

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Transformator

Transformator atau lebih dikenal dengan nama “*transformer*” atau “*trafo*” sejatinya adalah suatu peralatan listrik yang mengubah daya listrik AC pada satu level tegangan yang satu ke level tegangan berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik tanpa merubah frekuensinya. Transformator biasa digunakan untuk mentransformasikan tegangan (menaikkan atau menurunkan tegangan AC). Selain itu, transformator juga dapat digunakan untuk sampling tegangan, sampling arus, dan juga mentransformasi impedansi. Transformator terdiri dari dua atau lebih kumparan yang membungkus inti besi feromagnetik. Kumparan-kumparan tersebut biasanya satu sama lain tidak dihubungkan secara langsung. Kumparan yang satu dihubungkan dengan sumber listrik AC (kumparan primer) dan kumparan yang lain mensuplai listrik ke beban (kumparan sekunder). Bila terdapat lebih dari dua kumparan maka kumparan tersebut akan disebut sebagai kumparan tersier, kuarter, dst.

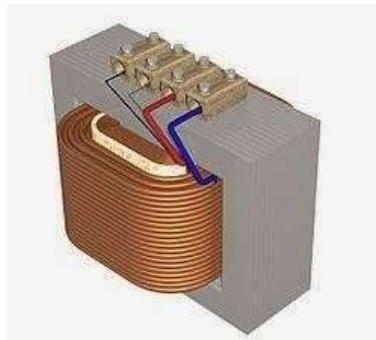
Transformator bekerja berdasarkan prinsip elektromagnetik. Ketika Kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, perubahan arus listrik pada kumparan primer menimbulkan perubahan medan magnet. Medan magnet yang berubah diperkuat oleh adanya inti besi. Inti besi berfungsi untuk mempermudah jalan fluksi yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan, sehingga fluks magnet yang timbulkan akan mengalir ke kumparan sekunder, sehingga pada ujung-ujung kumparan sekunder akan timbul ggl induksi. Efek ini dinamakan induktansi timbal-balik (*mutual inductance*). Bila pada rangkaian sekunder ditutup (rangkaian beban) maka akan mengalir arus pada kumparan sekunder. Jika efisiensi sempurna (100%), semua daya pada lilitan primer akan dilimpahkan ke lilitan sekunder.

Bagian utama transformator adalah dua buah kumparan yang keduanya dililitkan pada sebuah inti besi lunak. Kedua kumparan tersebut memiliki jumlah lilitan yang berbeda. Kumparan yang dihubungkan dengan sumber tegangan AC



disebut kumparan primer, sedangkan kumparan yang lain disebut kumparan sekunder.

Jika kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan AC (dialiri arus listrik AC), besi lunak akan menjadi elektromagnet. Karena arus yang mengalir tersebut adalah arus AC, garis-garis gaya elektromagnet selalu berubah-ubah. Oleh karena itu, garis-garis gaya yang dilingkupi oleh kumparan sekunder juga berubah-ubah. Perubahan garis gaya itu menimbulkan GGL induksi pada kumparan sekunder. Hal itu menyebabkan pada kumparan sekunder mengalir arus AC (arus induksi).⁶



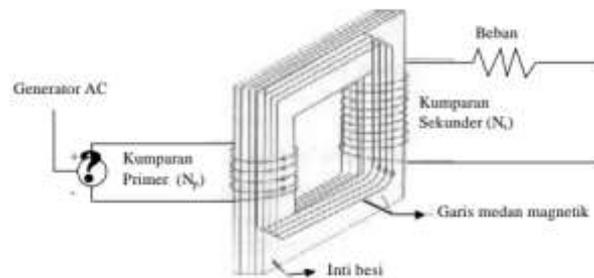
Gambar 2.1 Transformator

2.1.1 Cara Kerja Transformator

Transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik yang ditemukan oleh *Faraday* sehingga di sini harus ada perubahan fluks magnetik. Karena itulah transformator hanya bekerja untuk arus bolak balik. Transformator tidak dapat digunakan untuk mengubah besar tegangan arus searah dari sebuah baterai misalnya. Salah satu alasan utama untuk menggunakan arus bolak-balik dalam kehidupan sehari-hari adalah karena besar tegangannya dapat diubah dengan mudah melalui transformator.

Arus bolak-balik pada kumparan primer menimbulkan induksi magnetik yang berubah-ubah. Fluks magnetik yang terjadi akan mengalir melalui inti besi melewati kumparan sekunder seperti terlihat pada gambar.

