



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

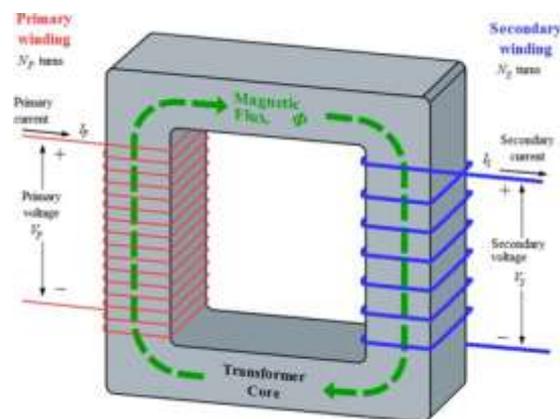
2.1 Transformator Daya

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

Arus AC yang mengalir pada belitan primer membangkitkan flux magnet yang mengalir melalui inti besi yang terdapat diantara dua belitan, flux magnet tersebut menginduksi belitan sekunder sehingga pada ujung belitan sekunder akan terdapat beda potensial / tegangan induksi

Transformator/Transformer/Trafo adalah suatu peralatan listrik yang termasuk dalam klasifikasi mesin listrik statis dan berfungsi untuk menyalurkan tenaga/daya listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya, dengan frekuensi sama. Dalam pengoperasiannya, transformator-transformator tenaga pada umumnya ditanahkan pada titik netral, sesuai dengan kebutuhan untuk sistem pengamanan atau proteksi¹.

¹ https://www.academia.edu/23637370/TRANSFORMATOR_DAYA



Gambar 2.1 Elektro magnetic pada trafo

Landasan fisik transformator adalah induktansi *mutual* (timbal 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.

Berdasarkan fungsinya trafo tenaga dapat dibedakan menjadi:

1. Trafo pembangkit
2. Trafo gardu induk / penyaluran
3. Trafo distribus

2.2 Bagian-Bagian Trafo

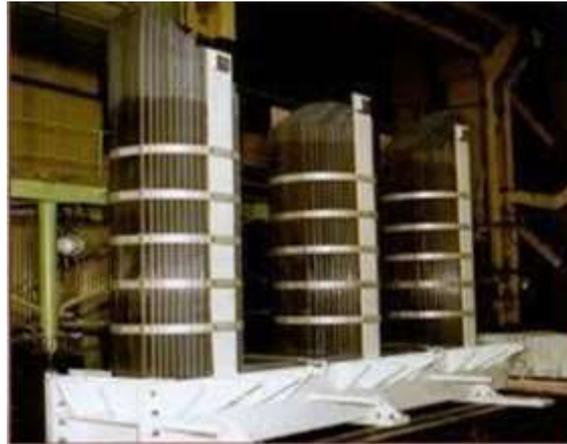
2.2.1 Inti Besi

Inti besi digunakan sebagai media mengalirnya fluks yang timbul akibat induksi arus bolak balik pada kumparan yang mengelilingi inti besi sehingga dapat menginduksi kembali ke kumparan yang lain. Dibentuk dari lempengan – lempengan besi tipis berisolasi dengan maksud untuk

² <https://id.m.wikipedia.org/wiki/Transformator>



mengurangi *eddy current* yang merupakan arus sirkulasi pada inti besi hasil induksi medan magnet, di mana arus tersebut akan mengakibatkan rugi – rugi (*losses*).



Gambar 2.2 Inti Besi

2.2.2 Kumbaran 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 fluks magnetik.



Gambar 2.3 Kumbaran Transformator



2.2.3 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* transformator³.



Gambar 2.4 *Bushing* Transformator

2.2.4 Pendingin

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

Minyak isolasi trafo selain merupakan media isolasi juga berfungsi sebagai pendingin. Pada saat minyak bersirkulasi, panas yang berasal dari belitan akan dibawa oleh minyak sesuai jalur sirkulasinya dan akan didinginkan pada sirip – sirip radiator. Adapun proses pendinginan ini dapat dibantu oleh adanya kipas dan pompa sirkulasi guna meningkatkan efisiensi pendinginan⁴.

