

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

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

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

arus dari dua trafo-arus. Kerja rele diferensial ada gangguan di luar daerah yang dilindungi dan gangguan di dalam daerah yang dilindungi.

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

ANALISIS PENGGUNAAN RELE DIFFERENSIAL SEBAGAI SISTEM PROTEKSI PADA TRANSFORMATOR DAYA 16 MVA DI GARDU INDUK JAJAR, Abstrak oleh : Nor Ria Fitriani, Alumni Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Surakarta

Transformator daya pada sistem transmisi merupakan komponen utama yang sangat penting, maka dari itu transformator daya harus dilindungi dari adanya gangguan-gangguan yang dapat menyebabkan kehandalannya berkurang. Gangguan tersebut dapat dikurangi dan diatasi dengan menggunakan sistem proteksi. Sistem proteksi merupakan suatu pengamanan yang memberikan proteksi terhadap peralatan listrik pada kondisi yang tidak normal. Salah satu perangkat proteksi yang digunakan transformator daya adalah rele diferensial. Rele diferensial digunakan sebagai proteksi utama dan tidak dapat dijadikan sebagai proteksi cadangan. Rele ini bekerja dengan membandingkan arus yang masuk dan arus yang keluar. Rele akan mendeteksi adanya gangguan dan menginstruksikan pemutus tenaga (PMT) untuk membuka (*trip*). Sistem proteksi yang baik ditunjang oleh *setting* yang tepat pada rele diferensial guna mencegah terjadinya kegagalan proteksi dan meningkatkan kehandalan dari sistem transmisi. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah pengambilan data sekunder dengan melakukan penelitian di *Base Camp* Surakarta dan mencari referensi-referensi jurnal yang berkaitan

dengan penelitian tersebut. Seluruh data didapat kemudian digunakan sebagai komponen perhitungan matematis secara manual. Komponen yang dihitung yaitu nilai rasio *current transformer* (CT), *error mismatch* dan parameter - parameter pada rele diferensial saat kondisi normal. Kemudian menghitung nilai parameter rele pada saat gangguan. Rasio CT yang dipasang pada transformator disisi tegangan tinggi adalah 75:1 A dan pada sisi tegangan rendah adalah 800:1 A. Hasil tersebut diambil dengan pertimbangan hasil perhitungan arus rating yaitu sebesar 67,749 A pada sisi tegangan tinggi dan 461,879 A pada sisi tegangan rendah. Arus setting yang didapat dari hasil perhitungan yaitu 0,3 A dan diharapkan dengan *setting* tersebut sistem proteksi transformator dapat bekerja dengan optimal.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Transformator Tenaga

Transformator tenaga adalah suatu peralatan listrik statis yang berfungsi untuk menyalurkan tenaga listrik sekaligus mengubah tegangannya, menaikkan tegangan atau menurunkan tegangan. Transformator tenaga pada Gardu Induk Pembangkit berfungsi untuk menyalurkan tenaga listrik yang dibangkitkan oleh pembangkit ke rel tegangan tinggi pada Gardu Induk, sehingga transformator tenaga pada gardu induk pembangkit merupakan transformator penaik tegangan, sedangkan transformator tenaga pada gardu induk beban berfungsi menyalurkan tenaga listrik sekaligus menurunkan tegangan dari tegangan tinggi ke tegangan menengah, sehingga transformator tenaga pada gardu induk beban merupakan trafo tenaga penurun tegangan. Begitu juga transformator distribusi yang berfungsi untuk menurunkan tegangan dari tegangan menengah ke tegangan rendah.

Kumparan primer adalah kumparan yang menerima daya dan dinyatakan sebagai tterminal masukan dan kumparan keluar. Kedua kumparan dibelit pada suatu inti yang terdiri atas material *magnetic* berlaminasi. Secara sederhana, transformator tenaga dapat dibagi menjadi 3 bagian, yaitu lilitan primer, lilitan sekunder, dan inti besi.

Kumparan primer merupakan bagian transformator tenaga yang terhubung dengan sumber energi (catu daya). Kumparan sekunder merupakan bagian transformator tenaga yang terhubung dengan rangkaian beban. Sedangkan inti besi merupakan bagian transformator tenaga yang berfungsi untuk mengarahkan keseluruhan fluks magnet yang dihasilkan oleh kumparan primer agar masuk ke kumparan sekunder.

