

BAB II DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Berdasarkan topik skripsi yang saya akan bahas, ada beberapa referensi dari penelitian-penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya untuk menentukan batasan-batasan masalah yang akan saya bahas dalam skripsi ini. Dan referensi-referensi ini akan digunakan untuk mempertimbangkan permasalahan apa saja yang berhubungan dengan topik yang akan saya bahas. Adapun referensi yang saya ambil yaitu :

1. Anindyantoro, Muhammad Syahendra (2017) melakukan penelitian dengan judul “*Analisis Tahanan Isolasi Pada Transformator Tenaga Di Gardu Induk Wonogiri*”. Pada penelitian tersebut dijelaskan bahwa kondisi kebersihan pada isolasi transformator sangat mempengaruhi besarnya nilai tahanan pada isolasi transformator. Dan untuk mengetahui kondisi isolasi transformator nilai ujinya harus sesuai dengan standar nilai yang telah ditentukan.
2. Novia, Fidianti (2018) melakukan penelitian dengan judul “*Analisis Tahanan Isolasi Peralatam Utama Gardi Induk*”. Pada penelitian tersebut dijelaskan bahwa nilai tahanan isolasi pada masing-masing peralatan utama Gardu Induk di GI Cawang berada diatas nilai minimal ($>1 \text{ M}\Omega/1 \text{ kV}$), sesuai dengan standar IEEE Std 62: 1995, VDE Catalogue 228/4, dan standar yang dipakai PLN.
3. Wibowo, Dwi Ari (2018) melakukan penelitian dengan judul “*Analisis Pengujian Isolasi Transformator Daya 60 MVA Pada Gardu Induk Jajar*”. Pada penelitian tersebut dijelaskan bahwa berdasarkan hasil uji dan hasil perhitungan pada isolasi transformator sudah memenuhi standar.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Transformator

Transformator atau biasa disebut dengan “*transformer*” adalah sebuah peralatan pada sistem tenaga listrik yang dapat mengubah tegangan listrik AC pada satu level tegangan tertentu ke level tegangan yang lebih tinggi ataupun level tegangan yang lebih rendah yang berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Transformator pada sistem tenaga listrik biasanya digunakan untuk menaikkan atau menurunkan tegangan AC (*transformator step up dan step down*). Selain itu, transformator juga dapat digunakan sebagai sampling tegangan, sampling arus, dan juga mengubah impedansi. Dan pada transformator terdapat dua atau tiga lilitan/kumparan (*winding*) yang digunakan untuk melapisi inti besi feromagnetik. Selain berfungsi sebagai pembungkus inti besi feromagnetik, lilitan/kumparan juga berfungsi sebagai penghasil medan magnetik jika dialiri arus listrik.

Transformator merupakan sebuah peralatan pada sistem tenaga listrik yang sangat handal dan dapat mentransformasikan tegangan listrik dengan jangka waktu yang cukup panjang apabila pemeliharannya dilakukan secara rutin dan baik. Karena apabila terjadi kerusakan pada transformator yang bersifat cukup serius maka perbaikannya akan memerlukan waktu yang cukup lama dengan harga yang cukup mahal. Lalu cara mengatasinya yaitu dengan memastikan bahwa transformator terpasang dengan benar dan terpelihara dengan baik. Oleh karena itu transformator harus dipelihara dengan menggunakan sistem serta peralatan yang benar, baik dan tepat.



Gambar 2.1 Transformator 150 kV

2.2.2 Jenis Transformator

Berdasarkan kebutuhan pemeliharaannya, transformator dapat dibagi menjadi tiga jenis yaitu:

1. Medium isolasi.
2. Kontruksi.
3. Aplikasi dan penggunaan.

2.2.2.1 Medium Isolasi

Berdasarkan medium isolasinya, transformator dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu :

1. Tipe Kering

Transformator tipe kering merupakan sebuah transformator yang bersifat *free maintenance* (bebas pemeliharaan) karena transformator jenis ini tidak menggunakan oli atau minyak transformator sebagai bahan pendinginnya melainkan menggunakan *fan* yang berada didalam unit transformator. Namun karena panasnya yang lumayan tinggi biasanya transformator jenis ini juga membutuhkan perlakuan khusus yaitu dengan cara membuat suhu ruangan tetap stabil sehingga tranformator tipe kering membutuhkan AC (*Air Conditioning*) sebagai pendingin tambahan. Trafo tipe kering juga memiliki alat yang digunakan untuk memonitor kondisi trafo dan sebuah alat trip yang akan aktif jika terjadi *over heating* atau kelebihan panas dari trafo itu sendiri. Pada umumnya transformator tipe kering ini menggunakan 2 jenis pendinginan yaitu pendinginan alami dan pendinginan buatan.

a. Pendinginan alami

Pendinginan alami pada transformator merupakan sebuah sistem pendinginan yang menggunakan sirkulasi alami dari udara melalui kotak transformator.

b. Pendinginan buatan

Pendinginan buatan pada transformator merupakan sebuah sistem pendinginan yang menggunakan udara yang dipaksa masuk dari sirkulasi udara. Transformator dari tipe ini memiliki peralatan seperti semacam kipas yang digunakan untuk memaksa masuk udara ke transformator. Transformator ini memiliki rating 133% dari rating transformator tipe kering pendinginan

sendiri. Kelas desain pendinginan untuk transformator ini adalah FA. Transformator tipe kering dapat diperoleh dengan keduanya yaitu pendinginan sendiri maupun pendinginan dipaksa. Desain dari transformator adalah AA/FA. Transformator tipe kering dapat juga didinginkan oleh gas selain udara. Untuk transformator seperti itu dibutuhkan tangki yang disegel.

