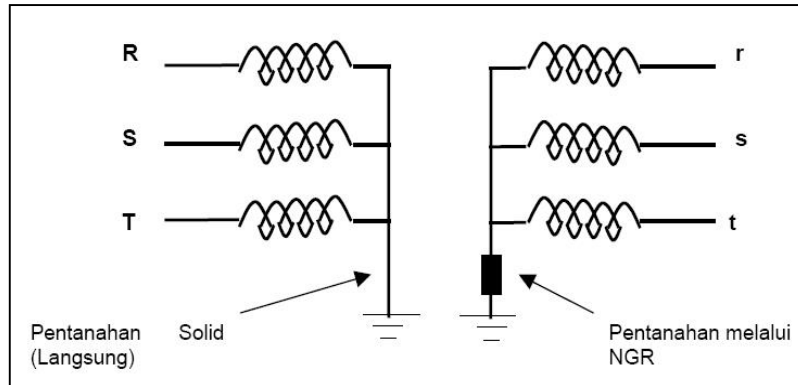
1. Liquid

berarti resistornya menggunakan larutan air murni yang ditampung didalam bejana dan ditambahkan garam (NaCl) untuk mendapatkan nilai resistansi yang diinginkan



2. Solid

Sedangkan NGR jenis padat terbuat dari Stainless Steel, FeCrAl, Cast Iron, Copper Nickel atau Nichrome yang diatur sesuai nilai tahanannya.³



Gambar 2.10 NGR Pada Transformator⁴

2.2 Gangguan Pada Transformator

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

³ PT. PLN (Persero), Buku Petunjuk Transformator Tenaga.

⁴ Dokumentasi Langsung di GI Boom Baru, 2015



Gangguan pada transformator dapat diklasifikasikan menjadi beberapa bagian diantaranya :

2.2.1 Gangguan tahap awal

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

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

2.2.2 Gangguan di luar daerah pengamannya

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

1) Gangguan beban lebih

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

Keadaan beban lebih berbeda dengan keadaan arus lebih. Pada beban lebih besar arus hanya sekitar 10% sampai dengan 59% diatas nominal dan dapat di putuskan setelah berlangsung beberapa menit. Sedang pada arus lebih besar arus mencapai beberapa kali arus nominal dan harus diputuskan secepatnya. Batas



factor pembebanan lebih (over load) dan lamanya terjadi agar batas kenaikan temperature yang diijinkan tidak terlampaui.

2) Hubung Singkat Eksternal

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

2.2.3 Gangguan di dalam daerah pengamannya

Pengaman utama transformator daya ditujukan sebagai pengaman didalam daerah pengamannya. Gangguan di dalam sangat serius dan selalu ada resiko terjadinya kebakaran karena adanya busur api yang kecil dan pemanasan lokal yang dapat disebabkan oleh penyambungan konduktor yang tidak baik, kontak-kontak listrik yang tidak baik kerusakan isolasi antara inti baut yang dapat menyebabkan kerusakan yang serius. Pada umumnya gangguan didalam dapat dideteksi dengan adanya arus atau tegangan yang tidak seimbang yang disebabkan oleh gangguan hubung singkat. Gangguan hubung singkat dapat terjadi karena diakibatkan oleh :

- 1) Gangguan satu fasa atau antar fasa pada sisi tegangan tinggi atau tegangan rendah diteminal luar.
- 2) Gangguan satu fasa atau antar fasa pada lilitan sisi tegangan atau tegangan rendah
- 3) Hubung singkat antar lilitan di sisi tegangan tinggi atau tegangan rendah. Gangguan tanah pada lilitan tersier, atau hubung singkat antar belitan di lilitan tersier.⁵

2.3 Upaya Mengatasi Gangguan

Usaha untuk mengatasi gangguan dapat dikelompokkan menjadi 2 bagian yaitu :

⁵ Hazairin Samaulah, *Dasar-Dasar Sistem Proteksi Tenaga Listrik*, 2004, Hal. 103



1. Mengurangi terjadinya gangguan

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

2. Mengurangi akibat gangguan

- a) Mengurangi besarnya gangguan dengan cara menghindari konsentrasi pembangkit mengurangi (*Short Circuit Level*).
- b) Melepaskan bagian sistem yang terganggu dengan suatu system proteksi menggunakan circuit breaker dan rele proteksi
- c) Koordinasi rele proteksi yang tepat sehingga tercipta pengaman yang selektif.
- d) Koordinasi rele proteksi yang tepat sehingga tercipta pengaman yang selektif.
- e) Memanfaatkan saluran sirkuit ganda (*double Circuit*)
- f) Menggunakan pola *Load shadding* atau sistem *Islanding*.
- g) Menggunakan tahanan pentanahan netral⁶

2.4 Dasar-Dasar Sistem Proteksi

Sistem proteksi bertujuan untuk mengidentifikasi gangguan dan memisahkan bagian yang terganggu dari bagian lain yang masih sehat sekaligus mengamankan bagian yang masih sehat dari kerusakan atau kerugian yang lebih besar. Sistem

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



proteksi terdiri dari Rele Proteksi, Transformator Arus (CT) dan atau Transformator Tegangan (PT/CVT), PMT, Catu daya yang terintegrasi dalam suatu rangkaian. Untuk efektifitas dan efisiensi, maka setiap peralatan proteksi yang dipasang harus disesuaikan dengan kebutuhan dan ancaman ketahanan peralatan yang dilindungi sebagai jaminan pengaman.

Berdasarkan daerah pengamanannya sistem proteksi dibedakan menjadi :

- Proteksi pada Generator
- Proteksi pada Transformator
- Proteksi pada Transmisi
- Proteksi pada Distribusi

Dalam sistem proteksi pembagian tugas dapat diuraikan menjadi :

- a. Proteksi utama, berfungsi untuk mempertinggi keandalan, kecepatan kerja, dan fleksibilitas sistem proteksi dalam melakukan proteksi terhadap sistem tenaga.
- b. Proteksi pengganti, Berfungsi jika proteksi utama menghadapi kerusakan untuk mengatasi gangguan yang terjadi.
- c. Proteksi tambahan, berfungsi untuk pemakaian pada waktu tertentu sebagai pembantu proteksi utama pada daerah tertentu yang dibutuhkan.

2.4.1 Perangkat sistem proteksi.

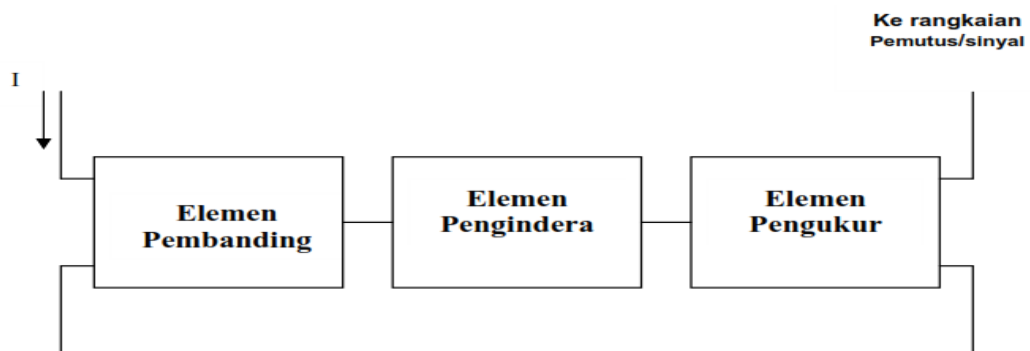
Proteksi terdiri dari seperangkat peralatan yang merupakan sistem yang terdiri dari komponen-komponen berikut :

1. Rele, sebagai alat perasa untuk mendeteksi adanya gangguan yang selanjutnya member perintah trip kepada Pemutus Tenaga (PMT).
2. Trafo arus dan/atau trafo tegangan sebagai alat yang mentransfer besaran listrik primer dari sistem yang diamankan ke Rele (besaran listrik sekunder)
3. Pemutus Tenaga (PMT) untuk memisahkan bagian sistem yang terganggu.
4. Baterai beserta alat pengisi (*bateray charger*) sebagai sumber tenaga untuk bekerjanya rele, peralatan bantu tripping.