³ Tim Review KEPDIR.2014. *Buku Pedoman Trafo Arus Final*. Hal. 4

⁴ Tim Review KEPDIR.2014. *Buku Pedoman Trafo Arus Final*. Hal. 7



Tabel 2.1 Macam-macam pendingin pada transformator

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

2.2.5 Oil Preservation And Expansion (Konservator)

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



Gambar 2.5 Konservator

2.2.6 Silica gel

Agar minyak isolasi trafo tidak terkontaminasi oleh kelembaban dan oksigen dari luar (untuk tipe konservator tanpa *rubber bag*), maka udara yang akan masuk kedalam konservator akan difilter melalui *silica gel* sehingga kandungan uap air dapat diminimalkan⁵.



Gambar 2.6 Silica gel

2.2.7 Dielectric (Minyak isolasi transformator & isolasi kertas)

Minyak isolasi pada transformator berfungsi sebagai media

⁵ Tim Review KEPDIR.2014. Buku Pedoman Trafo Arus Final. Hal. 8



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*⁶.



Gambar 2.7 Dielectric

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



Gambar 2.8 Tembaga yang dilapisi kertas isolasi

2.2.8 Tap Changer

Kestabilan tegangan dalam suatu jaringan merupakan salah satu hal yang dinilai sebagai kualitas tegangan. Transformator dituntut memiliki nilai tegangan keluaran yang stabil sedangkan besarnya tegangan masukan tidak selalu sama. Dengan mengubah banyaknya

⁶ Tim Review KEPDIR.2014. *Buku Pedoman Trafo Arus Final*. Hal. 10



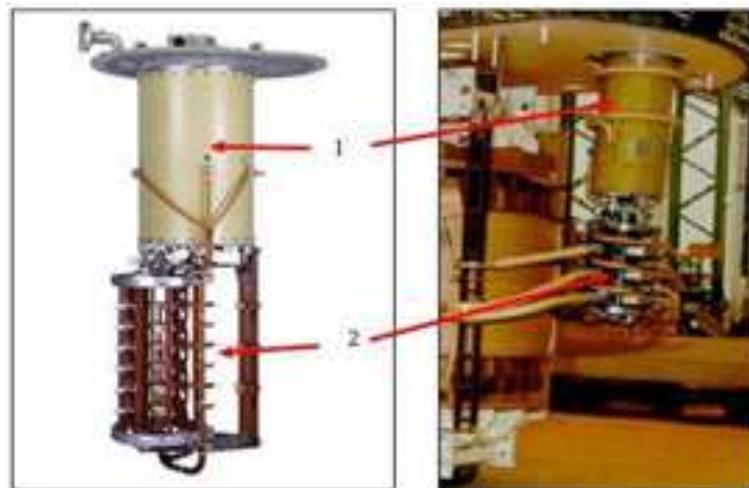
belitan pada sisi primer diharapkan dapat merubah rasio antara belitan primer dan sekunder dan dengan demikian tegangan keluaran/ sekunder pun dapat disesuaikan dengan kebutuhan sistem berapapun tegangan masukan/ primernya. Penyesuaian rasio belitan ini disebut *Tap changer*.

Proses perubahan rasio 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 :

1. Selector Switch
2. Diverter Switch
3. Tahanan transisi

Dikarenakan aktifitas tap changer lebih dinamis dibanding dengan belitan utama dan inti besi, maka kompartemen antara belitan utama dengan tap changer dipisah. Selector switch merupakan rangkaian mekanis yang terdiri dari terminal- terminal untuk menentukan posisi tap atau rasio 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 kompartemennya 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. *Selector Switch*

2.2.9 *Neutral Grounding Resistor (NGR)*

Salah satu metoda pentanahan adalah dengan menggunakan NGR. NGR adalah sebuah tahanan yang dipasang serial dengan netral sekunder pada trafo sebelum terhubung ke *ground* / tanah. Tujuan dipasangnya NGR adalah untuk mengontrol besarnya arus gangguan yang mengalir dari sisi netral ke tanah. Ada dua jenis NGR, *Liquid* dan *Solid*.