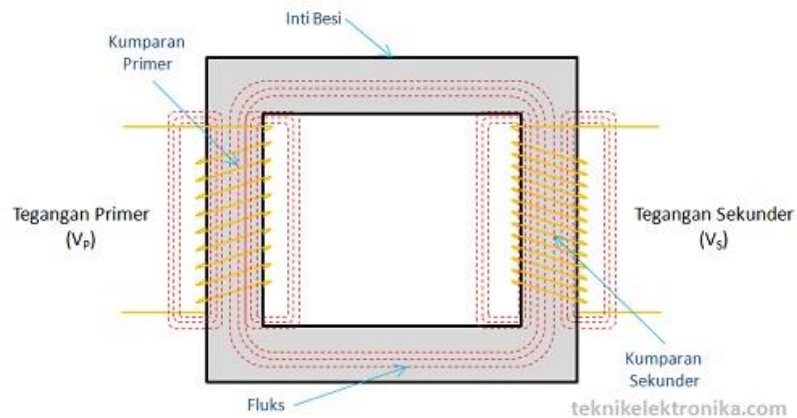


Gambar 2.1 Contoh Trafo Daya

2.2.1.1 Prinsip kerja Trafo Tenaga

Transformator terdiri dari dua kumparan kawat yang terpisah satu sama lain, yang dibelitkan pada inti yang sama. Untuk 2 belitan terdiri dari primer dan sekunder. Sedangkan untuk 3 belitan, terdiri dari primer, sekunder dan tertier. Untuk transformator tenaga 1 fasa, sisi primer dan sisi sekunder mempunyai 1 kumparan, sedangkan untuk 3 fasa, masing – masing sisi primer dan sisi sekunder maupun tertier mempunyai 1 kumparan. Hubungan kumparan pada sisi primer dan sisi sekunder maupun sisi tertier disebut dengan *vector group*. Sebagai contoh transformator tenaga dengan *vector group* Y – tanah, Y – tanah – Δ , yang berarti hubungan kumparan fasa R – S – T merupakan hubungan Y dengan netral ditanahkan, begitu juga untuk sisi sekunder sedangkan pada sisi tertier hubungan antara fasa R – S – T merupakan hubungan Δ .

Rangkaian listrik sisi primer secara elektrik tidak terhubung dengan rangkaian listrik sisi sekunder, tetapi terhubung secara elektromagnetis / terhubung secara fluks magnets. Prinsip dasar pembangkitan GGL pada sisi sekunder pada transformator 1 fasa dapat dijelaskan melalui gambar 2.2.



Gambar 2.2 prinsip kerja transformator

Keterangan gambar :

V_p : tegangan primer

V_s : tegangan sekunder

I_p : arus primer

I_s : arus sekunder

E_p : GGL induksi pada kumparan primer

E_s : GGL induksi pada kumparan sekunder

N_p : lilitan primer

N_s : lilitan sekunder

Φ : fluks magnet bersama

Z : beban

$$V_p = N_p \times \frac{d\Phi_p}{dt}$$

$$V_s = N_s \times \frac{d\Phi_s}{dt}$$

Dimana,

Φ_p : flux magnetis yang diabangkitkan oleh arus primer I_p

Φ_s : flux magnetis yang diabangkitkan oleh arus primer I_p

Jika pada inti besi tidak ada fluks bocor $\rightarrow \Phi_p = \Phi_s \rightarrow \frac{d\Phi_p}{dt} = \frac{d\Phi_s}{dt} = \frac{d\Phi}{dt}$

$$\text{Maka, } \frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p \times \frac{d\Phi_p}{dt}}{N_s \times \frac{d\Phi_s}{dt}} = \frac{N_p \times \frac{d\Phi}{dt}}{N_s \times \frac{d\Phi}{dt}} = a$$

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = a \rightarrow V_s = \frac{1}{a} V_p$$

Dari rumus $V = N \frac{d\phi}{dt}$, GGL akan timbul jika $\frac{d\phi}{dt} \neq 0$, ini berarti ϕ berubah terhadap waktu (t).

Jika pada sisi sekunder tidak bebani $\rightarrow I_s = 0$, sedangkan pada sisi primer diberi tegangan, maka sisi sekunder akan timbul GGL, $V_s = \frac{V_p}{a}$

Jika pada sisi sekunder dibebani dengan impedansi Z_L , maka pada sisi sekunder akan timbul arus I_s . Untuk transformator ideal, rugi – rugi inti besi dan rugi – rugi tembaga dianggap = 0.

Maka $|S_p| = |S_s|$

$|V_p| |I_p| = |V_s| |I_s|$

Dari rumus : $\frac{V_p}{V_s} = a \rightarrow V_s = \frac{1}{a} V_p$

Maka untuk transformator tenaga penaik tegangan (*step up*), di GI pembangkit.

Maka, $a < 1$.

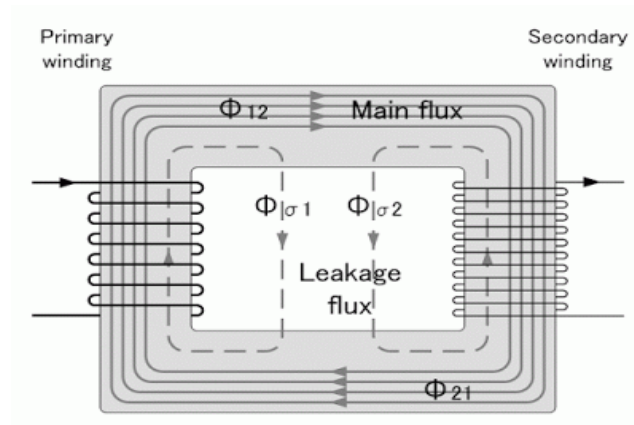
Sedangkan, untuk transformator tenaga penurun tegangan (*step down*) pada GI beban / GI distribusi, maka $a > 1$.

2.2.2.1 Komponen pada Transformator Tenaga

Transformator tenaga pada umumnya memiliki sembilan komponen penting baik dibagian dalam maupun dibagian luarnya. Dibawah ini kesembilan komponen tersebut dijelaskan sesuai definisi dan fungsinya. Penjelasan komponen pada trafo tenaga dibawah ini bersumber dari buku PT. PLN (Persero) yang disusun oleh Miftahurozaq (2014). Berikut penjelasannya:

1. Inti besi

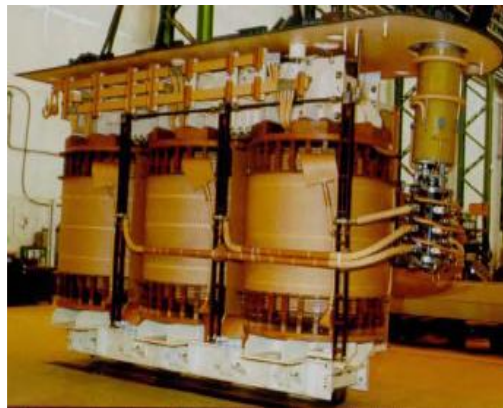
Inti besi berfungsi untuk mempermudah jalan fluksi, yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Dibuat dari lempengan-lempengan besi tipis yang berisolasi, untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh arus pusar atau *eddy current*.