2. Tipe Basah

Transformator tipe basah merupakan transformator yang kumparan dan intinya direndam secara keseluruhan pada cairan isolasi yang dimasukkan ke dalam tangki transformator. Tangki ini dilengkapi dengan sirip pendingin untuk sirkulasi dari cairan transformator. Terdapat 2 jenis cairan isolasi yang digunakan pada transformator, yakni oli mineral dan *polychlorinated biphenyls* (PCB) atau biasa disebut dengan *askarel*. *Askarel* merupakan cairan isolasi sintesis yang tidak mudah terbakar. Namun *askarel* bersifat *nonbiodegradable* dan beracun. *Environmental Protection Agency* (EPA) melarang penggunaan *askarel* pada transformator, peralatan elektrik lain dan pada aplikasi baru *askarel* hampir tidak pernah digunakan lagi. Cairan *askarel* pada saat ini dapat digantikan dengan silikon, Rtemp, Wecosal, dan Alpha 1 .

Berdasarkan metode pendinginannya ada beberapa metode pendinginan pada transformator tipe basah yang dapat digunakan, yaitu:

a. ONAN (*Oil Natural Air Natural*)

ONAN (*Oil Natural Air Natural*) adalah sebuah sistem pendinginan pada transformator tipe basah yang pendinginannya sendiri menggunakan sirkulasi alami dari oli. Melalui konveksi arus yang telah diatur pada oli yang disirkulasikan pada tangki dan sirip pendingin maka kelebihan suhu panas pada transformator dapat dihilangkan .

b. ONAF (*Oil Natural Air Forced*)

ONAF (*Oil Natural Air Forced*) adalah sebuah sistem pendinginan pada transformator tipe basah yang pendinginannya sendiri yang menggunakan oli yang akan bersirkulasi dengan alami namun saat oli melalui radiator oli akan didinginkan dibantu dengan kipas/*fan*.

c. OFAF (*Oil Forced Air Forced*)

OFAF (*Oil Forced Air Forced*) adalah sebuah sistem pendinginan pada transformator tipe basah yang pendinginannya sendiri yang menggunakan oli yang telah didinginkan dengan pompa supaya sirkulasinya menjadi semakin cepat dan dengan bantuan kipas/*fan* pada radiatornya.

d. Pendinginan air

Pendinginan air adalah sebuah sistem pendinginan pada transformator tipe basah yang pendinginannya sendiri menggunakan air untuk menghasilkan suhu dingin. Sistem pendinginan ini merupakan proses penukaran panas dari air yang kemudian dipompa melewati pipa yang dipasang di dalam atau di luar tangki transformator.

Khusus pada jenis transformator tipe basah ini, kumparan dan inti transformator akan direndam kedalam minyak transformator, umumnya transformator-transformator yang mempunyai kapasitas yang cukup besar. Alasan direndam karena minyak transformator ini berfungsi sebagai media pendingin dan juga memiliki sifat sebagai bahan isolasi atau mempunyai nilai tegangan tembus yang tinggi.

2.2.2.2 Kontruksi

Berdasarkan bentuk kontruksi nya, transformator dapat dibagi menjadi 2 jenis yaitu kontruksi tangki dan kontruksi inti.

1. Kontruksi tangki

Konstruksi tangki merupakan beberapa tipe tangki yang digunakan pada transformator dan berfungsi untuk mencegah terbukanya cairan isolasi atau oli ke atmosfer. Berikut ini adalah beberapa tipe kontruksi tangki pada transformator.

a. *Free breathing*

Free breathing merupakan tipe tangki transformator yang digunakan untuk bernafas . Fungsi transformator bernafas adalah sebagai perubahan dari tekanan udara dan temperatur diluar tangki. Dan beberapa dari transformator ini pada bagian *breather* nya dapat dilengkapi dengan komponen penghilang cairan (dehidrasi) .

b. Konservator dan tangki ekspansi

Transformator pada tipe ini dilengkapi dengan konservator dan tangki ekspansi. Konservator sendiri berfungsi untuk menyegel cairan transformator dari atmosfer, untuk mengurangi oksidasi dan formasi dari *sludge*. Sementara tangki ekspansi berfungsi sebagai pembantu keseimbangan pada tekanan. Tangki ekspansi ini biasanya diletakkan di atas tangki transformator.

c. Sealed tank

Transformator pada tipe ini dilengkapi dengan gas inert, seperti nitrogen yang berada pada atas tangki transformator. Sehingga sealed tank ini berfungsi ini menyegel gas inert tersebut.

d. Gas-oil sealed

Transformator pada tipe ini memiliki tangki tambahan yaitu gas oil sealed tank. Tangki ini berfungsi untuk menyegel gas dan cairan pada transformator agar tidak keluar ke atmosfer.

e. Vaporization

Transformator pada tipe ini menggunakan cairan isolasi spesial yang tidak mudah terbakar, seperti *florocarbon (General Electric R-113)* dan transformator ini juga mempunyai kondenser spesial yang dirakit las pada bagian atas dari tangki transformator. Kondenser ini berfungsi untuk mendinginkan uap udara dan menjadikannya sebuah cairan.