⁶ "Transformator", <https://tanotocentre.wordpress.com/2009/06/06/transformator/> diakses 20 April 2021

Gambar 2.2 Cara Kerja Transformator.¹

2.1.2 Komponen Transformator

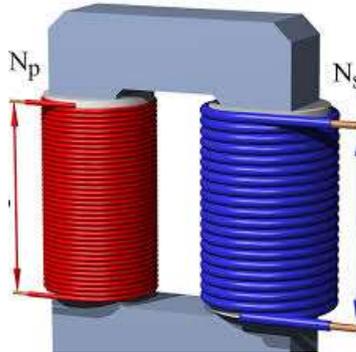
Komponen transformator terdiri dari dua bagian, yaitu peralatan utama dan peralatan bantu. Peralatan utama transformator terdiri dari:

2.1.2.1 Kumparan trafo

Kumparan atau coil merupakan lilitan kawat berisolasi yang mengelilingi inti trafo. Kumparan pada trafo terdiri dari kumparan primer dan kumparan sekunder. Kumparan primer merupakan jalur masuk arus listrik dari sumber tenaga listrik. Sedangkan kumpara sekunder merupakan jalur keluar arus listrik yang menuju ke beban. Jumlah lilitan pada kumparan primer biasanya tergantung dari besaran tegangan masuk dan luas penampang inti trafo. Sedangkan jumlah lilitan pada kumparan sekunder tergantung dari keluaran yang diinginkan, tegangan masuk dan jumlah lilitan kumparan primer. Kumparan primer pada trafo berfungsi untuk merubah arus listrik menjadi fluks medan magnet, sedangkan kumparan sekunder berfungsi sebaliknya.⁷

¹ Hainur Rasjid Achmadi, e-book Generator & Transformator, 2004, hal 18.

⁷ "Bagian-Bagian Transformator Dan Fungsinya", <https://elninoo.blogspot.com/2018/07/bagian-bagian-transformator-dan.html> diakses 20 April 2021



Gambar 2.3 Kumbaran Transformator

2.1.2.2 Inti besi

Dibuat dari lempengan-lempengan feromagnetik tipis yang berguna untuk mempermudah jalan fluksi yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Inti besi ini juga diberi isolasi untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh arus eddy “*Eddy Current*”.

2.1.2.3 Minyak trafo

Berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi. Minyak trafo mempunyai sifat media pemindah panas (disirkulasi) dan mempunyai daya tegangan tembus tinggi. Pada power transformator, terutama yang berkapasitas besar, kumparan-kumparan dan inti besi transformator direndam dalam minyak trafo. Syarat suatu cairan bisa dijadikan sebagai minyak trafo adalah sebagai berikut:

1. Ketahanan isolasi harus tinggi ($>10\text{kV/mm}$).
2. Berat jenis harus kecil, sehingga partikel-partikel inert di dalam minyak dapat mengendap dengan cepat.
3. Viskositas yang rendah agar lebih mudah bersirkulasi dan kemampuan pendinginan menjadi lebih baik.
4. Titik nyala yang tinggi, tidak mudah menguap yang dapat membahayakan.
5. Tidak merusak bahan isolasi padat.
6. Sifat kimia yang stabil.

Tabel 2.1 Keterangan Minyak Trafo²

No.	Sifat Minyak Isolasi	Satuan	Klas I/ Klas II	Metode Uji	Tempat Uji
1.	Kejernihan	-	Jernih	IEC 296	Di tempat
	Massa Jenis (20°C)	g/cm ³	<0.895	IEC 296	Lab
3.	Viskositas (20°C)	cSt	<40 <25	IEC 296	Lab
	Kinematik - (15°C)	cSt	<800		
	Kinematik - (30°C)	cSt	<1800		
4.	Titik Nyala	°C	>140 >100	IEC 296A	Lab
5.	Titik Tuang	°C	<30 <40	IEC 296A	Lab
6.	Angka Kenetralan	mgKOH/g	<0,03	IEC 296	Lab
7.	Korosi Belerang	-	Tidak Korosif	IEC 296	Ditempat/Lab
8.	Tegangan Tembus	kV/2,5mm	>30 >50	IEC 156 & IEC 296	Ditempat/Lab
9.	Faktor Kebocoran Dielektrik	-	<0,05	IEC 250 IEC 474 & IEC 74	Lab
10.	Ketahanan Oksidasi a. Angka Kenetralan b. Kotoran	mgKOH/g%	< 0,40 < 0,10	IEC 74	Lab

² Teknik Pengendalian Instrumen Logam, Jilid 2, Hal 214



2.1.2.4 Bushing

Sebuah konduktor (porselin) yang menghubungkan kumparan transformator dengan jaringan luar. Bushing diselubungi dengan suatu isolator dan berfungsi sebagai konduktor tersebut dengan tangki transformator. Selain itu juga bushing juga berfungsi sebagai pengaman hubung singkat antara kawat yang bertegangan dengan tangki trafo.