Gambar 2.10 Neutral Grounding Resistor

2.3 Transformator Arus⁷

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

⁷ Sukmawidjaja, Maula. 1995. Edisi ke-2. "Teori Soal Dan Penyelesaian Analisa Sistem Tenaga Listrik II". Jakarta: Jurusan Teknik Elektro, Universitas Trisakti.



Gambar 2.11 Transformator Arus

2.3.1 Ratio Transformator Arus

Transformator arus pada pengaman rele diferensial dipasang pada sisi tegangan primer dan sisi tegangan sekunder 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 menentukan rasio trafo arus maka diperlukan untuk menghitung arus *rating* terlebih dahulu, karena arus *rating* berfungsi sebagai batas pemilihan ratio. Untuk menghitung arus *rating* menggunakan rumus :

$$I_{rat} = 110\% \times I_{nominal} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana :

I_{rat} = Arus *rating* (A)

I_n = Arus Nominal (A)



2.3.2 Fungsi Trafo Arus

Fungsi dari trafo arus adalah sebagai berikut:

1. Mengkonversi besaran arus pada sistem tenaga listrik dari besaran primer menjadi besaran sekunder untuk keperluan pengukuran sistem metering dan proteksi
2. Mengisolasi rangkaian sekunder terhadap rangkaian primer, sebagai pengamanan terhadap manusia atau operator yang melakukan pengukuran.
3. Standarisasi besaran sekunder, untuk arus nominal 1Amp dan 5 Amp.

Secara fungsi trafo arus dibedakan menjadi dua yaitu trafo arus pengukuran dan trafo arus proteksi:

Trafo arus pengukuran

1. Trafo arus pengukuran untuk metering memiliki ketelitian tinggi pada daerah kerja (daerah pengenalnya) 5% - 120% arus nominalnya tergantung dari kelasnya dan tingkat kejenuhan yang relatif rendah dibandingkan trafo arus untuk proteksi.
2. Penggunaan trafo arus pengukuran untuk Amperemeter, Watt-meter, VARh-meter, dan $\cos\phi$ meter.^[8]

Trafo arus proteksi

3. Trafo arus untuk proteksi, memiliki ketelitian tinggi pada saat terjadi gangguan dimana arus yang mengalir beberapa kali dari arus pengenalnya dan tingkat kejenuhan cukup tinggi.
4. Penggunaan trafo arus proteksi untuk relai arus lebih (OCR dan GFR), relai beban lebih, relai diferensial, relai daya dan relai jarak.

^[8]Tim Review KEPDIR.2014. *Buku Pedoman Trafo Arus Final. Hal. 3*



2.3.3 Arus Sekunder *Current Transformator* (CT)

Arus sekunder pada CT (*Current Transformator*) adalah arus yang dikeluarkan dari CT itu sendiri. Arus sekunder CT dapat dihitung dengan rumus :

$$I_{\text{sekunder}} = \frac{1}{\text{Rasio CT}} \times I_n \dots \dots \dots (2.2)$$

2.3.4 Error Mismatch

Error mismatch merupakan kesalahan dalam membaca perbedaan arus dan tegangan di sisi primer dan sekunder transformator serta pergeseran fasa di trafo tersebut. Menghitung besarnya arus *mismatch* yaitu dengan cara membandingkan rasio CT ideal dengan CT yang ada di pasaran, dengan ketentuan *error* tidak boleh melebihi 5% dari rasio CT yang dipilih.

Untuk menghitung besarnya nilai *error mismatch* menggunakan rumus :

$$\text{Error mismatch} = \frac{CT_{\text{ideal}}}{CT_{\text{terpasang}}} \% \dots \dots \dots (2.3)$$

$$\frac{CT_1}{CT_2} = \frac{V_1}{V_2} \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana :

- CT (*ideal*) : Trafo arus (*ideal*)
- V1 : Tegangan dibagian sisi tinggi
- V2 : Tegangan dibagian sisi rendah



2.4 Rele Proteksi⁹

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.