5. Pengawatan (*wiring*) yang terdiri dari sirkit sekunder (arus dan/atau tegangan), sirkit tripping dan sirkit peralatan bantu.

Secara garis besar bagian dari Rele proteksi terdiri dari tiga bagian utama, seperti pada gambar blok diagram dibawah ini :



Gambar 2.11 Blok Diagram Rele proteksi

Masing-masing elemen/bagian mempunyai fungsi sebagai berikut :

- **Elemen pengindera.** Elemen ini berfungsi untuk merasakan besaran-besaran listrik, seperti arus, tegangan, frekuensi, dan sebagainya tergantung rele yang dipergunakan. Pada bagian ini besaran yang masuk akan dirasakan keadaannya, apakah keadaan yang diproteksi itu mendapatkan gangguan atau dalam keadaan normal, untuk selanjutnya besaran tersebut dikirimkan ke elemen pembanding.
- **Elemen pembanding.** Elemen ini berfungsi menerima besaran setelah terlebih dahulu besaran itu diterima oleh elemen pengindera untuk membandingkan besaran listrik pada saat keadaan normal dengan besaran arus kerja rele.
- **Elemen pengukur/penentu.** Elemen ini berfungsi untuk mengadakan perubahan secara cepat pada besaran ukurnya dan akan segera memberikan isyarat untuk membuka PMT atau memberikan sinyal.

2.5 Rele Proteksi



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

Secara umum rele proteksi harus bekerja sesuai dengan yang diharapkan dengan waktu yang cepat sehingga tidak akan mengakibatkan kerusakan, ataupun kalau suatu peralatan terjadi kerusakan secara dini telah diketahui, atau walaupun terjadi gangguan tidak menimbulkan pemadaman bagi konsumen. Hal ini dapat dijabarkan sebagai fungsi dan persyaratan rele pengaman seperti penjelasan berikut.

Rele proteksi adalah susunan peralatan yang direncanakan untuk dapat merasakan atau mengukur adanya gangguan atau mulai merasakan adanya ketidaknormalan pada peralatan atau bagian sistem tenaga listrik dan segera secara otomatis memberi perintah untuk memisahkan peralatan atau bagian sistem tenaga listrik dan segera secara otomatis memberi perintah untuk membuka pemutus tenaga untuk memisahkan peralatan atau bagian dari sistem yang terganggu dan memberi isyarat berupa lampu atau bel. Rele proteksi dapat merasakan atau melihat adanya gangguan pada peralatan yang diamankan dengan mengukur atau membandingkan besaran-besaran yang diteriamnya, misalnya



arus, tegangan, daya, sudut fase, frekuensi, impedansi, dan sebagainya, dengan besaran yang telah ditentukan kemudian mengambil keputusan untuk seketika ataupun dengan perlambatan waktu membuka pemutus tenaga. Pemutus tenaga umumnya dipasang pada generator, transformator daya, saluran transmisi, saluran distribusi dan sebagainya supaya masing-masing bagian sistem dapat dipisahkan sedemikian rupa sehingga sistem lain tetap dapat beroperasi secara normal.

Tugas rele proteksi juga berfungsi menunjukkan lokasi dan macam gangguannya. Dengan data tersebut memudahkan analisa dari gangguannya. Dalam beberapa hal rele hanya memberi tanda adanya gangguan atau kerusakan, jika dipandang gangguan atau kerusakan tersebut tidak segera membahayakan.

Dari uraian diatas maka rele proteksi pada sistem tenaga listrik berfungsi untuk :

- a) Merasakan, mengukur dan menentukan bagian sistem yang terganggu serta memisahkan secepatnya sehingga sistem lain yang tidak terganggu dapat beroperasi secara normal.
- b) Mengurangi kerusakan yang lebih parah dari peralatan yang terganggu.
- c) Mengurangi pengaruh gangguan terhadap bagian sistem yang lain yang tidak terganggu didalam sistem tersebut serta mencegah meluasnya gangguan.
- d) Memperkecil bahaya bagi manusia.

Untuk melaksanakan fungsi diatas maka rele pengaman harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

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

Untuk mendapatkan penyetelan yang memenuhi semua kriteria 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 rele yang baik, tetapi adakalanya masih gagal bekerja.

Hal yang menimbulkan kegagalan pengaman dapat dikelompokkan sebagai berikut :

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

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

Dengan demikian pengamanan menurut fungsinya dapat dikelompokkan menjadi :

- 1) Pengaman utama yang pada umumnya selektif dan cepat, dan malah jenis tertentu mempunyai sifat selektif mutlak misalnya rele 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 rele ini tidak seselektif pengaman utama.⁷

2.5.1 Fungsi rele proteksi

⁷ Hazairin Samaulah, *Dasar-dasar Sistem Proteksi Tenaga Listrik*, 2004, Hal 2



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

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

Fungsi yang lain dari rele pengaman adalah untuk mengetahui letak dan jenis gangguan. Sehingga dari pengamatan ini dapat dipakai sebagai pedoman perbaikan peralatan yang rusak. Biasanya data tersebut dianalisa secara efektif guna langkah pencegahan terhadap gangguan dan juga untuk mengetahui kekurangan-kekurangan apa yang ada pada sistem dan pada pengaman (termasuk rele itu sendiri).⁸

2.5.2 Klasifikasi rele proteksi

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

- Berdasarkan prinsip kerjanya
- 1. Rele Temperature (thermal relay)

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

⁸ Muhammad Taqiyyudin Alawiy, *Diktat Proteksi Sistem Tenaga Listrik*, 2006, Hal 6



2. Rele Elektromagnetik (Elektromagnetik Relay)

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

3. Rele Statis (Static Relay)

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

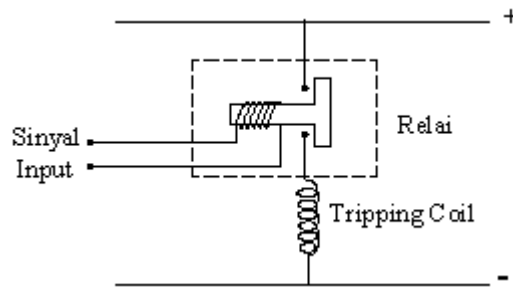
- Berdasarkan besaran ukur dan fungsinya

- 1) Rele-rele akan bekerja bila besaran ukurnya turun sampai harga tertentu. Rele jenis ini misalnya rele tegangan kurang (under voltage relay) dan rele frekuensi kurang (under frekuensi relay).
- 2) Rele-rele akan bekerja bila besaran ukurnya melebihi suatu harga tertentu, misalnya : rele arus lebih (over current relay) dan rele tegangan lebih (over voltage relay).
- 3) Rele daya adalah jenis rele besaran (directional relay) yang akan bekerja bila arah daya mengalir kesuatu arah tertentu yang tidak dikehendaki.
- 4) Rele differensial yaitu rele yang akan bekerja berdasarkan perbedaan tegangan, arus atau fasa antar dua tempat atau lebih.
- 5) Rele jarak yaitu rele yang bekerja berdasarkan pada perbandingan harga tegangan dan arus. Jadi dapat dikatakan bahwa besaran yang dideteksi adalah impedansi.⁹

2.5.3 Prinsip kerja rele proteksi

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

⁹ *Ibid*, Hal 4



Apabila rele mendapat satu atau beberapa sinyal input sehingga dicapai suatu harga *pick-up* tertentu, maka rele kerja dengan menutup kontak-kontaknya. Maka rele akan tertutup sehingga *tripping coil* akan bekerja untuk memutuskan beban.