Gambar 2.4 Bushing

2.1.2.5 Tangki dan Konservator

Pada umumnya bagian-bagian dari trafo yang terendam minyak trafo ditempatkan di dalam tangki baja. Tangki trafo-trafo distribusi umumnya dilengkapi dengan sirip-sirip pendingin (*cooling fin*) yang berfungsi memperluas permukaan dinding tangki, sehingga penyaluran panas minyak pada saat konveksi menjadi semakin baik dan efektif untuk menampung pemuaiian minyak trafo, tangki dilengkapi dengan konservator.



Gambar 2.5 Tangki dan Konservator



2.1.3 Jenis-jenis Transformator

2.1.3.1 Step-up

Transformator step-up adalah transformator yang memiliki lilitan sekunder lebih banyak daripada lilitan primer, sehingga berfungsi sebagai penaik tegangan. Transformator ini biasa ditemui pada pembangkit tenaga listrik sebagai penaik tegangan yang dihasilkan generator menjadi tegangan tinggi yang digunakan dalam transmisi jarak jauh.

2.1.3.2 Step-down

Transformator step-down memiliki lilitan sekunder lebih sedikit daripada lilitan primer, sehingga berfungsi sebagai penurun tegangan. Transformator ini biasa ditemui pada kehidupan sehari – hari yaitu pada transformator distribusi sebagai penurun tegangan dari jaringan tegangan menengah menjadi jaringan tegangan rendah untuk keperluan konsumen.

2.1.3.3 Autotransformator

Transformator jenis ini hanya terdiri dari satu lilitan yang berlanjut secara listrik, dengan sadapan tengah. Dalam transformator ini, sebagian lilitan primer juga merupakan lilitan sekunder. Fasa arus dalam lilitan sekunder selalu berlawanan dengan arus primer, sehingga untuk tarif daya yang sama lilitan sekunder bisa dibuat dengan kawat yang lebih tipis dibandingkan transformator biasa. Keuntungan dari autotransformator adalah ukuran fisiknya yang kecil dan kerugian yang lebih rendah daripada jenis dua lilitan. Tetapi transformator jenis ini tidak dapat memberikan isolasi secara listrik antara lilitan primer dengan lilitan sekunder. Selain itu, autotransformator tidak dapat digunakan sebagai penaik tegangan lebih dari beberapa kali lipat (biasanya tidak lebih dari 1,5 kali).

2.1.3.4 Transformator isolasi

Transformator isolasi memiliki lilitan sekunder yang berjumlah sama dengan lilitan primer, sehingga tegangan sekunder sama dengan tegangan primer. Tetapi pada beberapa desain, gulungan sekunder dibuat sedikit lebih



banyak untuk mengkompensasi kerugian. Transformator seperti ini berfungsi sebagai isolasi antara dua kalang. Untuk penerapan audio, transformator jenis ini telah banyak digantikan oleh kopling kapasitor.

2.1.3.5 Transformator pulsa

Transformator pulsa adalah transformator yang didesain khusus untuk memberikan keluaran gelombang pulsa. Transformator jenis ini menggunakan material inti yang cepat jenuh sehingga setelah arus primer mencapai titik tertentu, fluks magnet berhenti berubah. Karena GGL induksi pada lilitan sekunder hanya terbentuk jika terjadi perubahan fluks magnet, transformator hanya memberikan keluaran saat inti tidak jenuh, yaitu saat arus pada lilitan primer berbalik arah.

2.1.3.6 Transformator tiga fasa

Transformator tiga fasa sebenarnya adalah tiga transformator yang dihubungkan secara khusus satu sama lain. Lilitan primer biasanya dihubungkan secara bintang (Y) dan lilitan sekunder dihubungkan secara delta (Δ).