Rele proteksi adalah susunan peralatan yang direncanakan untuk dapat merasakan atau mengukur adanya gangguan atau mulai merasakan adanya ketidak normalan pada peralatan atau bagian sistem tenaga listrik dan 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 diterimanya, 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 dapat dipisahkan sedemikian rupa sehingga sistem lainnya tetap dapat beroperasi secara normal.

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

⁹ PT. PLN (Persero). *Buku Petunjuk Transformator Tenaga*.



1. Merasakan, mengukur dan menentukan bagian sistem yang terganggu serta memisahkan secepatnya sehingga sistem lain yang tidak terganggu dapat beroperasi secara normal.
2. Mengurangi kerusakan yang lebih parah dari peralatan yang terganggu.
3. Mengurangi pengaruh gangguan terhadap bagian sistem yang lain yang tidak terganggu di dalam sistem tersebut serta mencegah meluasnya gangguan.
4. Memperkecil bahaya bagi manusia.

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

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

Untuk mendapatkan penyetelan yang memenuhi semua kriteria diatas adakalanya sulit dicapai, yaitu terutama antara selektif dan cepat, sehingga adakalanya harus diadakan kompromi koordinasi. Kita sadari pula bahwa system 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 :

1. Kegagalan pada rele sendiri.
2. Kegagalan suplai arus atau tegangan ke rele tegangannya rangkaian suplai ke rele dari trafo tersebut terbuka atau terhubung singkat.



3. 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.
4. 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 diferensial.
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.

2.4.1 Klasifikasi Rele Proteksi¹⁰

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

2.4.1.1 Berdasarkan prinsip kerjanya

¹⁰ Hazairin. 2004. *Dasar-dasar sistem proteksi tenaga listrik*. UNSRI.



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 temperatur 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.

2. Rele Elektromagnetik (Elektromagnetic 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.

2.4.1.2 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 diferensial 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.

2.5 Proteksi Transformator¹¹

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 Ground Fault Relay (GFR). Sedangkan Standby Earth Fault (SEF) umumnya hanya dipergunakan pada transformator dengan belitan Y yang ditanahkan dengan resistor, dan fungsinya lebih mengamankan NGR. Umumnya skema proteksi disesuaikan dengan kebutuhan.

Rele pengaman transformator daya harus dapat mendeteksi adanya sumber gangguan yang berada di dalam maupun di luar transformator yang berada di daerah pengamannya. Di samping itu adanya gangguan di luar daerah pengamannya bila rele yang terkait tidak bekerja salah satu rele pada transformator harus bekerja.

2.6 Gangguan Pada Transformator Daya

Gangguan yang berpengaruh terhadap kerusakan transformator tidak hanya karena adanya gangguan di dalam transformator atau di dalam daerah pengamanan transformator tetapi juga adanya gangguan di luar

¹¹ ISTIMAROH, A. (2013). Penentuan Setting Rele Arus Lebih Generator dan Rele Diferensial Transformator Unit 4 PLTA Cirata II. *Reka Elkomika*



daerah pengaman. Justru kerusakan transformator cenderung terjadi karena terlalu seringnya terjadi gangguan di luar daerah pengaman.

2.6.1 Gangguan Di Luar Daerah Pengaman

Gangguan di luar daerah pengaman transformator daya ini sering terjadi dan dapat merupakan beban lebih, hubungan singkat fasa ke tanah maupun gangguan antar fasa. Gangguan ini mempunyai pengaruh terhadap transformator, sehingga transformator harus dilepaskan/ dipisahkan bila gangguan tersebut terjadi setelah waktu tertentu untuk memberi kesempatan pengaman daerah yang terganggu bekerja.

Kondisi beban yang berlanjut dapat di deteksi dengan rele thermal atau termometer yang memberi sinyal sehingga beban berkurang. Untuk kondisi gangguan di luar daerahnya misalnya gangguan hubung singkat pada rel gangguan, hubung singkat disalurkan keluarannya, maka rele arus lebih dengan perlambatan waktu atau sering digunakan sebagai pengamannya. Koordinasi yang baik, untuk daerah berikutnya yang terkait. Pengaman utama ini di rancang sedemikian rupa sehingga tidak boleh bekerja terhadap gangguan tersebut.