2. Kontruksi Inti

Berdasarkan kontruksi intinya, transformator dapat dibedakan menjadi 2 tipe, yaitu tipe *core* dan *shell*.

a. Tipe Core

Transformator pada tipe ini, lilitan/kumparan (*winding*) transformator nya akan mengelilingi inti magnetik trafo yang sudah terlaminasi. Dan Sebagian besar dari transformator distribusi berdaya kecil akan menggunakan konstruksi inti seperti ini.

b. Tipe Shell

Transformator pada tipe ini, inti magnetik trafo nya yang akan mengelilingi lilitan/kumparan (*winding*). Dan keuntungan lain dari jenis shell ini adalah pada transformator ini menawarkan jalur terpisah untuk arus urutan nol melalui

inti, sedangkan transformator jenis *core* jalur untuk arus urutan nol nya hanya melalui tangki transformator dan akhir sambungan.

2.2.2.3 Aplikasi dan Penggunaan

Berdasarkan aplikasi dan penggunaannya, transformator dapat dibagi menjadi 5 jenis yaitu transformator distribusi, transformator jaringan, transformator *Arc-Furnance*, transformator penyearah dan transformator daya.

1. Transformator Distribusi

Transformator distribusi merupakan transformator yang memiliki rating 3-500 kVA. Umumnya transformator ini digunakan pada gardu listrik 20 kv dan terdapat pada tiang-tiang pendistribusian listrik. Transformator distribusi memiliki berbagai macam jenis yang tergantung pada sistem pendingin, tipe isolasi, layanan aplikasi, dan metode pemasangannya. Tapi hampir pada semua transformator distribusi menggunakan sistem pendinginan alami.

2. Transformator Jaringan

Transformator jaringan merupakan transformator yang memiliki karakteristik hampir sama dengan transformator distribusi. Namun, pada penerapannya transformator ini sedikit berbeda. Transformator jenis ini memiliki persyaratan yang khusus untuk layanan jaringan, seperti ventilasi, ukuran lemari besi, kemampuan perendaman, dan persyaratan hubung singkat. Transformaor jaringan ini dapat memiliki rating lebih dari 500 kVA.

3. Transformator *Arc-Furnance*

Transformator *Arc-Furnace* merupakan transformator yang mempunyai tujuan khusus yang digunakan dalam proses industri. Karena transformator ini memiliki tegangan yang rendah dengan arus yang tinggi dan digunakan khusus untuk menahan tekanan mekanis yang disebabkan oleh fluktuasi arus yang telah ditentukan. Transformator jenis ini juga memiliki tambahan isolasi kumpanan karena gelombangnya dapat terdistorsi oleh busur api.

4. Transformator Penyearah

Transformator penyearah merupakan transformator yang digunakan untuk penyearah dari AC ke DC dalam sebuah proses di industri. Dan transformator ini dirancang special supaya tahan terhadap tekanan mekanis akibat arus yang tinggi.

5. Transformator Daya

Transformator daya merupakan transformator yang memiliki rating lebih dari 500 kVA dan terutama digunakan untuk mengubah energi dari stasiun pembangkit ke jaringan transmisi, dari jalur transmisi untuk gardu distribusi, ataupun dari jalur layanan utilitas untuk pembangkit gardu distribusi. Umumnya transformator ini ditempatkan di gardu-gardu induk 500 kv, 150 kv dan sistem pembangkit.

2.2.3 Kontruksi Bagian-Bagian Transformator Daya

Pada transformator daya terdapat kontruksi bagian-bagian penting yang membantu dalam proses pengoperasian trafo. Terdapat 4 bagian penting dalam kontruksi pada transformator daya, yaitu bagian utama, peralatan bantu, peralatan proteksi dan peralatan proteksi tambahan untuk pengaman transformator daya.

2.2.3.1 Bagian Utama

1. Inti Besi

Inti besi (*core*) merupakan bagian pada transformator yang memiliki fungsi untuk mempermudah jalannya fluks magnetik yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui lilitan/kumparan (*winding*). Inti besi ini terbuat dari lempengan-lempengan besi tipis yang memiliki isolasi untuk mengurangi panas yang disebabkan oleh adanya *Eddy Current* sebagai efek dari rugi-rugi besi.