Gambar 2.3 inti besi

2. Kumparan transformator

Kumparan transformator adalah beberapa lilitan kawat berisolasi membentuk suatu kumparan atau gulungan. Kumparan tersebut terdiri dari kumparan primer dan kumparan sekunder yang diisolasi baik terhadap inti besi maupun terhadap antar kumparan dengan isolasi padat.



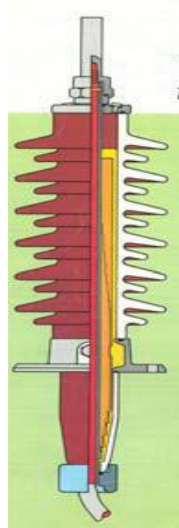
Gambar 2.4 kumparan transformator

3. Minyak transformator

Minyak transformator adalah bahan isolasi cair yang dipergunakan sebagai pendingin dan isolasi pada trafo. Untuk bahan isolasi, minyak ini harus mempunyai kemampuan dalam menahan tegangan tembus dan untuk sebagai pendingin minyak trafo harus mampu meredam panas yang ditimbulkan. Minyak trafo cair ini dari pemurnian minyak mentah. ada beberapa bahan – bahan organik yang menghasilkan minyak trafo tersebut seperti minyak piranol, silicon, diala A, diala B dan mectrans.

4. Bushing

Bushing yaitu sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator merupakan alat penghubung antara kumparan transformator dengan jaringan luar. *Bushing* juga berfungsi sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan tangki transformator.



Gambar 2.5 *Bushing*

5. Tangki konservator

Fungsi dari tangki konservator ini adalah sebagai penampung minyak cadangan dan uap/udara akibat dari pemanasan transformator karena arus beban. Terdapat relay *bucholz* yang terpasang pada tangki konservator yang berfungsi sebagai penyerap gas akibat kerusakan minyak.

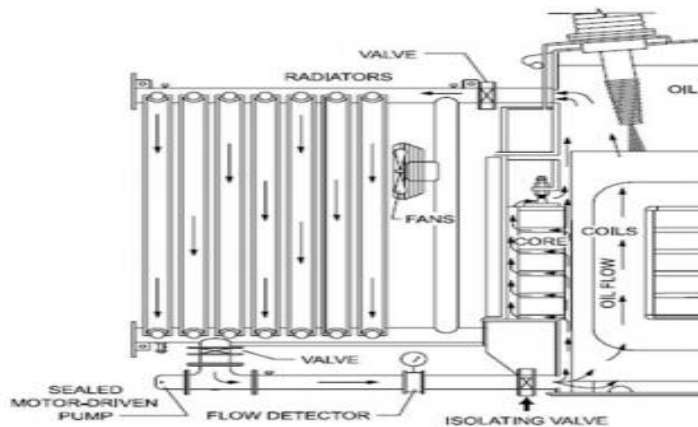


Gambar 2.6 Tangki Konservator

6. Pendingin Trafo

Pada dasarnya akan timbul panas akibat rugi-rugi tembaga pada inti besi dan kumparan-kumparan. Panas yang berlebihan akan merusak isolasi, maka dari itu untuk mengurangi kenaikan suhu yang berlebihan pada trafo tenaga dibutuhkan sistem pendinginan untuk menyalur panas keluar dari trafo. Sistem pendingin ini berupa udara/gas, minyak dan air.

Adapun sistem pending yang secara alami, dilihat dari bentuk trafo tenaganya yang mana terdapat sirip-sirip yang berfungsi mempercepat pendinginan. Bila diinginkan lebih cepat lagi sistem pendinginnya bisa dengan cara memompa sirkulasi minyak, udara dan air, cara seperti ini disebut pendinginan paksa.



Gambar 2.7 Pendingin pada Trafo

7. Tap changer

Tap changer berfungsi Pada saat penyaluran tenaga listrik sering terjadi penurunan tegangan yang berakibat menurunnya kualitas tegangan listrik, maka dari itu dibutuhkan alat untuk menjaga tegangan agar tetap stabil. *Tap changer* dipasang pada trafo untuk menstabilkan tegangan yang keluar pada trafo tenaga. *Tap changer* dipasang pada sisi primer trafo, untuk jumlahnya tergantung pada perancang dan perubahan tegangan pada jaringan.



Gambar 2.8 *Tap changer* pada trafo

8. Alat pernapasan (silikagel)

Alat pernapasan (silikagel) bekerja karena adanya pengaruh naik turunnya beban transformator maupun suhu udara luar, maka suhu minyak akan berubah-ubah mengikuti keadaan tersebut. Bila suhu minyak tinggi, minyak akan memuai dan mendesak udara di atas permukaan minyak keluar dari dalam tangki, sebaliknya bila suhu minyak turun, minyak menyusut maka udara luar akan masuk ke dalam tangki. Kedua proses di atas disebut pernapasan transformator. Permukaan minyak transformator akan selalu bersinggungan dengan udara luar yang menurunkan nilai tegangan tembus pada minyak transformator, maka untuk mencegah hal tersebut, pada ujung pipa penghubung udara luar dilengkapi tabung berisi kristal zat *hygroscopic* sesuai dengan gambar 2.9.