2.6.2 Gangguan Di Daerah Pengaman

Pengaman utama transformator daya ditunjukkan sebagai pengaman di dalam daerah pengamannya. Gangguan di dalam sangat serius dan selalu ada resiko terjadinya kebakaran. Gangguan di dalam dapat terjadi karena diakibatkan :

1. Gangguan satu fasa atau antar fasa pada sisi tegangan tinggi atau tegangan rendah di terminal luar.
2. Hubungan singkat antar lilitan di sisi tegangan tinggi atau tegangan rendah.



3. Gangguan tanah pada lilitan tersier, atau hubung singkat antar belitan di lilitan tersier.

2.7 Rele Differensial

Rele menurut definisi dari IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) adalah merupakan suatu peralatan elektrik yang didesain untuk menginterpretasikan kondisi masukan dalam kondisi tertentu dan memberikan respon dengan mengoperasikan kontak-kontak bila masukan yang diterima memenuhi kondisi tertentu.

Relay differensial adalah relay proteksi utama pada transformator yang dibuat bekerja secepat mungkin saat terjadi gangguan karena bekerja seketika tanpa koordinasi dengan relay lainnya.

Relay differensial tidak dapat dijadikan sebagai relay cadangan dikarenakan pemasangannya dibatasi oleh kedua transformator arus disisi incoming dan outgoing. Proteksi relay differensial bekerja dengan metode keseimbangan arus yakni sesuai dengan hukum arus kirchoff yaitu , arus yang menuju / masuk sama dengan arus yang meninggalkan / keluar pada titik sambungan / cabang.^[12]

Karakteristik relay proteksi yang baik yaitu :

1. Selektif, relay proteksi harus selektif terhadap gangguan yang terjadi sehingga relay akan bekerja apabila terjadi gangguan dan tidak akan bekerja dalam kondisi normal.
2. Handal, relay proteksi harus dapat bekerja apabila terjadi gangguan sehingga diperlukan pengujian secara periodik untuk mengetahui keandalannya.

^[12] *Muhammad Rizki. 2018. Jurnal Analisa Performa Rele Differensial. Hal 5*



3. Ekonomis, relay dapat bekerja dengan optimal meskipun dengan biaya yang ekonomis.
4. Sensitif, relay dapat merangsang gangguan yang akan terjadi sehingga arus gangguan dapat terdeteksi.
5. Sederhana, peralatan relay harus fleksibel dari segi bentuk.
6. Cepat, relay dapat bekerja dengan cepat apabila terjadi gangguan sehingga komponen yang dilindungi aman.

2.7.1 Fungsi Rele Differensial

Pengaman rele differensial merupakan alat pengaman utama untuk mengamankan transformator daya terhadap arus hubung singkat yang terjadi didalam kumparan fasa. Terjadi gangguan hubung singkat biasanya disebabkan oleh adanya kerusakan isolasi kawat tersebut, akibat kerusakan yang mungkin terjadi adalah :

1. Hubung singkat antara kumparan fasa satu dengan fasa yang lainnya.
2. Hubung singkat antara masing-masing lilitan dalam satu kumparan.
3. Hubung singkat antara satu fasa ke tanah
4. Hubung singkat antara kumparan sisi tegangan tinggi dengan sisi tegangan rendah.

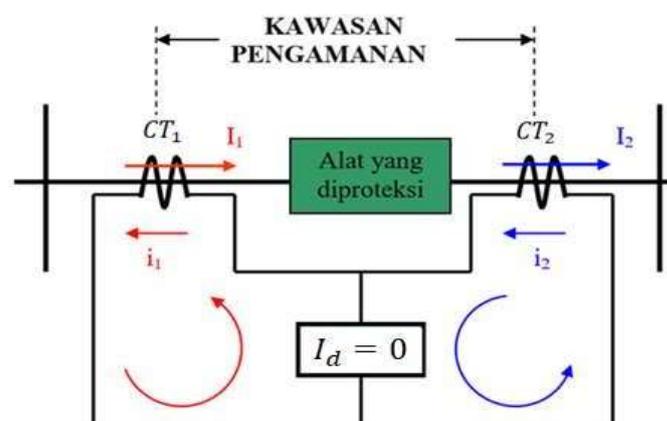
Dari masing-masing jenis hubung singkat tersebut diatas, rele differensial mempunyai system rangkaian sendiri-sendiri. Diantara nya adalah pengaman rele differensial longitudinal yang digunakan untuk mengamankan transformator daya terhadap arus hubung singkat antara kumparan yang satu dengan kumparan yang lainnya. Pengaman rele