2. Kumparan Transformator (*winding*)

Kumparan transformator (*winding*) merupakan bagian pada transformator yang terbuat beberapa lilitan kawat berisolasi yang kemudian membentuk sebuah kumparan. Kumparan pada transformator terdiri dari kumparan primer dan kumparan sekunder yang telah dilapisi dengan isolasi. Baik isolasi terhadap inti besi maupun isolasi antar kumparan dengan bahan isolasi padat seperti karton, pertinax dan sebagainya. Dan fungsi dari kumparan pada transformator ini adalah sebagai alat pengubah level tegangan dan arus yang tinggi ke level yang lebih rendah atau juga sebaliknya..

3. Minyak Transformator

Minyak transformator merupakan bagian pada transformator yang mempunyai fungsi sebagai alat pendingin dan media isolasi pada transformator. Pada sebagian besar transformator tenaga, kumparan dan intinya direndam ke dalam minyak

transformator, terutama transformator-transformator daya yang memiliki kapasitas besar.

4. Bushing

Bushing merupakan bagian pada transformator yang terbentuk dari sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator dan memiliki isolator tersebut fungsi sebagai pembatas antara konduktor dengan tangki transformator. Bushing sendiri memiliki fungsi sebagai penghubung antara kumparan transformator dengan jaringan yang ada diluarnya.

5. Tangki Konservator

Tangki konservator merupakan tangki pada transformator yang berfungsi untuk menampung pemuaiian minyak , mengurangi oksidasi dan formasi dari sludge pada transformator.

2.2.3.2 Peralatan Bantu

1. Pendingin Transformator

Pendingin transformator merupakan bagian pada transformator yang berfungsi sebagai sistem pendingin apabila terjadi kenaikan suhu dan supaya transformator dapat bekerja sesuai dengan rating yang tertera pada spesifikasinya. Transformator yang dilengkapi pendingin biasanya transformator tenaga yang mempunyai kapasitas di atas 10 MVA. Ada dua tipe sistem pendingin transformator yaitu pendinginan alami dan buatan.

2. *Tap Changer*

Tap Changer merupakan bagian pada transformator yang berfungsi sebagai alat perubah perbandingan transformasi untuk mendapatkan tegangan operasi sekunder yang lebih baik (diinginkan) dari tegangan jaringan/primer yang dapat berubah-ubah nilainya. Berdasarkan cara kerjanya tap changer dapat dibagi menjadi 2 jenis yaitu:

- a. Memindahkan posisi tap dalam keadaan transformator tanpa beban. (*Off Load Tap Changer*)
- b. Memindahkan posisi tap dalam keadaan transformator berbeban (*On Load Tap Changer/OLTC*).

Transformator daya yang terpasang di gardu induk pada umumnya menggunakan *tap changer* yang dapat dioperasikan dalam keadaan transformator

berbeban. Sementara transformator yang menaikkan tegangan pada pembangkit atau pada transformator kapasitas kecil, umumnya menggunakan *tap changer* yang dioperasikan hanya pada saat transformator tidak berbeban. *On Load Tap Changer* terdiri dari beberapa bagian yaitu:

- a. *Selector switch.*
- b. *Deviner switch.*
- c. *Transition Resistor.*

Untuk mengisolasi dan meredam panas pada saat proses perpindahan tap, maka OLTC akan direndam di dalam minyak isolasi yang biasanya terpisah dengan minyak isolasi utama transformator (ada beberapa transformator yang kompartemennya menjadi satu dengan main tank).

Kualitas minyak isolasi OLTC akan cepat menurun karena pada saat proses perpindahan hubungan tap akan terjadi fenomena elektrik, mekanik, kimia dan panas, tetapi hal ini juga tergantung pada jumlah kerja dan adanya kelainan di dalam OLTC.

3. Alat Pernapasan (*Silica Gel*)

Alat pernapasan merupakan bagian pada transformator yang berfungsi untuk mencegah agar permukaan minyak tidak selalu bersinggungan dengan udara luar. Karena udara luar yang lembab akan mengakibatkan turunnya nilai tegangan tembus pada minyak transformator. Alat pernapasan transformator ini merupakan sebuah tabung yang berisi kristal zat *hygroskopis*.

Pernapasan pada transformator sendiri merupakan sebuah fenomena dimana apabila suhu minyak tinggi, minyak akan memuai dan mendesak udara diatas permukaan minyak keluar dari tangki, sebaliknya apabila suhu minyak turun, minyak akan menyusut dan udara luar akan masuk kedalam tangki. Hal ini disebabkan pengaruh naik turunnya beban transformator, maka suhu minyak pun akan berubah-ubah mengikuti keadaan tersebut.

4. Indikator

Indikator pada transformator berfungsi untuk mengawasi sistem pada transformator selama beroperasi, berikut ini adalah beberapa indikator pada transformator:

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

2.2.3.3 Peralatan Proteksi

1. Relay Bucholz

Relay Bucholz merupakan peralatan proteksi yang digunakan untuk mendeteksi dan mengamankan transformator terhadap gangguan yang ditimbulkan oleh gas. Berikut ini adalah beberapa faktor yang dapat menimbulkan gangguan gas:

- a. Hubung singkat antar phasa ke tanah.
- b. Hubung singkat antar lilitan.
- c. Hubung singkat antar phaa.
- d. Busur api listrik karena kontak yang kurang baik.
- e. Busur api listrik antar laminasi.