2.1.4 Peralatan Bantu Transformator

Adapun peralatan bantu transformator terdiri dari :

2.1.4.1 Peralatan Pendingin

Pada inti besi dan kumparan-kumparan akan timbul panas akibat rugi-rugi besi dan rugi-rugi tembaga. Bila panas tersebut mengakibatkan kenaikan suhu yang berlebihan, akan merusak isolasi di dalam trafo, maka untuk mengurangi kenaikan suhu yang berlebihan tersebut trafo perlu dilengkapi dengan sistem pendingin untuk menyalurkan panas keluar trafo. Media yang digunakan pada sistem pendingin dapat berupa: udara, gas, minyak dan air.



2.1.4.2 Tap Changer

Yaitu suatu alat yang berfungsi untuk merubah kedudukan tap (sadapan) dengan maksud mendapatkan tegangan keluaran yang stabil walaupun beban berubah-ubah. Tap changer selalu diletakkan pada posisi tegangan tinggi dari trafo pada posisi tegangan tinggi. Tap changer dapat dilakukan baik dalam keadaan berbeban (on-load) atau dalam keadaan tak berbeban (off load), tergantung jenisnya.

2.1.4.3 Peralatan Proteksi

Peralatan yang mengamankan trafo terhadap bahaya fisis, elektrik maupun kimiawi. Yang termasuk peralatan proteksi transformator antara lain sebagai berikut:

- a. Rele Bucholz : yaitu peralatan rele yang dapat mendeteksi dan mengamankan terhadap gangguan di dalam trafo yang menimbulkan gas. Di dalam transformator, gas mungkin dapat timbul akibat hubung singkat antar lilitan (dalam fasa/ antar fasa), hubung singkat antar fasa ke tanah, busur listrik antar laminasi, atau busur listrik yang ditimbulkan karena terjadinya kontak yang kurang baik.
- b. Rele tekanan lebih : peralatan rele yang dapat mendeteksi gangguan pada transformator bila terjadi kenaikan tekanan gas secara tiba-tiba dan an langsung mentriapkan CB pada sisi upstream-nya.
- c. Rele diferensial : rele yang dapat mendeteksi terhadap gangguan transformator apabila terjadi flash over antara kumparan dengan kumparan, kumparan dengan tangki atau belitan dengan belitan di dalam kumparan ataupun antar kumparan.
- d. Rele beban lebih : rele ini berfungsi untuk mengamankan trafo terhadap beban yang berlebihan dengan menggunakan sirkit simulator yang dapat mendeteksi lilitan trafo yang kemudian apabila terjadi gangguan akan membunyikan alarm pada tahap pertama dan kemudian akan menjatuhkan PMT.
- e. Rele arus lebih : rele ini berfungsi untuk mengamankan



transformator terhadap gangguan hubunga singkat antar fasa didalam maupun diluar daerah pengaman trafo, juga diharapkan rele ini mempunyai sifat komplementer dengan rele beban lebih. Rele ini juga berfungsi sebagai cadangan bagi pengaman instalasi lainnya. Arus berlebih dapat terjadi karena beban lebih atau gangguan hubung singkat

- f. Rele eksitasi lebih : rele ini berfungsi untuk mengamankan transformator dengan mendeteksi besaran eksitasi atau perbandingan tegangan dan frekuensi.
- g. Rele tangki tanah : rele ini berfungsi untuk mengamankan transformator bila terjadi hubung singkat antara bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan pada transformator.
- h. Rele gangguan tanah terbatas : rele ini berfungsi untuk mengamankan transformator terhadap gangguan tanah didalam daerah pengaman transformator khususnya untuk gangguan di dekat titik netral yang tidak dapat dirasakan oleh rele diferensial.
- i. Rele termis rele ini berfungsi untuk mengamankan transformator dari kerusakan isolasi kumparan, akibat adanya panas lebih yang ditimbulkan oleh arus lebih. Besaran yang diukur di dalam rele ini adalah kenaikan temperatur.

2.1.4.4 Peralatan Pernapasan (*Dehydrating Breather*)

Ventilasi udara yang berupa saringan silikagel yang akan menyerap uap air. Karena pengaruh naik turunnya beban trafo maupun suhu udara luar, maka suhu minyakpun 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 trafo. Permukaan minyak trafo akan selalu bersinggungan



dengan udara luar yang menurunkan nilai tegangan tembus minyak trafo, maka untuk mencegah hal tersebut, pada ujung pipa penghubung udara luar dilengkapi tabung berisi kristal zat hygroskopis.