differensial transverse untuk mengamankan generator terhadap gangguan antara masing-masing lilitan dalam kumpulan fasa. Dari kedua system tersebut pengaman rele differensial longitudinal adalah system yang paling banyak dijumpai pemakaiannya dilapangan. Karena sulitnya pengaman rele differensial ini hanya dipasang pada transformator daya dengan kapasitas yang besar saja.

2.7.2 Prinsip Kerja Relay Differensial

Prinsip kerja relay proteksi differensial adalah membandingkan dua vektor arus atau lebih yang masuk ke relay (lihat Gambar 2.12), apa bila pada sisi primer transformator arus (T_1) dialiri arus I_1 , maka pada sisi sekunder transformator arus (CT_2) akan dialiri arus I_2 , pada saat yang sama sisi sekunder kedua transformator arus, akan mengalir arus i_1 dan i_2 yang besarnya tergantung dari rasio yang terpasang, jika besarnya $i_1 = i_2$ maka relai tidak bekerja, karena tidak ada selisih arus, tetapi jika besarnya arus $i_1 \neq i_2$ maka relai akan bekerja, karena adanya selisih arus.^[13]

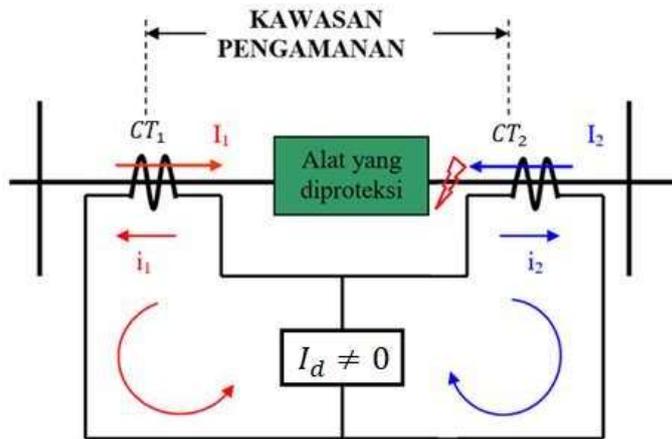


^[13] Muhammad Rizki. 2018. Jurnal Analisa Performa Rele Differensial. Hal 6



Gambar 2.12. Rangkaian Relay Differensial keadaan arus normal

2.7.3 Relay Differensial Keadaan Gangguan Internal



Gambar 2.13. Relay Differensial saat gangguan internal

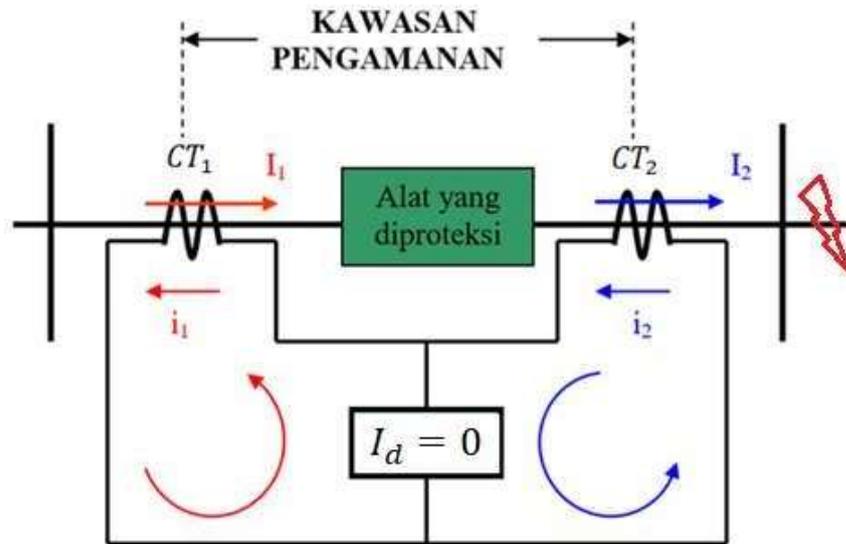
Gangguan internal adalah gangguan yang terjadi pada daerah pengaman relay differensial (lihat Gambar 2.13). Pada saat terjadi gangguan pada daerah pengaman relay differensial, maka arus akan mengalir menuju titik gangguan tersebut. Sehingga arus yang mengalir pada CT2 akan berbalik dari arah normalnya menuju titik gangguan tersebut. Gangguan tersebut mengakibatkan keamanan transformator terancam ketika transformator bekerja dan menjadikan sistem tidak seimbang. Asumsi sederhananya adalah sebagai berikut :

$$I_d = |i_1 + i_2| \dots\dots\dots(2.5)$$

Karena $I_d \neq 0$, maka relay differensial harus bekerja dengan memberikan sinyal trip kepada CB karena dapat menyebabkan kerusakan kepada transformator jika gangguan tersebut dibiarkan.



2.7.4 Relay Differensial Keadaan Gangguan Eksternal