Gambar 2.12 Prinsip Kerja Rele Proteksi

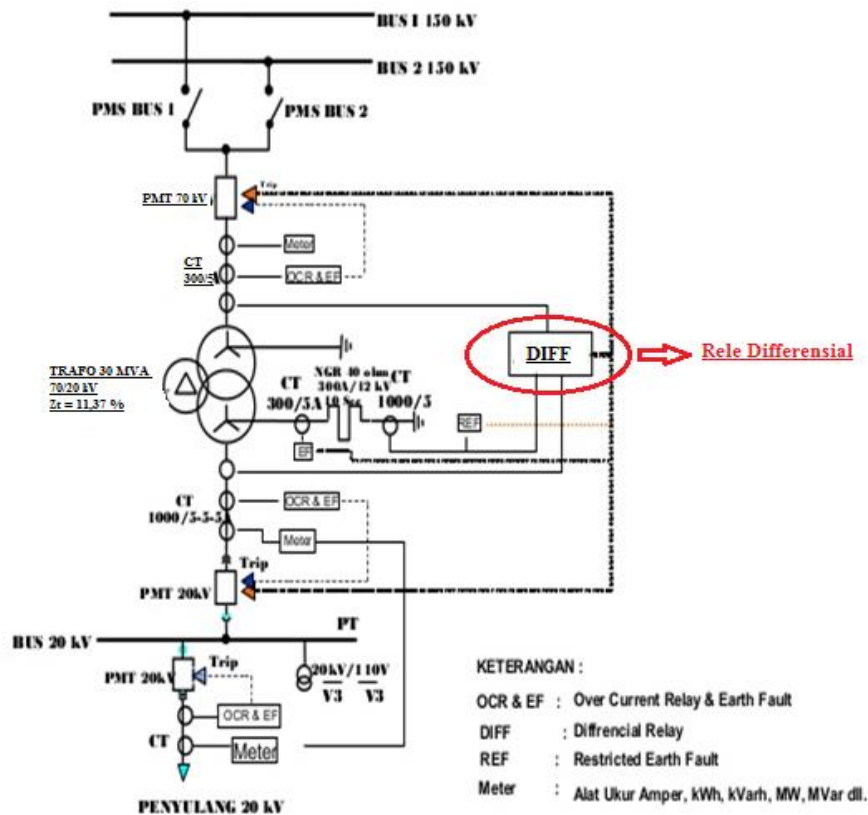
Pada keadaan ini sistem tenaga listrik akan terputus karena disebabkan oleh adanya gangguan.

2.6 Proteksi Transformator

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

Pola proteksi transformator harus dapat mengamankan transformator dari gangguan internal maupun gangguan eksternal. Untuk gangguan internal, transformator memiliki proteksi mekanik dan proteksi elektrik, sedangkan untuk gangguan eksternal transformator hanya memiliki proteksi elektrik. Peralatan proteksi yang dipergunakan berdasarkan kapasitas transformator.¹⁰

¹⁰ PT. PLN (Persero), *Buku Petunjuk Proteksi dan Kontrol Transformator*, Hal 1



Gambar 2.13 Bagan Satu Garis Proteksi Transformator

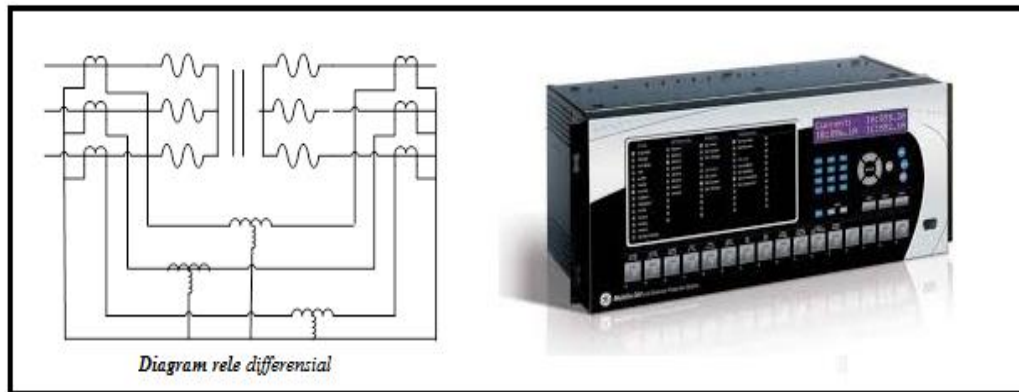
2.7 Rele Differensial

Rele differensial digunakan sebagai pengaman hubung singkat untuk transtormator daya tiga fasa ialah dimulai pada 5000 KVA ke atas, sedangkan berdasarkan standar PLN no. 51 bagian C, rele ini digunakan mulai kapasitas 30 MVA ke atas. Rele differensial mempunyai bentuk yang bermacam-macam, tergantung dari peralatan yang diamankan. sistem proteksi rele differensial secara universal dipergunakan untuk proteksi pada generator, transformator daya, busbar dan saluran transmisi ke semua system proteksi differensial tersebut berdasarkan pada prinsip keseimbangan (balance) atau membandingkan arus-arus sekunder transformator arus yang terpasang pada terminal-terminal peralatan/instalasi listrik yang diproteksi.

Sebagai prtoeksi transformator rele ini berfungsi melindungi transformator terhadap gangguan dari dalam (internal) transformator tersebut. Apabila terjadi



gangguan dalam transformator, maka timbul selisih antara arus yang masuk dan keluar dari transformator bersangkutan dan selisih arus inilah yang mengoperasikan rele differensial ini. ¹¹



Gambar 2.14 Rele Differensial

Rele differensial memberi perintah untuk membuka kedua pemutus beban dan member sinyal serta alarm, saat tidak normal/gangguan terjadi.

1. Sifat pengaman dengan rele differensial
 - a. Sangat efektif dan cepat, tidak perlu di koordinasi dengan rele lain.
 - b. Sebagai pengaman utama
 - c. Tidak dapat digunakan sebagai pengaman cadangan untuk daerah berikutnya.
 - d. Daerah pengamananya dibatasi oleh sepasang trafo arus dimana rele differensial dipasang.
2. Persyaratan pada pengaman rele differensial
 - a. CT_1 dan CT_2 harus mempunyai perbandingan transformasi yang sama, atau mempunyai perbandingan transformasi sedemikian, sehingga arus sekundernya sama.
 - b. Karakteristik CT_1 dan CT_2 sama.
 - c. Rangkaian CT ke rele harus benar.