Gambar 2.9 Alat pernapasan (silikagel)

9. Indikator

a. *Thermometer*

Alat ini berfungsi sebagai pengukur tingkat panas pada trafo daya baik itu kondisi pada kumparan primer dan sekunder atau pada minyak isolasi. Alat ini tersambung pada tabung pemuaian dan beberapa *thermometer* dikombinasikan dengan trafo arus, yang terpasang pada salah satu fasa dan dengan demikian dapat menyebabkan nilai relatif pada panas yang terjadi.

b. Level oil indikator

Fungsi dari alat ini yaitu menunjukkan tinggi permukaan minyak pada tangki. Ada beberapa jenis yang menunjukkan langsung dengan cara memasang gelas penduga pada salah satu sisi konservator untuk mengetahui level minyak. Ada pula yang dirancang sesuai kebutuhan dengan melengkapinya semacam balon yang elastis dan diisi udara, sehingga dapat diketahui pemuaian dan penyusutan minyak dan udara yang masuk ke dalam balon.

2.2.1.3 Fungsi Transformator Tenaga dalam Sistem Tenaga Listrik

Kebutuhan manusia akan listrik mengalami peningkatan yang sangat pesat seiring kemajuan teknologi. Peningkatan kebutuhan listrik dapat dilihat dari pembangunan pembangkit - pembangkit baru, gardu induk baru, dan lain sebagainya. Semua yang dilakukan untuk memenuhi kebutuhan manusia akan listrik. Maka dari itu manusia sangat membutuhkan listrik untuk kehidupan sehari-hari. Tanpa listrik manusia akan mengalami keterlambatan di berbagai bidang dan kesulitan dalam menjalani hidup.

Karena melihat begitu pentingnya listrik maka keandalan dalam penyaluran daya listrik ke konsumen harus baik. Dalam penyaluran daya listrik diperlukan transformator daya untuk mengubah daya atau energi listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya. Dalam sistem tenaga listrik transformator dapat dikatakan sebagai jantung dari sistem pembangkit ke transmisi ke sistem distribusi. Sebagai salah satu peranan transformator adalah penggunaan transformator daya pada sistem pembangkit dan sistem transmisi, sedangkan transformator distribusi pada sistem distribusi.

Transformator merupakan faktor terpenting dalam sistem tenaga listrik. Dalam kondisi ini suatu transformator diharapkan dapat beroperasi secara maksimal. Mengingat peranannya yang sangat vital dari suatu transformator seperti itu maka cara pengamanannya juga dituntut sebaik mungkin. Oleh karena itu transformator harus diproteksi dengan menggunakan sistem dan peralatan yang benar, baik dan tepat.

2.3 Proteksi Trafo Tenaga

Perkembangan sistem tenaga listrik modern tenaga listrik sangat terkait dengan perkembangan dan kemajuan sistem rancangan transformator tenaga. Dengan teknologi yang semakin maju saat ini sudah tersedia berbagai ukuran transformator tenaga mulai dari ukuran kecil berkapasitas kVA hingga dengan kapasitas ratusan MVA yang diperlukan sesuai dengan berbagai aplikasi dalam sistem tenaga listrik.

Pertimbangan yang ditempuh dalam memilih sistem proteksi transformator tenaga berbeda – beda, namun sistem proteksi transformator tenaga pada prinsipnya dilakukan dengan menghindarkan transformator tenaga mengalami panas yang berlebihan yang berlangsung dalam waktu yang cukup lama. Ini berarti, bila gangguan terjadi transformator tenaga harus diisolasi secepat mungkin.

Secara teknis dan ekonomis, transformator distribusi yang kecil dapat diamankan dengan baik hanya dengan menggunakan sekering pengaman lebur atau rele arus lebih dengan sistem pendingin waktu tunda (*time delay*) yang dikoordinasikan dengan peralatan – peralatan yang akan diamankan dalam jaringan. Namun, untuk transformator tenaga yang besar, setiap gangguan harus diisolasi secepat mungkin tanpa keterlambatan waktu. Hal ini mengingat besarnya pengaruh gangguan yang terjadi dan dapat mempengaruhi stabilitas, keandalan, operasi sistem tenaga listrik dan termasuk faktor ekonomi mengingat harga transformator yang sangat mahal.

2.3.1 Perangkat Sistem Proteksi dalam Sistem Tenaga Listrik

2.3.1.1 Pemutus Tenaga (PMT)

Pemutus Tenaga (PMT) atau Circuit Breaker (CB) berdasarkan IEC (International Electrotechnical Vocabulary) 441-14-20 merupakan peralatan saklar/switching mekanis, yang mampu menutup, mengalirkan dan memutus arus beban dalam kondisi normal serta mampu menutup, mengalirkan (dalam periode waktu tertentu) dan memutus arus beban dalam kondisi abnormal/gangguan seperti kondisi hubung singkat (short circuit).

Sedangkan definisi PMT berdasarkan IEEE C37.100:1992 (Standard definitions for power switchgear) adalah merupakan peralatan saklar/ switching mekanis, yang mampu menutup, mengalirkan dan memutus arus beban dalam kondisi normal sesuai dengan ratingnya serta mampu menutup, mengalirkan (dalam periode waktu tertentu) dan memutus arus beban dalam spesifik kondisi abnormal/gangguan sesuai dengan ratingnya.

Fungsi utamanya adalah sebagai alat pembuka atau penutup suatu rangkaian listrik dalam kondisi berbeban, serta mampu membuka atau menutup saat terjadi arus gangguan (hubung singkat) pada jaringan atau peralatan lain.