2. Pengaman Tekanan Lebih (*Explosive Membrane/Pressure-relief Ven*)

Pengaman tekanan lebih merupakan peralatan proteksi berupa lapisan tipis (*membrane*) yang terbuat dari plastik, kaca, tembaga ataupun katup bergas. Lapisan ini memiliki fungsi untuk mengamankan tangki transformator terhadap kenaikan tekanan gas yang timbul di dalam tangki, dimana lapisan tersebut akan pecah pada tekanan tertentu. Dan kekuatan lapisan ini lebih rendah dari pada kekuatan tangki transformator.

3. Relay Tekanan Lebih (*Sudden Pressure Relay*)

Relay tekanan lebih merupakan peralatan proteksi yang fungsinya hampir sama dengan *relay bucholz*, yakni sebagai pengaman terhadap gangguan pada bagian dalam transformator. Perbedaannya dengan *relay bucholz* adalah relay ini hanya dapat bekerja pada kenaikan tekanan gas yang tiba-tiba dan langsung menjatuhkan PMT.

2.2.3.4 Peralatan Proteksi Tambahan

1. Relay Differensial

Relay differensial merupakan peralatan proteksi yang berfungsi sebagai pengaman transformator dari gangguan di dalam transformator seperti *flash over*

antar kumparan, kumparan dengan tangki, belitan dengan belitan didalam kumparan ataupun beda kumparan.

2. Relay Arus Lebih

Relay arus lebih merupakan peralatan proteksi yang berfungsi sebagai pengaman transformator dari arus yang melebihi batas yang diperbolehkan pada transformator dan arus lebih ini dapat terjadi karena adanya beban lebih atau gangguan hubung singkat.

3. Relay Tangki Tanah

Relay tangki tanah merupakan peralatan proteksi yang berfungsi sebagai pengaman pada transformator apabila terjadi hubung singkat antara bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan pada transformator.

4. Relay Hubung Tanah

Relay hubung tanah merupakan peralatan proteksi yang berfungsi sebagai pengaman pada transformator apabila terjadi gangguan satu phasa ke tanah.

5. Relay Termis

Relay termis merupakan peralatan proteksi yang berfungsi sebagai pengaman pada transformator dari kerusakan isolasi kumparan transformator yang diakibatkan adanya peningkatan suhu panas yang ditimbulkan oleh arus lebih.

2.2.4 Prinsip Kerja Transformator

Berdasarkan prinsip kerjanya transformator terbagi menjadi dua prinsip hukum dalam sebuah prinsip kerjanya yaitu Hukum Induksi Faraday dan Hukum Lorentz.

1. Hukum Induksi Faraday

Hukum Induksi Faraday adalah hukum dasar *elektromagnetisme* yang menjelaskan bagaimana arus listrik menghasilkan medan magnet dan sebaliknya bagaimana medan magnet dapat menghasilkan arus listrik pada sebuah konduktor. Hukum Induksi Faraday ini juga menjelaskan bahwa gaya listrik melalui garis lengkung yang tertutup berbanding lurus dengan perubahan arus induksi persatuan waktu pada garis lengkung tersebut, sehingga apabila ada suatu arus yang melalui sebuah kumparan maka akan timbul medan magnet pada kumparan tersebut. Penjelasan tersebut berdasarkan hasil percobaan dan kesimpulan oleh Michael Faraday dengan dua prinsip hukum yang sering disebut dengan Hukum Induksi Faraday 1 dan Hukum Induksi Faraday 2.

a. Hukum Induksi Faraday 1

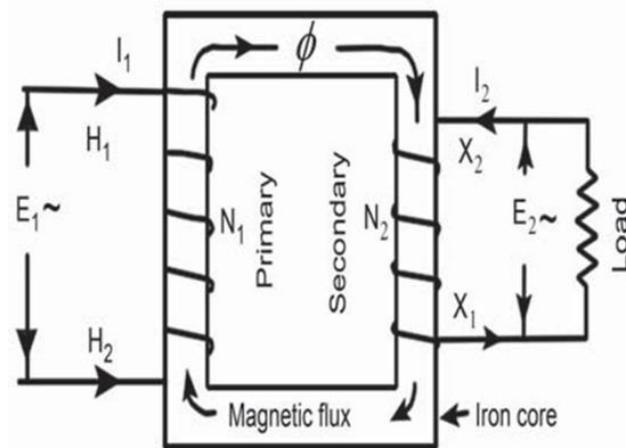
Setiap perubahan medan magnet pada kumparan akan menyebabkan Gaya Gerak Listrik (GGL) yang diinduksikan oleh kumparan tersebut.

b. Hukum Induksi Faraday 2

Tegangan GGL induksi di dalam rangkaian tertutup adalah sebanding dengan kecepatan perubahan fluks terhadap waktu.