Gambar 2.6 Peralatan Pernapasan (*Dehydrating Breather*)

2.1.4.5 Indikator

Untuk mengawasi selama transformator beroperasi, maka perlu adanya indikator pada transformator yang antara lain sebagai berikut:

- a. indikator suhu minyak
- b. indikator permukaan minyak
- c. indikator sistem pendingin
- d. indikator kedudukan tap



Gambar 2.7 Indikator



2.2 Gangguan Eksitasi Lebih

Eksitasi lebih pada transformator merupakan suatu kejadian dimana inti transformator mengalami saturasi karena *fluks magnetic* yang mengalir di inti meningkat sehingga meningkatkan arus eksitasi yang melebihi batas desain peralatan.

Seringkali tanpa disadari suatu transformator yang beroperasi pada jaringan mengalami eksitasi lebih. Oleh karena itu perlu diketahui penyebab terjadinya eksitasi lebih pada transformator.

Dalam jaringan, seringkali jarak antara IBT dengan transformator gardu induk sangat jauh hingga ratusan kilometer. Keadaan ini tentu saja menyebabkan tegangan suplai ke transformator gardu induk menjadi turun, bernilai lebih rendah, dibawah tegangan nominalnya bahkan batas toleransi minimum yang diperbolehkan, sehingga tegangan di sisi sekunder (penyulang) pun akan ikut turun, berada di bawah tegangan nominalnya. Begitu juga saat suatu transformator dari keadaan tidak berbeban, kemudian menjadi berbeban, maka tegangan di sisi sekunder akan turun dibandingkan tegangan ratingnya (mengalami *voltage drop*).⁴

Untuk menjaga kualitas ke sisi konsumen, transformator-transformator ke sisi penyulang ini harus dinaikkan kembali tegangannya agar kualitas tegangan yang diisyatkan terpenuhi. Hal ini biasanya dilakukan dengan pengoperasian OLTC (*On Load Tap Changer*) pada posisi tap tertentu sehingga diperoleh nilai tegangan sekunder yang sesuai. Penjelasan ini dapat lebih mudah dipahami dengan rumus :

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \dots\dots\dots (2.1)$$

Tegangan primer (V_p) merupakan tegangan yang diterima dari suplai, sehingga nilainya tetap. Sedangkan tegangan sekunder (V_s) merupakan tegangan hasil konversi transformator sesuai dengan perbandingan lilitan. Nilai tegangan sekunder ini akan dinaikkan kembali ke nilai nominal agar kualitas tetap terjaga.

Belitan sekunder (N_s) bernilai tetap, sehingga untuk menaikan kembali tegangan sekunder, dilakukan dengan mengurangi panjang belitan primer yang

⁴ Muhammad Luqmanul Hakim, "Pengaruh Over Eksitasi pada Transformator Distribusi di Gardu Induk Serpong Terhadap Penuaan Isolasi Kertas Ditinjau dari Sisi Termal."



digunakan (meperkecil rasio belitan) dengan pengoperasian OLTC (penaikan tap-changer).

Hukum faraday menyatakan bahwa gaya gerak listrik (GGL) sebanding dengan rata-rata perubahan fluks.

$$e(t) = -N \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots (2.2)$$

$$e(t) = -N \frac{d(\phi \max \sin \omega t)}{dt} \dots\dots\dots (2.3)$$

$$e(t) = N \omega \phi \max \cos \omega t \dots\dots\dots (2.4)$$

$$\phi = B \cdot A = \frac{\mu i N}{l} A \dots\dots\dots (2.5)$$

Pada frekuensi 50 Hz, maka :

$$E \max = N \cdot \omega \cdot A \cdot B \max \dots\dots\dots (2.6)$$

Dengan $\omega = 2\pi f$

Pada operasi steady-state, nilai rms dari induksi GGL ini adalah :

$$E \text{ rms} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f \cdot A \cdot B \max = \sqrt{2\pi} \cdot f \cdot N \cdot A \cdot B \max \dots\dots\dots (2.7)$$

Pada bagian primer transformator, tegangan (E) bernilai tetap, frekuensi sistem (f) konstan, luas penampang inti (A) juga tetap. Oleh karena itu, penurunan panjang belitan primier (N) yang digunakan akan menyebabkan peningkatan densitas fluks (B) yang terjadi karena bertambahnya fluks yang mengalir pada inti transformator.