2.3.1.2 Macam – macam Gangguan pada transformator Tenaga

Gangguan yang terjadi pada transformator daya dapat mempengaruhi penyaluran daya listrik, gangguan yang terjadi biasanya berupa gangguan beban lebih dan gangguan hubung singkat. Untuk lebih lanjut jenis gangguan yang terdapat pada transformator daya dapat digolongkan menjadi dua macam yaitu gangguan diluar transformator dan gangguan didalam transformator.

a. Gangguan diluar transformator

Gangguan diluar transformator daya ini sering terjadi dan dapat merupakan beban lebih, hubung singkat fasa ke tanah ataupun gangguan antar fasa. Gangguan ini merupakan pengaruh terhadap transformator, sehingga transformator harus dikeluarkan dari sistem bila gangguan tersebut terjadi setelah waktu tertentu, untuk memberi kesempatan pengamanan daerah yang terganggu bekerja. Untuk kondisi gangguan diluar daerahnya misalnya gangguan hubung singkat pada busbar atau gangguan hubung singkat di rel.

b. Gangguan di dalam transformator

Gangguan dalam yang dimaksud adalah gangguan yang bersumber dari dalam transformator itu sendiri atau berada diantara 2 transformator arus. Gangguan didalam transformator dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Gangguan hubung singkat

Gangguan ini umumnya dapat dideteksi oleh adanya arus atau tegangan yang tidak seimbang. Contoh kasusnya adalah:

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

Gangguan ke tanah, atau antara sebagian besar belitan akan menghasilkan arus gangguan yang besar yang menyebabkan timbulnya emisi sejumlah besar gas yang disebabkan oleh dekomposisi dan minyak. Jenis gangguan ini tidak sulit untuk dideteksi, tetapi perlu segera diambil tindakan untuk menghilangkan gangguan guna mencegah kerusakan yang lebih besar dan untuk menjaga stabilitas sistem.

2. Gangguan Inti

Yaitu gangguan yang tergolong ringan dan berawal dari gangguan kecil namun kemudian secara perlahan-lahan berkembang menjadi gangguan yang besar atau berat yang mengakibatkan kerusakan apabila tidak segera terdeteksi. Keadaan gangguan seperti ini tidak dapat terdeteksi oleh rele proteksi arus dan tegangan.

Secara umum gangguan internal atau gangguan didalam daerah pengamanan transformator sangatlah berbahaya. Peralatan yang terganggu harus secepat mungkin dipisahkan setelah terjadi gangguan. Yang tujuannya untuk membatasi kerusakan pada transformator daya. Sehingga transformator daya sangat penting untuk diproteksi. Hal ini dilakukan untuk mengurangi efek gangguan apabila terjadi gangguan.

2.4 Rele

Rele adalah penggunaan pengaman pemutus daya untuk kerja otomatis perlu dilengkapi dengan peralatan tambahan yang dapat mendeteksi perubahan keadaan yang terjadi pada rangkaian. Peralatan tersebut berupa gulungan yang di beri daya dari sumber DC melalui saklar yang dioperasikan dengan peralatan khusus yang disertai rele. Rele merupakan suatu peralatan yang dilengkapi dengna kontak – kontak yang mampu merubah rangkaian lain. Oleh karena itu,

pemutus tenaga yang dilengkapi dengan rele digunakan sebagai peralatan perlindungan suatu sistem tenaga dari kemungkinan kerusakan yang diakibatkan oleh gangguan.

Rele dibedakan menjadi dua kelompok :

1. Komparator, mendeteksi dan mengukur kondisi abnormal dan membuka / menutup kontak.
2. *Auxiliary* rele, dirancang untuk di pakai di *auxiliary circuit* ang dikontrol oleh rele komparator, dan membuka / menutup kontak – kontak lain (yang umumnya berarus kuat).

2.4.1 *Current Transformer (CT) dan Potential Transformer (PT)*

Salah satu peralatan lain yang merupakan pendukung proteksi yaitu transformator arus / *current transformer* (CT) dan *potential transformer* (PT), dimana CT adalah peralatan listrik yang dipergunakan dalam rangkaian arus bolak =- balik, yang dapat memperkecil arus besar menjadi arus kecil, dipergunakan untuk pengukuran atau proteksi, dan PT adalah peralatan listrik yang dapat menurunkan tegangan tinggi menjadi tegangan rendah, yang dipergunakan dalam rangkaian arus bolak – balik.

Fungsi CT adalah untuk memperoleh arus yang sebanding dengan arus yang hendak dipergunakan, dan untuk memisahkan sirkuit dari sistem yang arusnya hendak diukur (yang selanjutnya disebut sirkuit primer) terhadap sirkuit dimana instrumen tersambung (yang selanjutnya disebut sirkuit sekunder dengan arus sebesar 1A dan 5 A yang dipergunakan untuk pengukuran atau proteksi). Berbeda dengan transformator tenaga dimana arusnya tergantung dari arus disisi sekunder, tetapi pada transformator arus (CT) arusnya tidak tergantung beban sisi sekunder, melainkan tergantung dari arus disisi primernya. Pada *current transformer* (CT) sisi sekunder dapat mempunyai satu belitan atau beberapa belitan, tergantung dari desain atau kebutuhan pemakaiannya.

Karena pengukuran energi yang dominan adalah pemakaian arus dan tegangannya, diama arus dan tegangan yang diukur melebihi arus dan tegangan nominal yang terdapat di kWh meter untuk itu dibutuhkan suatu

peralatan instrumen transformer yang dapat menurunkan arus dan tegangan yaitu transformator arus (CT) dan transformator tegangan (PT).