2. Hukum Lorentz

Hukum Lorentz adalah hukum yang menjelaskan bahwas arus bolak balik (AC) yang beredar mengelilingi inti besi akan mengakibatkan berubahnya inti besi tersebut menjadi magnet. Kemudian apabila magnet tersebut dikelilingi oleh suatu lilitan, maka lilitan tersebut akan mempunyai perbedaan tegangan pada kedua ujung lilitannya. Dan sesuai Hukum Lorentz maka pada saat kumparan primer diberi arus tegangan AC maka akan menimbulkan medan magnet pada inti transformator yang besarnya tergantung dari besarnya nilai arus listrik yang diberikan. Medan magnet yang terbentuk ini akan menjadi semakin kuat dengan adanya core inti besi dan menghantarkan medan magnet ke bagian kumparan sekunder sehingga pada bagian sekunder akan timbul GGL yang sebenarnya merupakan pelimpahan daya dari sisi primer transformator.



Gambar 2.2 Prinsip kerja transformator

Berdasarkan kedua hukum tersebut dapat disimpulkan bahwa baik hukum induksi Faraday maupun hukum Lorentz keduanya diterapkan dalam prinsip kerja transformator.

2.2.5 Pengujian Transformator

Pengujian transformator dilakukan untuk mengetahui karakteristik, parameter, kondisi maupun performance sebuah transformator. Pengujian transformator ini dapat dibedakan menjadi 3 kelompok pengujian yaitu pengujian rutin, pengujian jenis dan pengujian khusus.

1. Pengujian Rutin

Pengujian rutin merupakan sebuah pengujian yang dilakukan secara rutin dan dilakukan berdasarkan interval waktu yang telah ditetapkan dalam persyaratan atau kriteria tertentu yang dimaksudkan untuk mengurangi serta mencegah suatu peralatan mengalami kondisi yang tidak diinginkan. Berikut beberapa pengujian rutin pada transformator.

- a. Pengujian indeks polarisasi.
- b. Pengujian tangen delta.
- c. Pengujian tegangan tembus minyak transformator (*Break Down Voltage*).

2. Pengujian Jenis

Pengujian jenis merupakan sebuah pengujian yang dilakukan pada sebuah transformator yang mewakili trafo lainnya yang sejenis, yang berfungsi untuk menunjukkan bahwa semua trafo jenis sudah memenuhi persyaratan. Berikut beberapa pengujian jenis pada transformator.

- a. Pengujian kenaikan suhu.
- b. Pengujian impedansi.

3. Pengujian Khusus

Pengujian khusus merupakan pengujian selain dari pengujian rutin dan pengujian jenis, pengujian ini dilakukan atas persetujuan perusahaan produksi transformator dengan perusahaan yang membeli transformator tersebut dan hanya dilaksanakan terhadap satu atau lebih transformator dari sejumlah transformator yang dipesan dalam suatu kontrak. Berikut beberapa pengujian khusus pada transformator.

- a. Pengujian impedansi urutan nol pada trafo tiga fasa.
- b. Pengujian tingkat bunyi akustik.
- c. Pengujian harmonik pada arus beban kosong.

2.2.6 Pengujian Isolasi Transformator

Pengujian isolasi transformator adalah sebuah pengujian yang dilakukan untuk mengetahui kondisi dan kualitas dari isolasi pada transformator. Pengujian ini merupakan salah satu pengujian rutin atau preventive maintenance pada transformator yang dimana pengujian ini dilakukan dengan internal waktu yang telah ditetapkan berdasarkan persyaratan dan kriteria tertentu. Pengujian ini terbagi dari beberapa pengujian seperti pengujian indeks polarisasi, tangen delta, ratio tegangan dan tegangan tembus pada minyak transformator (BDV).

2.2.6.1 Indeks Polarisasi

Indeks polarisasi adalah sebuah pengujian yang dilakukan untuk mengetahui besar kebocoran arus (*leakage current*). *Leakage current* sendiri merupakan arus konduksi nyata pada isolasi. Dan juga termasuk arus bocor dikarenakan kebocoran pada permukaan yang di akibatkan oleh kontaminasi. Pengujian ini bersifat berkelanjutan untuk periode selama 10 menit, dan selama 10 menit ini alat *high voltage insulation test* akan mempunyai kemampuan untuk mempolarisasikan atau mencharger kapasitansi tinggi ke isolasi dan pembacaan nilai resistansi akan meningkat jika isolasi bersih dan kering. Rasio pembacaan 10 menit dibandingkan pembacaan 1 menit (IEC 60034). Jika nilai Indeks Polarisasi (IP) terlalu rendah ini mengindikasikan bahwa lilitan mungkin terkontaminasi oleh oli, kotoran, serangga atau terbasahi oleh air (lembab). Dan keuntungan lain dari indeks polarisasi ini adalah dengan banyaknya hal yang dapat mempengaruhi pembacaan megaohm seperti suhu dan humidity baik pada satu menit maupun sepuluh menit.