Fluks yang mengalir pada suatu penghantar sebanding dengan besar arus. Peningkatan jumlah fluks yang mengalir pada inti akan meningkatkan arus eksitasi. Peningkatan arus eksitasi ini dapat menyebabkan transformator mengalami eksitasi lebih.

Nilai eksitasi lebih yang terjadi adalah sebesar tegangan dibagi dengan frekuensi dalam satuan per unit.

$$\text{Eksitasi lebih} = \frac{V_{pu}}{F_{pu}} \dots\dots\dots (2.8)$$

Fluks magnetic pada inti transformator besarnya sebanding dengan tegangan dan berbanding terbalik dengan frekuensi sistem

$$E = \sqrt{2\pi} \cdot f \cdot N \cdot \phi \dots\dots\dots (2.9)$$

$$\phi = \frac{E}{\sqrt{2\pi} \cdot f \cdot N} \dots\dots\dots (2.10)$$



Oleh karena itu, satuan eksitasi adalah per unit tegangan dibagi dengan per unit frekuensi (volt/hertz). Eksitasi lebih terjadi jika per unit volt/hertz melebihi batas desain perlatan.

Kondisi *over voltage* dan/atau *under frequency* dapat menghasilkan suatu level fluks yang menyebabkan inti transformator mengalami saturasi. Keadaan operasi yang tidak normal ini dapat terjadi pada setiap bagian dari sistem tenaga listrik, termasuk transformator mengalami eksitasi lebih.⁵

Eksitasi lebih pada transformator menyebabkan kenaikan temperatur inti transformator dan meningkatkan temperatur minyak transformator sebagai media pendingin transformator, meningkatkan tingkat kebisingan (*noise*) dan getaran (*vibration*) pada transformator. Beberapa transformator yang mengalami eksitasi lebih mengalami *stress termal* yang lebih besar dibandingkan dengan transformator sejenis pada beban yang sama jika tanpa eksitasi lebih. Eksitasi lebih dapat menyebabkan kerusakan permanen pada belitan dan inti transformator akibat panas yang disebabkan oleh arus eksitasi yang tinggi yang mengalir ketika tegangan meningkat tajam ke level saturasi.

Transformator akan menuju ke kondisi eksitasi lebih ketika tegangan sistem berubah, ketika beban berubah dan/atau faktor daya (PF) berubah, atau ketika kombinasi antara tegangan sistem dan kondisi beban. Peningkatan eksitasi lebih juga dapat menyebabkan penurunan kemampuan menyuplai daya pada transformator. Walaupun penurunan ini tidak terlalu besar, *hot spot* akan meningkat dan menyebabkan terjadinya penuaan pada isolasi transformator sehingga terjadi penurunan masa hidup (*lifetime*) isolasi transformator yang cukup mengkhawatirkan.

Eksitasi lebih pada transformator dapat menyebabkan kerusakan termal pada inti akibat fluks besar yang berlebihan pada rangkaian magnetik. Fluks yang berlebih ini membuat inti besi mengalami saturasi dan mengalir ke dalam struktur yang berdekatan, menyebabkan tingginya rugi-rugi arus *Eddy* pada inti dan material konduktor yang berdekatan.

⁵ Walter A. Elmore, "Protective Relaying Theory and Applications", 2004.



2.2.1 Sistem Per Unit (PU)

Sistem per unit merupakan metode atau cara untuk memudahkan perhitungan-perhitungan dan analisa sistem tenaga listrik. Nilai-nilai yang dinyatakan dalam (pu) ini ialah nilai yang sebenarnya terjadi dibagi dengan suatu nilai dasar. Nilai dasar ini diambil dari sembarang nilai yang dipilih dalam besaran yang sama.³

Dalam analisa sistem daya nilai-nilai yang harus dihitung pun cukup besar apabila tetap menggunakan satuan-satuan biasa. Sehingga memungkinkan terjadinya kesulitan atau kesalahan dalam perhitungan. Maka dari itu diperlukan sebuah metode untuk mengatasi masalah tersebut. Terdapat dua metode yang bisa digunakan untuk mengatasi masalah tersebut yaitu menggunakan persentase dan satuan per unit. Kedua metode perhitungan tersebut, baik dengan persentase maupun dengan satuan per unit, lebih sederhana dibanding menggunakan langsung nilai-nilai ampere, ohm, dan volt yang sebenarnya.