¹¹ Djiteng Marsudi, *Pembangkitan Energi Listrik*, 2011, Hal .40

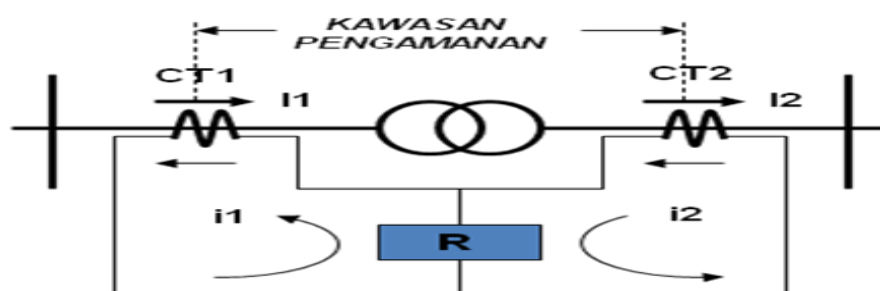


2.7.1 Prinsip kerja rele differensial

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

Prinsip kerja rele differensial adalah membandingkan vector arus I_1 (arus sisi primer) dan I_2 (arus sisi sekunder). Pada waktu tidak terjadi gangguan/keadaan normal atau gangguan berada diluar daerah pengaman I_1 dan I_2 sama atau mempunyai perbandingan sera sudut fasa tertentu, dalam hal ini rele tidak bekerja. Pada waktu terjadi gangguan di daerah pengaman I_1 dan I_2 tidak sama perbandingan serta sudut fasanya berubah dari keadaan normal disisi rele akan bekerja. Rele differensial ini bekerja berdasarkan hokum arus kirchoff 1 (*kirchodd current low 1*) yang berbunyi “arus yang masuk pada suatu titik sama dengan arus yang keluar pada titik tersebut”.

Sifat dari rele diffensial adalah sangat selektif dan cepat, tidak perlu di koordinasi dengan rele lain sebagai pengaman perlatan (*equipment*), tidak dapat digunakan sebagai pengaman cadangan untuk daerah berikutnya, daerah pengamanannya dibatasi oleh pasangan trafo arus atau dimana rele differensial di pasang. Adapun penggunaan rele differensial adalah sebagai pengaman generator, pengaman trafo daya, pengaman motor-motor lain dan pengaman saluran transmisi.¹²



Gambar 2.15 Prinsip Kerja Rele Differensial Pada Transformator Daya

Rele differensial mempunyai bentuk yang bermacam-macam, tergantung dari peralatan yang diamankan. Pengertian dari rele differensial itu sendiri mengandung unsur membedakan satu dengan lainnya, semua besaran yang masuk ke rele. Adapun prinsip kerja rele differensial ini terjadi dalam tiga keadaan yaitu :

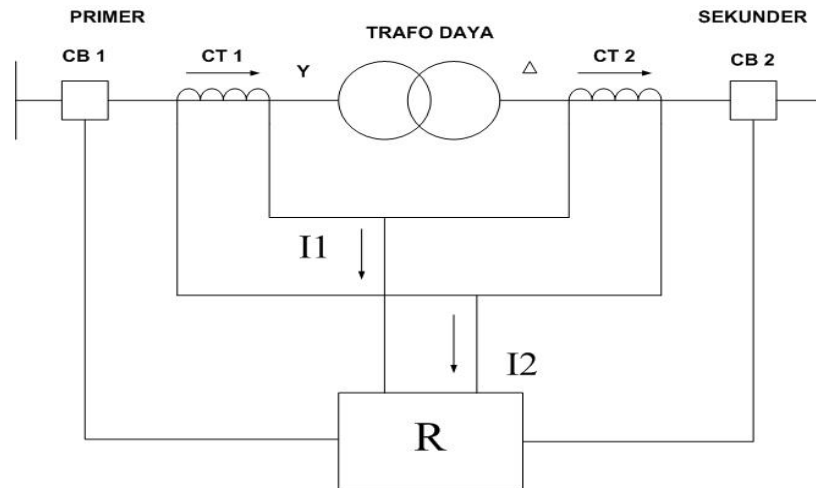
¹² Edén Napitupulu, *Relay Proteksi Jilid 5 PLN Pembangkit Jabar Jaya*, Hal 13



1. Pada keadaan normal

Dalam keadaan normal, arus mengalir melalui peralatan/instalasi listrik yang diproteksi yaitu transformator daya dan arus-arus transformator arus, yaitu I_1 dan I_2 bersirkulasi, jika rele differensial di pasang antara terminal 1 dan terminal

2. Maka dalam kondisi normal tidak akan ada arus yang mengalir melaluinya.



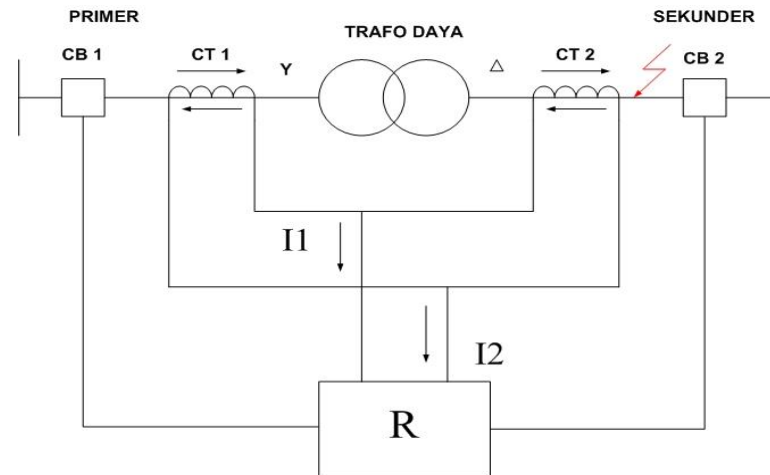
Gambar 2.16 Prinsip Kerja Rele Differensial Pada Keadaan Normal

Dimana :

- C_{B1} : circuit breaker pada sisi primer
- C_{T1} : current transformator pada sisi primer
- Y : kumparan trafo hubungan Y (bintang)
- Δ : kumparan trafo hubungan (segitiga)
- C_{B2} : circuit breaker pada sisi sekunder
- C_{T2} : current transformator pada sisi sekunder
- I_1 : arus sisi primer
- I_2 : arus sisi sekunder
- R : rele differensial

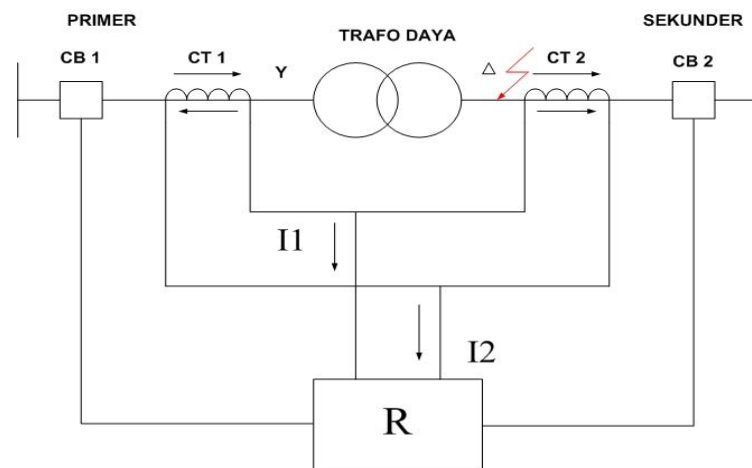
2. Pada gangguan diluar daerah proteksi

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



Gambar 2.17 Gangguan Diluar Daerah Proteksi

3. Pada gangguan di dalam daerah proteksi



Gambar 2.18 Pada Gangguan Didalam Daerah Proteksi

Jika gangguan terjadi didalam daerah proteksinya pada transformator daya yang di proteksinya *internal fault* maka arah sirkulasi arus di salah satu sisi akan terbalik, menyebabkan keseimbangan pada kondisi normal terganggu, akibatnya arus I_D akan mengalir melalui rele differensial dari terminal 1 menuju ke terminal 2 maka terjadi selisih arus didalam rele, selanjutnya rele tersebut akan mengoperasikan CB untuk memutus.