Tabel 2.1 Contoh data hasil pengujian indeks polarisasi

URAIAN KEGIATAN		KONDISI AWAL		
SETELAH TRAFO OFF Suhu : °C		1 Mnt	10 Mnt	<i>I_p</i>
1	PRIMER - TANAH (MΩ)	514	740	1,44
2	SEKUNDER - TANAH (MΩ)	334	510	1,53
3	TERTIER - TANAH (MΩ)	319	555	1,74
4	PRIMER - SEKUNDER (MΩ)	441	705	1,60
5	PRIMER - TERTIER (MΩ)	813	1140	1,40
6	SEKUNDER - TERTIER (MΩ)	435	605	1,39

Untuk perhitungan indeks polarisasi dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$IP = \frac{R_{10}}{R_1} \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan :

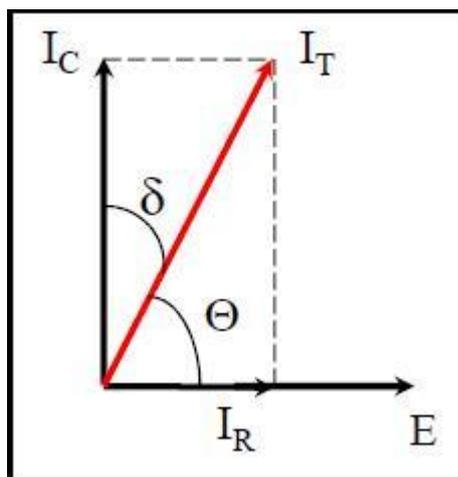
IP = Indeks Polarisasi

R_{10} = Nilai tahanan isolasi saat pengujian selama 10 menit (Ω)

R_1 = Nilai tahanan isolasi saat pengujian selama 1 menit (Ω)

2.2.6.2 Tangen Delta

Pengujian tangen delta merupakan pengukuran kerugian dielektrik untuk mengetahui kualitas isolasi belitan dengan mengukur arus bocor kapasitif. Trafo yang akan diuji dianggap sebagai kapasitor murni. Dan jika kapasitor murni diberi tegangan AC sinusoidal maka arusnya akan mendahului tegangan 90° . Karena kehilangan daya dielektrik, sudut arus mendahului tegangan tidak lagi 90° . Faktor daya dari kapasitor adalah $\cos \phi$. Dan ϕ adalah sudut fasa dari kapasitor. Sudut kehilangan daya (*loss angle*) adalah $\delta = 90^\circ - \phi$. Sehingga faktor dissipasi bisa ditulis sebagai $\tan \delta$. Dalam kapasitor sempurna, $\phi = 90^\circ$ sehingga $\delta = 0$. Karenanya kehilangan daya dalam kapasitor sempurna adalah nol (IEC 61620) .



Gambar 2.3 Hubungan tangen delta dengan Ic dan Ir

Jadi setiap media isolasi yang digunakan pada peralatan listrik memiliki nilai kapasitansi. Dan jika peralatan listrik tersebut mempunyai tegangan maka akan timbul arus kapasitif (I_c) yang bersifat mendahului tegangan sebesar 90° .

$$I_c = V \cdot \omega \cdot C \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan :

I_c = Arus Kapasitif (A)

V = Tegangan (V)

ω = $2\pi f$

C = Kapasitansi (F)

Lalu nilai R (resistansi) yang terdapat pada media isolasi dapat menyebabkan timbulnya arus resistif (I_r), dimana arus resistif sendiri sejajar dengan tegangan

$$I_r = \frac{V}{R} \dots\dots\dots(3)$$

. Dan I_r yang timbul akan menyebabkan terjadinya losses daya (*Watt Loss*). Jadi semakin besar nilai R pada media isolasi nya maka akan semakin besar losses dayanya dan akan mengakibatkan turunnya nilai isolasi.

$$P = V \cdot I_r \dots\dots\dots(4)$$

$$I_r = \frac{P}{V} \dots\dots\dots(5)$$

Keterangan :

I_r = Arus Resistif (A)

V = Tegangan (V)

P = Losses Daya (W)

R = Nilai Resistansi (Ω)

Sementara tangen delta sendiri merupakan hasil dari perbandingan antara arus resistif dengan arus kapasitif, dimana rumus tangen delta yang di dapat sebagai berikut.

$$\text{Tan } \delta = \frac{I_r}{I_c} \dots\dots\dots(6)$$

$$\tan \delta = \frac{P/V}{V \cdot \omega \cdot C} \dots \dots \dots (7)$$

$$\tan \delta = \frac{P}{V^2 \cdot \omega \cdot C} \dots \dots \dots (8)$$

Keterangan :

Tan δ = Tangen Delta (%)

P = Losses Daya (W)

V = Tegangan (V)

ω = $2\pi f$

C = Kapasitansi (F)

Dan setelah melakukan pengujian tangen delta pada transformator berikut adalah contoh data yang dihasilkan dari uji tangen delta.