Definisi satuan per unit untuk suatu nilai yang dimana perbandingan nilai tersebut terhadap nilai dasarnya yang dinyatakan dalam desimal. Atau dengan kata lain satuan per unit merupakan sistem penskalaan guna mempermudah kalkulasi atau proses perhitungan dalam menganalisa sebuah sistem jaringan listrik. Besaran-besaran sistem dalam satuan masing-masing, tegangan dalam volt, arus dalam ampere, impedansi dalam ohm, ditransformasikan ke dalam besaran tak berdimensi yaitu per-unit (disingkat pu).

Pada mulanya transformasi ke dalam per-unit dimaksudkan untuk mempermudah perhitungan, namun dengan perkembangan penggunaan komputer maksud penyederhanaan itu sudah kurang berarti lagi. Pernyataan dalam per unit ini sangat bermanfaat terutama bagi sistem yang memiliki beberapa bagian yang dihubungkan oleh trafo dan memiliki level tegangan berbeda.

Nilai per-unit dari suatu besaran merupakan rasio dari besaran tersebut dengan suatu besaran basis. Besaran basis ini berada pada satuan yang sama dengan satuan besaran aslinya sehingga nilai per-unit besaran itu menjadi tidak memiliki satuan atau dimensi.

³ Gustifa Fauzan. "Analisa Sistem Tenaga Listrik Modul 3 Kuantitas Perunit".



$$\text{Nilai per-unit} = \frac{\text{Nilai sebenarnya suatu besaran}}{\text{Besaran dasar atau acuan dalam satuan yang sama}} \dots\dots\dots(2.11)$$

2.3 Relay Proteksi

Relai proteksi atau pengaman adalah susunan piranti, baik elektronik maupun magnetic yang direncanakan untuk mendeteksi suatu kondisi ketidaknormalan pada peralatan listrik yang bisa membahayakan atau tidak diinginkan. Jika bahaya itu muncul maka relai pengaman akan secara otomatis memberikan sinyal atau perintah untuk membuka pemutus tenaga (*circuit breaker*) agar bagian yang terganggu dapat dipisahkan dari sistem yang normal. Relai pengaman dapat mengetahui adanya gangguan pada peralatan yang perlu diamankan dengan mengukur atau membandingkan besaran-besaran yang diterimanya, misalnya arus, tegangan, daya, sudut fase, frekuensi, impedansi, dan sebagainya sesuai dengan besaran yang telah ditentukan. Alat tersebut kemudian akan mengambil keputusan seketika dengan perlambatan waktu membuka pemutus tenaga atau hanya memberikan tanda tanpa membuka pemutus tenaga. Pemutus tenaga dalam hal ini harus mempunyai kemampuan untuk memutus arus hubung singkat maksimum yang melewatinya dan harus mampu menutup rangkaian dalam keadaan hubung singkat yang kemudian membuka kembali. Di samping itu relai berfungsi untuk menunjukkan lokasi dan macam gangguannya. Berdasarkan data dari relai maka akan memudahkan kita dalam menganalisis gangguannya.⁸

Rele proteksi mempunyai tiga elemen dasar yang bekerja saling terkait untuk memutuskan arus gangguan diantaranya adalah :

a. Bagian Perasa

Bagian ini akan meneruskan perubahan dari besaran ukur yang dirasakan ke bagian pembanding.

⁸ “Relai Proteksi pada Sistem jaringan Listrik”, <https://materiselamasekolah.wordpress.com/2016/12/13/relai-proteksi-pada-sistem-jaringan-listrik/> diakses pada 25 April 2021.



b. Bagian Pembanding

Bagian yang akan membandingkan dan menentukan apakah besaran ukur itu masih dalam keadaan normal atau tidak.

c. Bagian Kontrol

Pada bagian ini pembukaan circuit breaker (PMT) atau pemberi signal diatur dan dilaksanakan.

2.3.1 Fungsi Rele Proteksi

Rele proteksi 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 dari gangguan atau kerusakan tersebut yang tidak membahayakan 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 lain yang tidak terganggu didalam sistem tersebut serta mencegah meluasnya gangguan.
- c. Memperkecil bahaya bagi manusia.