Gambar 2.14. Relay Differensial saat gangguan eksternal

Gangguan eksternal adalah gangguan yang terjadi di luar daerah pengaman relay differensial (lihat Gambar 2.14), seperti gangguan hubung singkat pada saluran transmisi dan gangguan lainnya. Pada saat terjadi gangguan di luar daerah pengaman relay differensial, relay differensial tidak akan bekerja. Karena arus yang mengalir pada CT₁ dan CT₂ besarnya sama tetapi arahnya berlawanan. Asumsi sederhananya adalah sebagai berikut¹⁴ :

$$I_d = |i_1 + i_2| = 0 \dots\dots\dots(2.6)$$

¹⁴ Arfianda, Muammad. 2019. *Analisa Penggunaan Rele Diferensial Sebagai Proteksi Pada Transformator Daya Gardu Induk Paya Pasir, Jurnal Mahasiswa UMSU.*



2.7.5 Pemasangan Rele Differensial

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

1. Besarnya arus yang masuk dan keluar dari relai diferensial harus sama.
2. Phasa arus yang masuk dan yang keluar dari relai harus sama atau berlawanan

Agar persyaratan tersebut terpenuhi, dapat dipergunakan trafo arus bantu (ACT), Yang berfungsi untuk :

1. Mencocokkan arus yang masuk ke relai diferensial dari masing-masing sisi, Ini disebut penyesui arus.
2. Mencocokkan pergeseran phasa dari arus-arus yang akan masuk kerele diferensial, ini disebut penyesuai phasa

Persyaratan pengawatan suatu proteksi diferensial untuk trafo dapat dilihat pada tabel dibawah, dengan penjelasan sebagai berikut.: Jika trafo daya dihubungkan bintang (Y), maka CT dan ACT primer dihubungkan bintang sedangkan ACT sekunder dihubungkan segitiga. Dan apabila trafo dayanya dihubungkan segitiga maka CT, ACT primer dan ACT sekunder



dihubungkan bintang. Hubungan Trafo Daya Hubungan CT Hubungan Auxiliary CT Primer Sekunder.

Tabel 2.2 Hubungan CT pada Trafo Daya dengan ACT

Hubungan Trafo Daya	Hubungan CT	Hubungan Auxiliary CT	
		Primer	Sekunder
Y	Y	Y	Δ
Δ	Y	Y	Y

Jika pengawatan relai diferensial tidak menggunakan ACT maka pengawatannya dapat dilihat pada tabel dibawah, dimana bila trafo daya dihungkan bintang maka trafo arusnya(CT) dihubungkan segitiga dan sebaliknya jika trafo daya hubungannya segitiga maka hubungan CT nya adalah bintang.