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



differensial, maka rele differensial akan bekerja dan memberikan komando *trapping* kepada circuit breaker sehingga transformator daya yang terganggu dapat diisolir dari sistem tenaga listrik.

2.7.2 Fungsi rele differensial

Pengaman rele differensial merupakan alat pengaman utama untuk mengamankan transformator daya terhadap hubung singkat salah satunya yang terjadi didalam kumparan fasa. Terjadi gangguan hubung singkat biasanya disebabkan oleh adanya kerusakan isolasi kawat. Akibat kemungkinan terjadi adalah :

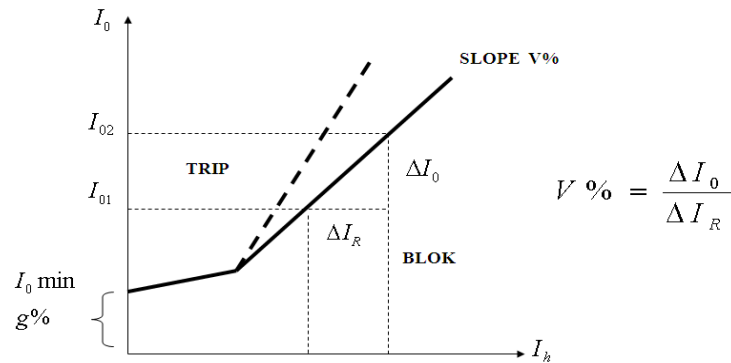
- a. Hubung singkat antara kumparan fasa satu dengan fasa yang lainnya.
- b. Hubung singkat antara masing-masing lilitan dalam satu kumparan .
- c. Hubung singkat antara satu fasa dengan tanah
- d. Hubung singkat antara kumparan sisi tegangan tinggi dengan kumparan sisi tegangan rendah.

Dari masing-masing jenis hubung singkat tersebut diatas rele pengaman, rele differensial mempunyai system rangkaian sendiri-sendiri. Diantaranya adalah pengaman rele differensial *longitudinal* yang digunakan untuk mengamankan transformator daya terhadap hubung singkat antara kumparan yang satu dengan kumparan lainnya, pengaman rele differensial untuk masing-masing lilitan membujur (*longitudinal*) merupakan system yang paling banyak dijumpai pemakaiannya dilapangan.. karena sulitnya pengaman rele differensial ini hanya dipasang pada transformator daya berkapasitas besar saja.

2.7.3 Karakteristik rele differensial

Rele differensial merupakan suatu rele yang karakteristik kerjanya berdasarkan keseimbangan (*balance*), yang membandingkan arus-arus sekunder transformator arus (*CT*) terpasang pada terminal-terminal peralatan atau instalasi listrik yang diamankan.¹³

¹³ Penggunaan rele differensial, Hal. 7



Gambar 2.19 Karakteristik Rele Differensial

2.7.4 Pemasangan rele differensial

Di dalam pemasangan rele differensial pada transformator daya, sering mengalami kesulitan ketepatan kerja rele, sehingga pada akhirnya rele akan mengalami salah kerja. Salah kerja pada rele differensial disebabkan oleh hubungan transformator daya disisi tegangan tinggi dan sisi tegangan rendah sering berbeda, sehingga terjadi ketidak seimbangan arus pada transformator.

Sehubungan dengan pemasangan rele differensial ke transformator daya, maka perlu sekali untuk mengetahui persyaratan rele differensial tersebut, yaitu:

- besar arus-arus yang masuk ke rele harus sama.
- fasa-fasa tersebut harus berlawanan.

2.7.5 Arus nominal primer dan sekunder

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

- Arus nominal pada sisi primer

$$I_{N1} = \frac{S}{V_p \cdot \sqrt{3}} \dots \dots \dots (2.1)^{14}$$

- Arus nominal pada sisi sekunder

$$I_{N2} = \frac{S}{V_p \cdot \sqrt{3}} \dots \dots \dots (2.2)^{15}$$

¹⁴ Wiajaya Mochtar, *Dasar-dasar Mesin Listrik*, Djambatan:Jakarta, 2001, Hal. 61

¹⁵ *Ibid*, Hal 61



Dimana :

- I_{N1} = arus nominal pada sisi primer
- I_{N2} = arus nominal pada sisi sekunder
- S = tegangan pada transformator daya
- V_p = tegangan pada sisi primer
- V_s = tegangan pada sisi sekunder

2.7.6 Setting kerja rele differensial

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

$$I_{SA} = \frac{I_{N1}}{K_{CT1}} \dots\dots\dots (2.3)^{16}$$

$$I_{SB} = \frac{I_{N2}}{K_{CT2}} \dots\dots\dots (2.4)^{17}$$

Dimana :

- I_{N1} = arus nominal pada sisi primer pada transformator daya
- I_{N2} = arus nominal pada sisi sekunder pada transformator daya
- I_{SA} = arus primer trafo arus CT_1 dari sisi primer transformator daya
- I_{SB} = arus sekunder trafo arus CT_2 dari sisi sekunder transformator daya
- K_{CT1} = rasio transformator arus CT_1 dari sisi primer transformator daya
- K_{CT2} = rasio transformator arus CT_2 dari sisi sekunderr transformator daya

Untuk menentukan besarnya nilai arus differensial, arus restrain (penahan), arus setting, arus penyetelan dan slope pada rele differensial menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$I_d = I_{SB} - I_{SA} \dots\dots\dots (2.5)^{18}$$

$$I_r = (I_{SB} + I_{SA}) / 2 \dots\dots\dots (2.6)^{19}$$

$$I_{setting} = Slope \times I_r \dots\dots\dots (2.7)^{20}$$

¹⁶ Wijaya Mochtar, *Dasar-dasar Mesin Listrik*, Djambatan:Jakarta, 2001, Hal. 14

¹⁷ *Ibid*, Hal 14

¹⁸ Wijaya Mochtar, *Dasar-dasar Mesin Listrik*, Djambatan:Jakarta, 2001, Hal. 17

¹⁹ *Ibid*, Hal 17



$$I_{\text{penyetelan}} = \frac{I_{\text{setting}}}{I_n} \dots\dots\dots (2.8)^{21}$$

$$\text{Slope} = \frac{I_d}{I_r} \times 100\% \dots\dots\dots (2.9)^{22}$$

Dimana :

I_d = arus differensial

I_r = arus Restrain (penahan)

I_{setting} = arus setting pada rele differensial

$I_{\text{penyetelan}}$ = arus penyetelan sebenarnya pada rele differensial

I_n = arus nominal pada rele differensial

Slope = Batas ambang kemampuan kumparan penahan

2.7.7 Menentukan persentase rele

Untuk menghitung persentase rele differensial yaitu dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\Delta = \frac{I_d}{I_{SA}} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.10)^{23}$$

2.8 Transformator Arus (CT)

Trafo arus (CT) adalah peralatan pada sistem tenaga listrik yang berupa trafo yang digunakan untuk pengukuran arus yang besarnya mencapai ratusan ampere dan arus yang mengalir pada jaringan tegangan tinggi.