2.3.2 Syarat Rele Proteksi

Adapun syarat-syarat rele proteksi yang harus dipenuhi yaitu :

a. Kepekaan (*sensitivity*)

Pada prinsip nya rele harus cukup peka sehingga dapat mendeteksi gangguan dikawasan pengamanannya meski pun dalam kondisi yang memberikan rangsangan yang minimum. Rangsangan minimum ini, biasanya terjadi saat penghantar udara tersentuh pohon (karena tahanan pohon besar). Bila 1 fasa (fasa R) tersentuh pohon, arus gangguan 1 fasa ketanah dapat menjadi kecil (lebih kecil dari penghantar udara langsung terkena tanah).



b. Keandalan (*reliability*)

Ada 3 aspek dalam keandalan (*reliability*) yaitu :

1. *Depandability*

Yaitu tingkat kepastian bekerjanya (keandalan kemampuan bekerjanya). Pada prinsipnya pengaman harus dapat diandalkan bekerjanya (dapat mendeteksi dan melepaskan bagian yang terganggu), Tidak boleh gagal bekerja. Dengan lain perkataan *dependability*-nya harus tinggi.

2. *Security*

Yaitu tingkat kepastian untuk tidak salah kerja (keandalan untuk tidak salah kerja).Salah kerja adalah kerja yang semestinya tidak harus kerja, misalnya karena lokasi gangguan diluar kawasan pengamanannya atau sama sekali tidak ada gangguan, atau kerja yang terlalu cepat atau terlalu lambat.

3. *Availability*

Yaitu perbandingan antara waktu dimana pengaman dalam keadaan siap kerja (*actuallyin service*) dan waktu total operasinya.

c. Selektifitas (*selectivity*)

Pengaman harus dapat memisah kan bagian sistem yang terganggu sekecil mungkin yaitu hanya seksi yang terganggu saja yang menjadi kawasan pengamanan utamanya. Pengamanan sedemikian disebut pengamanan yang selektif. Jadi rele harus dapat membedakan apakah gangguan terletak dikawasan pengamanan utamanyadimana ia harus bekerja cepat atau terletak di seksi berikutnya di mana ia harus bekerja dengan waktu tunda atau harus tidak bekerja sama sekali karena gangguannya diluar daerah pengamanannya atau sama sekali tidak ada gangguan.



d. Kecepatan (*speed*)

Untuk memperkecil kerugian atau kerusakan akibat gangguan, maka bagian yang terganggu harus dipisahkan secepat mungkin dari bagian sistem lainnya. Untuk menciptakan selektifitas yang baik, mungkin saja suatu pengaman terpaksa diberi waktu tunda (*timedelay*). Antara pengaman yang terpasang namun waktu tunda itu harus secepat mungkin, setelah waktu minimum yang diset kan ke rele untuk menghindari *thermal stress*.

2.3.3 Karakteristik Relai Proteksi

Adapun karakteristik dari relai proteksi adalah sebagai berikut :

a. Relai arus lebih seketika (*instanstaneous over current relay*)

Relai arus lebih dengan karakteristik waktu kerja seketika ialah jika jangka waktu relai mulai saat relai arusnya *pick up* (kerja) sampai selesainya kerja relai sangat singkat (20-100 ms), yaitu tanpa penundaan waktu. Relai ini pada umumnya dikombinasikan dengan relai arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu (*definite time*) atau waktu terbalik (*inverse time*) dan hanya dalam beberapa hal berdiri sendiri secara khusus.

b. Relai arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu (*Definite time over current relay*)

Relai arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu ialah jika jangka waktu mulai relai arus *pick up* sampai selesainya kerja relai diperpanjang dengan nilai tertentu dan tidak tergantung dari besarnya arus yang menggerakkan. Relai ini bekerja berdasarkan waktu tunda yang telah ditentukan sebelumnya dan tidak tergantung pada perbedaan besarnya arus.



- c. Relai arus lebih dengan karakteristik waktu terbalik (*Inverse time over current relay*)

Relai dengan karakteristik waktu terbalik adalah jika jangka waktu mulai relai arus pick up sampai selesainya kerja diperpanjang dengan besarnya nilai yang berbanding terbalik dengan arus yang menggerakkan. Relai ini bekerja dengan waktu operasi berbanding terbalik terhadap besarnya arus yang terukur oleh relai. Relai ini mempunyai karakteristik kerja yang dipengaruhi baik oleh waktu maupun arus.

- d. *Inverse Definite Time Relay*

Relai ini mempunyai karakteristik kerja berdasarkan kombinasi antara relai *inverse* dan relai *definite*. Relai ini akan bekerja secara *definite* bila arus gangguannya besar dan bekerja secara *inverse* jika arus gangguannya kecil. Sistem proteksi memiliki komponen utama yaitu Relay, jenis-jenis relay ini dapat di gunakan pada sistem pembangkitan, transmisi tenaga listrik, sistem distribusi dll.