Fungsi transformator tegangan (PT) adalah untuk memperoleh tegangan yang sebanding dengan tegangan tinggi (yang selanjutnya disebut sirkuit primer) terhadap sirkuit dimana alat ukur (instrumen) tersambung (yang selanjutnya disebut sirkuit sekunder). Beda dengan transformator tenaga yang dibutuhkan adalah tegangan dan daya keluarannya, tetapi pada transformator tegangan yang dibutuhkan adalah tingkat ketelitiannya dan penurunan tegangannya yang disesuaikan dengan alat ukur.

2.4.2 Syarat Utama Rele Proteksi

Untuk melaksanakan fungsi suatu rele harus memiliki syarat – syarat utama antara lain:

1. Kepekaan (*sensitivity*)

Pada prinsipnya rele harus cukup peka sehingga dapat mendeteksi gangguan didaerah pengamannya, sekaligus dalam kondisi yang memberikan rangsangan minimum.

2. Keandalan (*Reliability*)

Syarat keandalan ini terbagi menjadi dua, yaitu:

- a. Ketepatan (*Dependability*)

Pengaman harus diandalkan kemampuan kerjanya. Tidak boleh gagal bekerja, bila memang harus bekerja untuk adanya gangguan di daerah pengamannya.

- b. Keamanan (*Security*)

Pengaman tidak boleh salah kerja, yaitu bekerja yang tidak semestinya harus bekerja, misalkan karena adanya lokasi gangguan ataupun kerja yang terlalu cepat maupun terlalu lambat yang dapat mengakibatkan pemadaman yang sebenarnya tidak perlu terjadi.

- c. Kesiapan (*Availability*)

Siap bekerja sesuai waktu operasinya. Kondisi ini dinyatakan dalam rasio (perbandingan) antara waktu siap kerja rele pengaman dengan waktu total operasinya.

3. Selektifitas (*Selectivity*)

Pengaman harus mengisolir daerah terganggu sekecil mungkin yaitu hanya seksi yang terganggu yang termasuk dalam daerah pengaman utamanya dan gangguan terletak di seksi lain dimana rele harus bekerja dengan waktu tunda.

4. Kecepatan (*Speed*)

Memisahkan daerah terganggu secepat mungkin hal ini penting untuk menghindari kerusakan secara thermis pada peralatan yang dilalui arus gangguan serta membatasi kerusakan pada alat yang terganggu. Namun rele harus mempertahankan kestabilan sistem dalam menjaga keandalan sistem penyaluran daya listrik.

2.4.3 Rele Proteksi untuk Transformator Tenaga

a. Proteksi mekanik dan detektor panas

Rele Buchholz fungsinya mendeteksi gas yang timbul di dalam transformator karena adanya percikan bunga api atau pemanasan setempat di dalam transformator.

Rele Sudden Pressure rele pressure untuk tangki utama transformator bekerja apabila didalam tangki transformator terjadi kenaikan tekanan udara akibat terjadinya gangguan didalam transformator.

Rele Jansen adalah rele untuk mengamankan transformator dari gangguan didalam *tap changer* yang menimbulkan gas. Dipasang pada pipa yang menuju tangki konservator.

Rele Tekanan Lebih berfungsi untuk pengamanan terhadap gangguan didalam trafo. Rele ini hanya bekerja oleh kenaikan tekanan gas yang tiba – tiba dan langsung menjatuhkan PMT.

Rele Suhu Minyak bekerja dengan cara mendeteksi suhu minyak secara langsung, yaitu menggunakan sensor suhu yang ditempatkan pada top tank.

Rele Suhu Belitan bekerja dengan cara mendeteksi suhu belitan secara tidak langsung, yaitu menggunakan sensor suhu yang dilengkapi dengan kompensasi arus beban.

b. Proteksi elektrik utama pada trafo daya

Rele Diferensial adalah rele pengaman trafo tenaga yang utama pada sistem tenaga listrik dengan bekerja seketika tanpa koordinasi dengan rele disekitarnya maka didesain waktu kerjanya secepat mungkin. Batas pengamannya dibatasi oleh pasangan trafo arus dimana rele diferensial dipasang sehingga tidak dapat dijadikan rele pengaman cadangan. Rele ini bekerja dengan prinsip keseimbangan arus atau berdasarkan hukum kirchoff adalah perbandingan jumlah arus yang masuk ke primer (I_p) sama dengan jumlah arus yang keluar dari sisi sekunder (I_s).

Rele Gangguan Tanah Terbatas (REF) berfungsi untuk mengamankan trafo tenaga bila ada gangguan satu fasa ke tanah di dekat titik netral trafo tenaga. Rele ini digunakan apabila belitan trafo daya adalah $Y_n Y_n$ serta rele ini terdiri dari sisi primer dan sisi sekunder. Rele ini memiliki prinsip kerja seperti rele diferensial.

c. Proteksi cadangan pada trafo daya

Rele Arus Lebih berfungsi utama dari OCR adalah untuk mendeteksi adanya arus lebih yang kemudian memberikan informasi dan perintah kepada pemutus beban (PMT) untuk membuka. Sistem proteksi dengan menggunakan OCR mempunyai beberapa keuntungan diantaranya :

- Pengaman sederhana
- Dapat sebagai pengaman cadangan dan pengaman utama
- Ekonomis

Secara umum penggunaan OCR itu sebagai pengaman hubung singkat dan keadaan abnormal pada operasi sistem distribusi tenaga listrik.

Rele Gangguan Tanah digunakan sebagai unit perlindungan untuk melengkapi dalam mengatasi berbagai masalah trafo tenaga. Rele gangguan tanah pada trafo tenaga ini adalah jenis pelindung diferensial yang beroperasi untuk gangguan belitan fasa ke tanah. Rele ini juga dapat digunakan sebagai pelindung trafo tenaga dengan hubung belitan delta, jika pentanahan trafo tenaga ini dipasang antara trafo arus dan belitan delta.