Di samping untuk pengukuran arus, trafo arus juga digunakan untuk pengukuran daya dan energi. Dibutuhkan juga untuk keperluan telemeter dan rele proteksi. Kumparan primer trafo arus dihubungkan seri dengan jaringan atau peralatan yang akan diukur arusnya, sedangkan kumparan sekunder dihubungkan

²⁰ Liem EK Bien dan Dita Helna, *Studi Penyetelan Rele Differensial Pada Transformator*, 2007

²¹ *Ibid*

²² *Ibid*

²³ Wiajaya Mochtar, *Dasar-dasar Mesin Listrik*, Djambatan:Jakarta, 2001, Hal. 20



denagan meter atau rele proteksi. Pada umumnya peralatan ukur dan rele membutuhkan arus 1 atau 5A.²⁴



Gambar 2.20 Transformator Arus (CT)²⁵

Penggunaan trafo arus adalah untuk menurunkan arus yang besar pada sisi primer menjadi arus sekunder yang lebih kecil serta memisahkan sisi primer dengan sisi sekunder, trafo arus dapat bekerja dengan besar arus yang aman.

Sisi primer trafo arus hanya terdiri dari beberapa lilitan dan dihubungkan secara seri dengan system tenaga listrik, transformasi arus didapatkan dengan memberikan lilitan yang lebih banyak pada sisi sekunder. Pada trafo arus ideal besar arus sekunder yang mengalir merupakan transformasi langsung dari perbandingan.

Pada kenyataannya, arus sekunder lebih dari harga tersebut, hal ini disebabkan adanya pergeseran fasa dan kesalahan perbandingan arus. Kesalahan perbandingan arus dan kesalahan sudut fasa ini harganya tidak pernah tetap akan tetapi berubah sesuai dengan kondisi arus kerja.

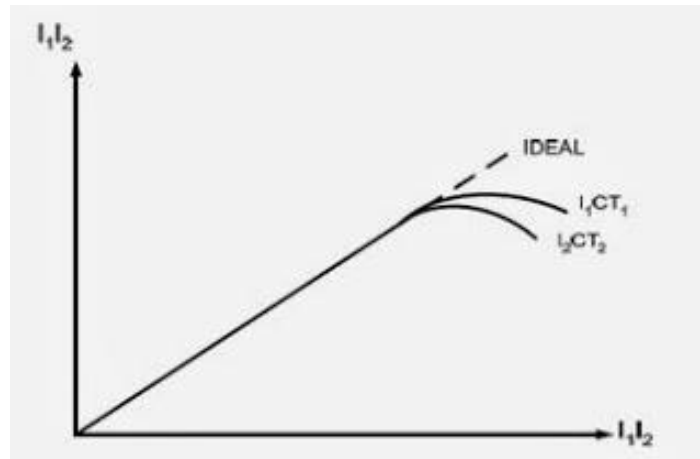
²⁴ Bonggas L. Tobing, *Peralatan Tegangan Tinggi*, 2012, Hal 117

²⁵ Dokumentasi Keadaan di Gardu Induk Boom Baru, 2015



2.8.1 Karakteristik trafo arus (CT)

Rele differensial dalam operasinya bahwa dalam keadaan normal atau terjadi gangguan di luar daerah pengamannya arus pada rele sama dengan nol.



Gambar 2.21 Karakteristik Trafo Arus (CT) Pada Rele Differensial

Karena itu kemungkinan salah kerja dari rele differensial dapat terjadi, arus yang dapat menyebabkan rele salah kerja tersebut dinamakan arus ketidakseimbangan. Bila suatu arus yang besar mengalir melalui suatu trafo arus, maka arus pada terminal sekunder tidak lagi linear terhadap arus primer.

2.8.2 Rasio trafo arus

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

Untuk memenuhi persyaratan tersebut perlu dipilih trafo arus yang sesuai untuk mendapatkan $I_1 = I_2$, tetapi kadang-kadang hal ini tidak selalu dapat dilakukan hanya dengan trafo arus karena rasio perbandingan transformasi telah dibuat standar pada arus-arus tertentu, sehingga apabila terdapat perbedaan dengan hasil perhitungan, maka diambil harga standar yang mendekati selisih 11



dan 12 tidak jauh berbeda jika terlalu besar maka diperlukan trafo arus bantu untuk menyamakan selisih ini.

Untuk menentukan rasio trafo arus dapat ditentukan besar rasio transformasinya :

$$KCT_1 = \frac{Ip_1}{Ip_2} \dots\dots\dots (2.11)^{26}$$

$$KCT_2 = \frac{Is_1}{Is_2} \dots\dots\dots (2.12)^{27}$$

Dimana :

KCT_1 = Rasio transformator CT_1 dari sisi primer transformator daya

KCT_2 = Rasio transformator CT_2 dari sisi sekunder transformator daya

Ip_1 = Trafo arus CT_1 primer pada sisi masukan (arus yang masuk)

Ip_2 = Trafo arus CT_1 sekunder pada sisi keluaran (arus yang keluar)

Is_1 = Trafo arus CT_2 primer pada sisi masukan (arus yang masuk)

Is_2 = Trafo arus CT_2 sekunder pada sisi keluaran (arus yang keluar)

Bila kedua arus I_1 dan I_2 ini sudah sama maka tidak diperlukan lagi trafo arus bantu, tetapi bila arus-arus ini belum sama, maka harus disamakan dengan menggunakan trafo arus bantu.

2.9 Pemutus Tenaga (PMT)

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

²⁶ Eden Napitupulu, *Relay Proteksi Jilid 5 PLN Pembangkit Jabar Jaya*, Hal 18

²⁷ *Ibid*, Hal. 18



secara otomatis hanya dapat memutuskan rangkaian sistem tenaga listrik sesuai syarat (sinyal) yang diberikan oleh rele.



Gambar 2.22 Pemutus Tenaga (PMT)²⁸

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

- a. Mampu menyalurkan arus maksimum sistem tenaga listrik secara kontinu.
- b. Mampu memutuskan dan menghubungkan jaringan dalam keadaan berbeban maupun dalam keadaan gangguan hubung singkat tanpa menimbulkan kerusakan pada pemutus tenaga itu sendiri.
- c. Dapat memutuskan arus hubung singkat dengan sangat cepat agar arus hubung singkat tidak sampai merusak peralatan sistem, membuat sistem kehilangan kestabilan dan merusak pemutus tenaga itu sendiri.²⁹

Berikut ini adalah jenis-jenis pemutus tenaga :

A. Air Circuit Breaker (ACB)

Jenis ini menggunakan metode yang paling sederhana, yaitu memperpanjang lintasan busur api. Karena efek pemanjangan lintasan ini diharapkan busur api dapat segera dipadamkan. Biasanya dipakai untuk *indoor* (dalam *switchgear*) untuk level tegangan 4.16kV dan 13.8kV.

²⁸ Dokumentasi Keadaan di Gardu Induk Boom Baru, 2015

²⁹ CarlosR. Sitompul, *Diktat Praktikum Sistem Proteksi*, Hal 6



B. Oil Circuit Breaker (OCB)

Pada CB jenis ini, ketika kontak terbuka, busur api akan terjadi dengan media sekitar berupa minyak sehingga minyak menguap dan menimbulkan gelembung gas yang menyelubungi busur api di antara kontak. Gelembung ini membuat minyak terdekomposisi sehingga menimbulkan gas hidrogen yang menghambat busur api. Dengan adanya media minyak ini, diharapkan busur api dapat segera dipadamkan. Secara fisik bentuknya paling besar diantara jenis CB yang lain dan dicirikan dengan adanya tangki-tangki yang di dalamnya terdapat minyak.