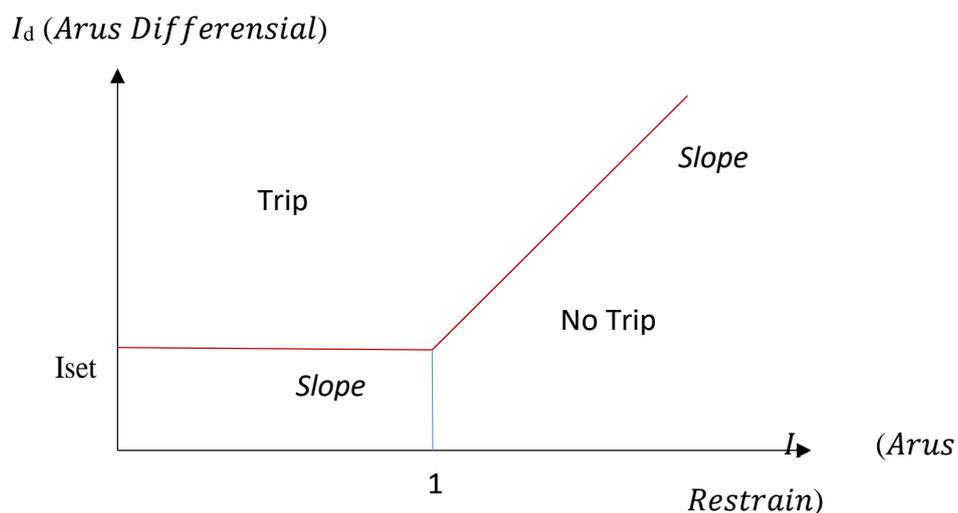
Tabel 2.3 Hubungan CT pada Trafo Daya (tanpa CT Bantu)

Hubungan Trafo Daya	Hubungan CT
Y	Δ
Δ	Y



2.7.6 Karakteristik Relay Differensial¹⁵

Setiap relay differensial dilengkapi dengan nilai settingannya dan memberikan karakteristik tripping tertentu. Karakteristik inilah yang akan mengenali jenis gangguan. Gambar 2.14 menunjukkan karakteristik tripping relay differensial.



Gambar 2.15. Karakteristik Relay Differensial

$Slope_1$ merupakan setting untuk menentukan titik dimana relay differensial mulai bekerja (pick-up relay). Sehingga bisa dibayangkan $Slope_1$ ini merupakan nilai penentu kapan relay differensial ini akan bekerja. $Slope_1$ bertugas untuk mengenali gangguan internal.

¹⁵ Setiawan, Ariesqie. (2012, Juni 07). *Pemnyetelan Rele Differensial Pada Transformator*.



Slope₂ bertugas untuk mengenali gangguan eksternal. Nilai Slope₂ digunakan untuk melihat adanya gangguan di luar daerah pengaman. Pada saat gangguan eksternal nilai arus yang melewati transformator sangat besar. Arus yang besar tersebut idealnya ditransformasikan oleh CT bernilai sama besar pada masing-masing sisi transformator. Tetapi setiap CT memiliki karakteristik error yang mengakibatkan arus differensial menjadi besar pada sisi belitan transformator. Untuk membedakan apakah arus differensial itu disebabkan oleh gangguan internal atau gangguan eksternal, maka digunakan perhitungan *arus restrain* (persamaan) untuk mengetahui nilai arus rata-rata yang mengalir pada kedua sisi belitan transformator.

Untuk menentukan besarnya nilai restrain slope dan arus setting pada rele diferensial menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$Slope\ 1 = \frac{I_d}{I_r} \times 100\% \dots \dots \dots (2.6)$$

$$I_r = \frac{I_1 + I_2}{2} \dots \dots \dots (2.7)$$

$$I_{sett} = \%slope \times I_{restrain} \dots \dots \dots (2.8)$$

Dimana :

I_d = Arus diferensial

I_r = Arus restrain (penahan)

$I_{setting}$ = Arus setting pada rele diferensial

Slope = Batas ambang kemampuan kumparan penahan