2.5 Fungsi Proteksi pada Trafo Tenaga terhadap Gangguan

Untuk memperoleh efektifitas dan efisien dalam menentukan sistem proteksi trafo tenaga, maka setiap peralatan proteksi yang dipasang harus sesuai dengan kebutuhan dan prediksi gangguan yang akan mengancam ketahanan trafo itu sendiri. Beberapa jenis rele yang dibutuhkan seperti pada tabel dibawah ini yang bersumber dari PT. PLN (Persero), antara lain:

Tabel 2.1. Kebutuhan fungsi relay terhadap gangguan

No.	Jenis Gangguan	Proteksi		Akibat
		Utama	Back Up	
1	Hubung singkat di dalam daerah pengaman trafo	<ul style="list-style-type: none"> - Diferensial - REF - <i>Bucholz</i> - Tangki Tanah - Tekanan lebih 	OCR GFR	Kerusakan pada isolasi kumparan atau inti tangki menggembung.
2	Hubung singkat di luar daerah pengaman trafo	<ul style="list-style-type: none"> - OCR - GFR - SBEF 	OCR GFR	Kerusakan pada isolasi atau kumparan atau NGR
3	Beban lebih	Relai Suhu	OCR	Kerusakan isolasi
4	Gangguan sistem pendingin	Relai Suhu	Tidak ada	Kerusakan isolasi
5	Gangguan pada OLTC	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Jansen</i> - Tekanan lebih 	Tidak ada	Kerusakan OLTC
6	Tegangan Lebih	<ul style="list-style-type: none"> - OVR - LA 	Tidak ada	Kerusakan isolasi

2.6 Skema Proteksi Utama dan Cadangan pada Trafo Tenaga

Kebutuhan peralatan proteksi trafo tenaga berdasarkan kapasitas trafo tenaga sesuai SPLN, seperti tabel dibawah ini.

Tabel 2.2 Kriteria sistem proteksi sesuai SPLN

No.	Jenis Proteksi	Kapasitas (MVA)		
		≤10	<10 ÷ <30	≥30
1	Relay Suhu	Ya	Ya	Ya
2	Relay <i>Bucholz</i>	Ya	Ya	Ya
3	Relay <i>Jansen</i>	Ya	Ya	Ya

4	Relay Tekanan Lebih	Ya	Ya	Ya
5	Relay Diferensial	Tidak	Tidak	Ya
6	Relay Tangki Tanah	Tidak	Ya	Tidak
7	Relay hubung tanah terbatas	Tidak	Tidak	Ya
8	Relay Beban Lebih (OLR)	Tidak	Ya	Ya
9	Relay Arus Lebih (OCR)	Ya	Ya	Ya
10	Relay Hubung Tanah (GFR)	Ya	Ya	Ya
11	Pelebur (fuse)	Ya	Tidak	Tidak

2.7 Proteksi Transformator Tenaga dengan Menggunakan Rele Diferensial

2.7.1 Rele Diferensial

Rele diferensial adalah suatu rele pengaman utama yang bekerja berdasarkan Hukum Kirchoff, dimana arus yang masuk pada suatu titik sama dengan arus yang keluar dari titik tersebut. Yang dimaksud titik pada proteksi diferensial adalah daerah pengamanan, dalam hal ini dibatasi oleh dua buah trafo arus. Sehingga rele diferensial tidak dapat dijadikan sebagai pengaman cadangan untuk daerah berikutnya. Proteksi relai diferensial bekerja dengan prinsip keseimbangan arus (*current balance*).

Proteksi diferensial merupakan salah satu pelindung utama pada transformator daya. Rele ini sangat selektif sehingga biasanya tidak perlu dikoordinasikan dengan rele proteksi lainnya, bekerjanya sangat cepat.

Rele diferensial bekerja dengan membandingkan arus yang masuk dan arus yang keluar. Ketika terjadi perbedaan maka rele akan mendeteksi adanya gangguan dan menginstruksikan PMT untuk membuka (*trip*) apabila terjadi perbedaan. Perbedaan di sini adalah perbedaan nilai arus dan perbedaan besar fasa (stabilitas arus). Rele ini lebih efektif untuk menangani gangguan internal transformator. Pada gangguan di luar daerah pengamanan, trafo tidak akan bekerja karena arus masukan dan keluaran sama besar walaupun melebihi arus dari nominal trafo daya.

$$I_{\text{diferensial}} = I_d = [I_p] + [I_s] \dots\dots\dots(1)$$

dimana:

I_d = Arus diferensial (A)

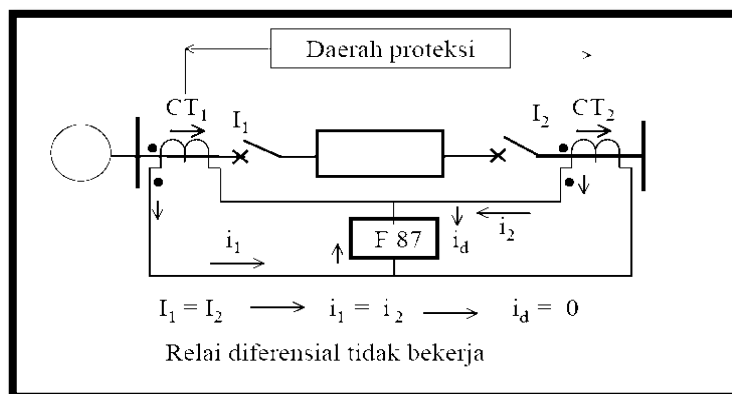
I_p = Arus sisi masuk (A)