C. Vacuum Circuit Breaker (VCB)

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

D. SF₆ CB (Sulfur Circuit Breaker)

SF₆ CB adalah pemutus rangkaian yang menggunakan gas SF₆ sebagai sarana pemadam busur api. Gas SF₆ merupakan gas berat yang mempunyai sifat dielektrik dan sifat memadamkan busur api yang baik sekali. Prinsip pemadaman busur apinya adalah Gas SF₆ ditiupkan sepanjang busur api, gas ini akan mengambil panas dari busur api tersebut dan akhirnya padam. Rating tegangan CB adalah antara 3.6 KV – 760 KV. Saat kontak terbuka dan busur api muncul, gas SF₆ bertekanan tinggi ditiupkan di antara kontak untuk menyingkirkan partikel bermuatan dari sela antara kedua kontak sehingga



membuat busur api semakin cepat padam. Gas SF₆ dipilih karena sifat gas ini yang merupakan bahan isolasi dan pendingin yang baik.³⁰

2.10 Pengertian Gangguan

Gangguan adalah setiap ketidak normalan pada suatu sistem tenaga listrik yang berakhir dengan pembukaan PMT. Dikecualikan pembukuan PMT oleh operator atau kesalahan manusia. Gangguan pada sistem tenaga listrik dapat terjadi di pembangkit, jaringan transmisi, atau jaringan distribusi. Dimanapun gangguan itu terjadi sistem proteksi yang baik harus dapat mengidentifikasi dan memisahkan bagian yang terganggu secepat mungkin dari bagian lainnya serta dapat menghindarkan kerusakan yang dapat menimbulkan kerugian yang lebih besar. Dalam sistem tenaga listrik sistem pengamanan dibagi dalam bagian-bagian yang dibatasi oleh pemutus tenaga (PMT). Setiap bagian diamankan oleh rele pengaman dan setiap rele pengaman mempunyai daerah pengaman (zone protection) masing-masing yaitu daerah dimana bila terjadi gangguan di dalamnya rele ini dapat merasakan dan rele ini dengan bantuan sistem yang lainnya. Daerah pengaman (zone protection) mempunyai daerah yang saling tumpang tindih (*overlapping*) antara daerah pengaman yang satu dengan sebelahnya, sebab kalau tidak akan terjadi daerah kosong (*gap*), yaitu daerah dimana tidak ada rele bekerja jika terjadi gangguan atau biasa disebut zona mati (*dead zone*). Gangguan di daerah *overlapping* akan dirasakan oleh rele bersamaan sehingga koordinasi waktu kerja antara keduanya sangat penting untuk diperhatikan.

2.10.1 Macam-macam gangguan

Karena transformator di Gardu Induk pada umumnya berhubungan dengan dengan rel dan rel langsung berhubungan dengan saluran transmisi kebanyakan adalah saluran udara yang jumlah gangguannya relatif tinggi, maka kemungkinan bahwa transformator mendapat gangguan

³⁰ Nathan Sitohang, *Perlengkapan Stl di Gardu Induk*, 2013



yang disebabkan oleh gangguan disalurkan transmisi adalah lebih besar dari pada generator. Petir yang banyak menyambar saluran udara kemudian menuju transformator. Tetapi sebelum sampai transformator terlebih dulu dipotong oleh lightning arrester (LA). Walaupun gelombang petir ini telah diperhatikan terhadap gelombang petir yang terpotong, namun hal ini tetap menimbulkan stress didalam isolasi transformator. Apabila pemotongan gelombang ini oleh lightning arrester kurang sempurna maka gelombang petir ini bisa lebih besar yang sampai di transformator dan dapat menjebolkan isolasi lilitan transformator dan akhirnya menimbulkan gangguan transformator. Gangguan ini merupakan gangguan didalam transformator yaitu apabila disebabkan hubung singkat didalam lilitan transformator, walaupun hubung singkat ini sesungguhnya disebabkan oleh gangguan diluar transformator (petir) yang merambat kedalam transformator. Proses tersebut diatas mungkinjuga tidak bersifat seketika artinya tidak seketika ada petir yang menyambar saluran udara, lalu transformator yang arresternya kurang baik mengakibatkan isolasinya langsung jebol. Hal ini terjadi dikarenakan arrester bekerja kurang baik.

Untuk menghindari hal tersebut diatas maka pada transformator yang berukuran besar dipasang rele, baik rele utama maupun rele cadangan. Sedangkan untuk transformator distribusi yang daya terpasangnya relatif lebih kecil, hanya diamankan dengan sekering lebur. Hal ini disebabkan karena untuk memasang rele differensial memerlukan investasi tambahan yang tidak sedikit nilainya

2.10.2 Gangguan tegangan lebih

Beban lebih mungkin tidak tepat disebut gangguan, namun beban lebih adalah suatu keadaan abnormal yang apabila dibiarkan terus menerus dapat membahayakan peralatan karena beban lebih dapat menyebabkan panas yang berlebihan sehingga dapat mempercepat proses penuaan peralatan. Gangguan tegangan lebih dapat dibedakan :

1. Tegangan lebih dengan power frekuensi. Tegangan ini dapat terjadi karena :



- Over speed pada generator karena kehilangan beban.
 - Gangguan pada AVR generator.
2. Tegangan lebih transient. Tegangan ini dapat dibedakan :
- Surja petir yaitu tegangan yang disebabkan oleh sambaran petir yang mengenai suatu peralatan listrik.
 - Surja hubung yaitu tegangan yang disebabkan oleh hubung singkat atau bekerjanya circuit breaker yang dapat menyebabkan tegangan transient yang tinggi.

2.10.3 Gangguan hubung singkat

Gangguan hubung singkat (yang mungkin terjadi pada setiap titik didalam sistem) yang diketahui terutama adalah besarnya arus gangguan hubung singkat pada setiap cabang (bisa di transmisi, distribusi, trafo maupun sumber pembangkit) disamping perlu diketahuinya pula besar tegangan pada setiap Node. Besar arus dan atau tegangan hasil analisa inilah yang diperlukan oleh *engineer* proteksi untuk penyetelan proteksi, sehingga bila gangguan hubung singkat itu benar-benar terjadi didalam sistem, peralatan proteksi dapat bekerja mengamankan bagian sistem yang terganggu sesuai yang diharapkan. Karena setiap gangguan menyebabkan mengalirnya arus yang tidak seimbang dalam sistem metode komponen-komponen berguna sekali dalam suatu analisis untuk menentukan arusa dan tegangan di semua bagian setelah terjadinya gangguan.

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

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

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



$$I = \frac{V}{Z} \dots\dots\dots (2.13)^{31}$$

Dimana :

I = Arus yang mengalir pada hambatan Z.

V = Tegangan sumber (Volt).