I_s = Arus sisi keluar (A)

2.7.2 Prinsip Kerja Rele Diferensial

Prinsip kerja rele proteksi diferensial adalah membandingkan dua vektor arus lebih yang masuk ke rele, apabila pada sisi primer trafo arus (CT1) dialiri arus I_1 , maka pada sisi primer trafo arus (CT2) akan mengalir arus I_2 , pada saat yang sama sisi sekunder kedua trafo arus (CT1 dan CT2), akan mengalir arus i_1 dan i_2 yang besarnya tergantung dari rasio yang terpasang, jika besarnya $i_1 = i_2$ maka relai tidak bekerja, karena tidak ada selisih arus ($\Delta i = 0$), tetapi jika besarnya arus $i_1 \neq i_2$ maka relai akan bekerja, karena adanya selisih arus ($\Delta i \neq 0$). Selisih arus ini disebut arus diferensial. Arus inilah yang menjadi dasar bekerjanya rele diferensial.

Dalam keadaan normal (tidak ada gangguan), arus yang mengalir kerele pengaman sama dengan nol, arus hanya bersikulasi dalam sirkit sekunder kedua trafo arus (CT). Untuk daerah pengamanan dari rele diferensial dibatasi antara dua buah CT (lihat gambar 2.10)



Gambar 2.10 Rele diferensial dalam keadaan normal (tidak ada gangguan)

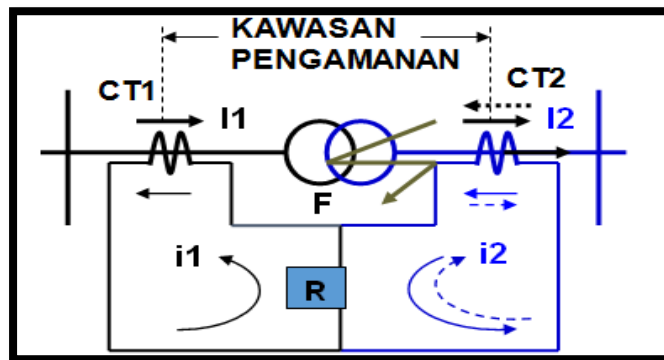
Agar rele diferensial dalam kondisi normal (tidak terjadi gangguan) dan rele tidak bekerja, maka persyaratannya adalah sebagai berikut :

1. CT 1 dan CT2 (maupun ACT nya) harus mempunyai rasio sedemikian sehingga besar arus $i_1 = i_2$

2. Sambungan dan polaritas CT1 dan CT2 maupun ACT nya harus benar.

a. Jika terjadi gangguan didalam daerah pengamanannya

Jika rele diferensial dipasang sebagai proteksi suatu peralatan dan terjadi gangguan didaerah pengamanannya maka rele diferensial harus bekerja (seperti terlihat pada gambar 2.11), pada saat CT1 mengalir arus I_1 maka pada CT2 tidak ada arus yang mengalir ($I_2 = 0$), disebabkan karena arus gangguan mengalir pada titik gangguan sehingga pada CT2 tidak ada arus yang mengalir, maka disisi sekunder CT2 tidak ada arus yang mengalir ($i_2 = 0$) yang mengakibatkan $i_1 \neq i_2$ ($1 \neq 0$) sehingga relai diferensial bekerja.



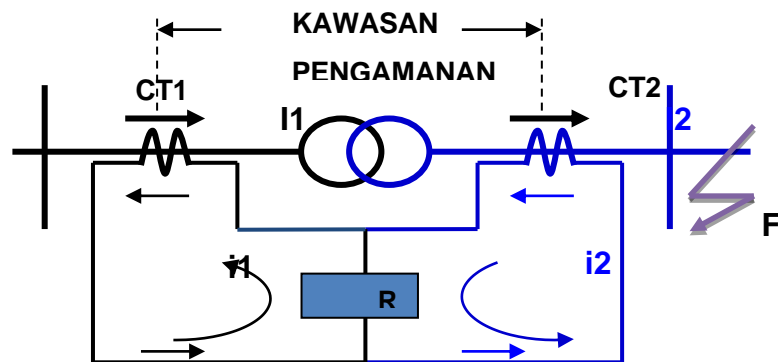
Gambar 2.11 Rele diferensial jika terjadi gangguan didalam daerah pengamananan

b. Jika terjadi gangguan diluar daerah pengamananan

Apabila terjadinya gangguan diluar daerah pengamanannya maka rele diferensial tidak bekerja (lihat gambar 2.5), pada saat sisi primer kedua CT dialiri arus I_1 dan I_2 , dengan adanya rasio CT1 dan CT2 yang sedemikian, maka besar arus yang mengalir pada sekunder CT1 dan CT2 yang menuju rele besarnya sama ($i_1 = i_2$) atau dengan kata lain tidak ada selisih arus yang mengalir pada relai sehingga rele tidak bekerja.

Karena sirkulasi arus gangguan diluar daerah pengamananan kerja rele diferensial tidak mempengaruhi arus yang mengalir pada kedua CT yang terpasang pada peralatan yang diproteksi, karena apabila pada arus primer CT1 dan CT2

mengalir arus gangguan dengan adanya perbandingan rasio trafo arus pada sisi sekunder juga akan mengalir arus gangguan yang besarnya $i_1 = i_2$ sehingga rele diferensial tidak bekerja karena tidak ada perbandingan arus ($\Delta i = 0$).



Gambar 2.12 Rele diferensial jika terjadi gangguan diluar daerah pengamanannya