Z = Impedansi

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

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

Z untuk gangguan 3 fasa $Z = Z_1$

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

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

Dimana,

Z_1 = Impedansi urutan positif

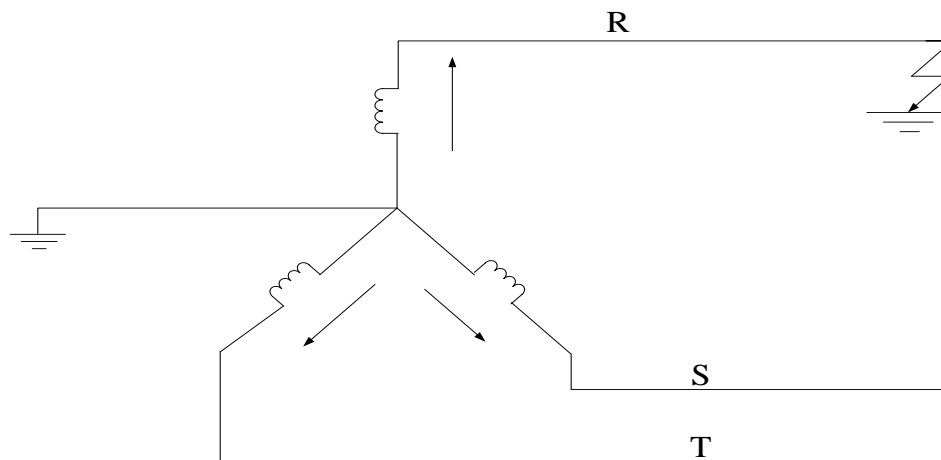
Z_2 = Impedansi urutan negative

Z_0 = Impedansi urutan nol

1. Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah

Kemungkinan terjadinya gangguan satu fasa ke tanah adalah *back flashover* antara tiang ke salah satu kawat transmisi dan distribusi. Sesaat setelah tiang tersambar petir yang besar walaupun tahanan kakiw tiangnya cukup rendah namun bias juga gangguan fasa ke tanah ini terjadi sewaktu salah satu kawat fasa transmisi / distribusi tersentuh pohon yang cukup tinggi dll.

³¹ Wahyudi Sarimun, *Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik*, Garamond, 2012, Hal 90



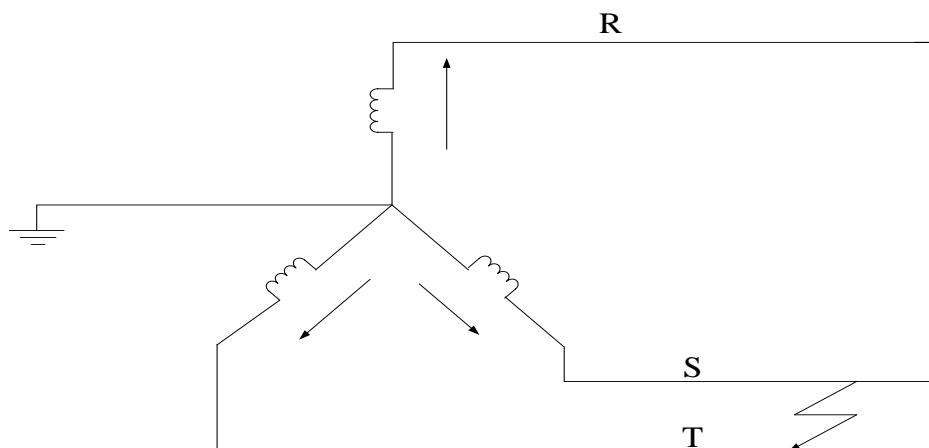
Gambar 2.23 Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa Ke Tanah

Besar gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah :

$$I_{hs1\phi} = \frac{V}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \dots\dots\dots (2.14)^{32}$$

2. Gangguan hubung singkat dua fasa

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



Gambar 2.24 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa

³² A.Arismunandar dan S.Kuwahara, *Teknik Tenaga Listrik Jilid 2* , 1997, Hal 73



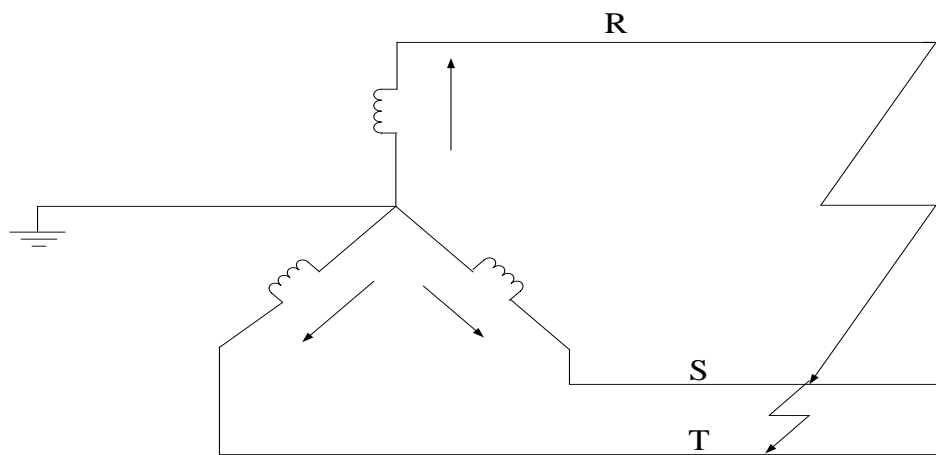
Besarnya gangguan hubung singkat dua fasa :

$$I_{hs2\phi} = \frac{V}{Z_1 + Z_2} \dots\dots\dots (2.15)^{33}$$

3. Gangguan hubung singkat tiga fasa

Gangguan tiga fasa adalah gangguan dalam sistem tenaga listrik yang jarang terjadi, tetapi dalam analisisnya harus tetap diperhitungkan.

Diagram rangkaian untuk suatu gangguan tiga fasa dengan asumsi gangguan terjadi pada semua fasa (a, b, dan c)



Gambar 2.23 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa

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

$$V_{(PU)} = \frac{KV \text{ sebenarnya}}{KV \text{ dasar}} \dots\dots\dots (2.16)^{34}$$

Dimana :

$V_{(PU)}$ = Tegangan sisi primer dan sisi sekunder pada transformator daya

$KV_{\text{sebenarnya}}$ = Tegangan sebenarnya pada sisi primer dan sisi sekunder

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

³³A.Arismunandar dan S.Kuwahara, *Teknik Tenaga Listrik Jilid 3*,1997, Hal 73

³⁴ *Ibid*, Hal. 73



Untuk menghitung arus hubung singkat tiga fasa, satuan tegangan diubah dalam satuan per unit (pu). Definisi satuan per unit (pu) untuk suatu kuantitas tersebut dengan nilai dasarnya yang dinyatakan dalam decimal. Perbandingan (ratio) dalam persentase adalah 100 kali nilai dalam per unit (pu). Gangguan hubung singkat tiga fasa tersebut dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

- Arus hubung singkat dalam satuan per unit (pu) yaitu :

$$I_{hs3\phi} (pu) = \frac{V(pu)}{Z(pu)} \dots\dots\dots (2.17)^{35}$$

- Arus hubung singkat tiga fasa sebenarnya yaitu :

$$I_{hs3\phi} = I_{hs3\phi} (pu) \times I_N \dots\dots\dots (2.18)^{36}$$

Dimana :

V(pu) = Tegangan dalam satuan per unit (pu)

Z(pu) = Impedansi Transformator (pu)

$I_{hs3\phi} (pu)$ = Arus hubung singkat dalam satuan per unit (pu)

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

I_N = Arus nominal pada sisi primer dan sisi sekunder

Gangguan ini dapat dideteksi karena akan timbul arus maupun tegangan yang tidak normal atau tidak seimbang. Dalam gangguan hubung singkat, banyak ditujukan pada gangguan tiga fasa dan satu fasa ke tanah. Hal ini dilakukan karena hubung singkat tiga fasa menghasilkan arus gangguan yang besar, sedangkan hubung singkat satu fasa ke tanah merupakan gangguan yang sering terjadi.

Gangguan hubung singkat tiga fasa dan gangguan dua fasa digunakan untuk menentukan setting rele-rele proteksi gangguan fasa sedangkan gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah digunakan untuk setting rele-rele proteksi gangguan hubung tanah.

³⁵ William Stevenson, *Analisa system tenaga listrik*, 1983, Hal. 29

³⁶ *Ibid*, Hal. 29