Tabel 2.2 Contoh data hasil pengujian indeks polarisasi

Pengukuran	Test kV	mA	Watts	PF (%)	Corr Fctr	Cap (pF)
CH+CHL	10,001	36,835	0,9090	0,30	0,93	9775,3
CH	10,001	11,931	0,3060	0,39	0,93	3164,6
CHL(UST)	10,000	24,909	0,5790	0,27	0,93	6607,1
CHL	10,000	24,922	0,603	0,29	0,93	6610,700
CL+CLT	10,000	50,432	1,289	0,30	0,93	13377,4
CL	10,000	3,090	0,2760	0,83	0,93	819,49
CLT(UST)	10,000	47,330	1,008	0,20	0,93	12554,2
CLT	10,000	47,342	1,013	0,20	0,93	12557,910
CT + CHT	10,000	29,110	1,023	0,33	0,93	7721,4
CT	10,000	28,647	1,022	0,33	0,93	7598,5
CHT (UST)	10,000	0,4590	0,0060	0,15	0,93	121,76
CHT	10,000	0,463	0,001	0,02	0,93	122,900

Keterangan tabel:

CH : *Capacitance High*

CHL : *Capacitance High Low*

CL : *Capacitance Low*

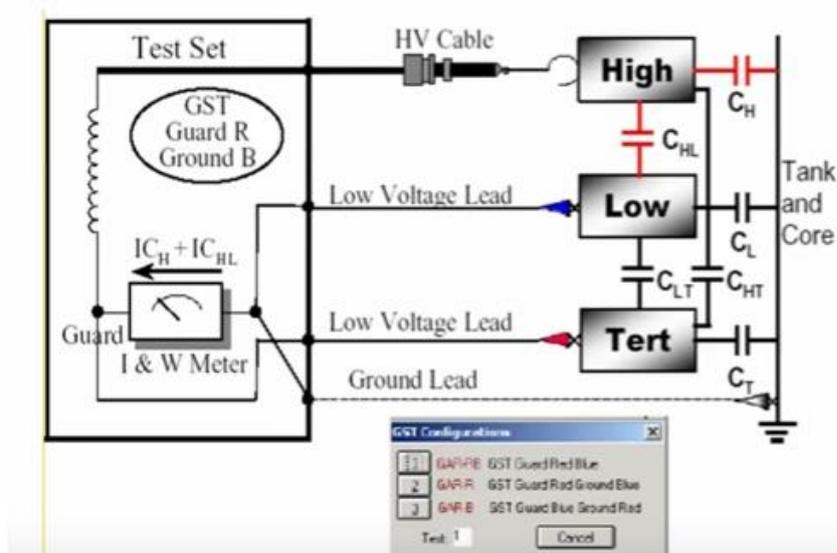
CT : *Capacitance Tersier*

CHT : *Capacitance High Tersier*

CHL : *Capacitance Low Tersier*

Dalam pengujian tangean delta pada transformator ada beberapa metode dalam rangkain pengukurannya, yaitu UST, GST dan GSTg.

1. UST (*Ungrounded Specimen Test*) merupakan metode uji pada tangean delta transformator yang mengukur kapasitansi pada belitan primer dengan belitan sekunder saja tanpa dihubungkan ke ground.
2. GST (*Grounded Specimen Test*) merupakan metode uji pada tangean delta transformator yang mengukur semua kapasitansi belitan yaitu, pada belitan primer dengan ground ,kapasitansi primer dengan sekunder dan kapasitansi primer dengan tersier.
3. USTg (*Ungrounded Specimen Test with Guard*) merupakan metode uji pada tangean delta transformator yang mengukur kapasitansi pada belitan yang dihubungkan dengan *ground* dan *guard*. *Guard* pada metode ini adalah kapasitansi pada belitan yang tidak di uji. Seperti kapasitansi belitan primer dengan ground atau kapasitansi sekunder dengan ground atau kapasitansi murni pada ground. Contoh GSTgB maka belitan yang terhubung dengan kabel biru kapasitansi nya tidak di uji.



Gambar 2.4 Ilustrasi uji tangean delta transformator

Mode uji tangean delta transformator meliputi:

- UST R : Kapasitansi R
- UST B : Kapasitansi B
- GST : Kapasitansi R+B+Ground
- GSTgR : Kapasitansi B+Ground
- GSTgB : Kapasitansi R+Ground
- GSTgRB : Kapasitansi Ground Murni

2.2.6.3 Break Down Voltage

Break Down Voltage adalah sebuah uji tegangan tembus pada minyak transformator, pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kondisi minyak transformator sebagai isolasi. Karena minyak transformator ini memiliki tingkat isolasi yang lebih baik jika dibandingkan dengan udara bebas. Dan salah satu parameter yang dapat menunjukkan baik buruknya kondisi isolasi suatu bahan adalah dengan tegangan tembusnya. Tegangan tembus pada minyak isolasi sendiri merupakan sebuah kemampuan pada bahan isolasi untuk menahan hantaran listrik, lalu jika isolasi tersebut terkena hantaran listrik yang melebihi batas dan berlangsung lama maka isolasi tersebut akan dapat menghantarkan listrik atau gagal melaksanakan fungsinya sebagai isolator. Sementara untuk nilai tegangan tembus dari minyak isolasi akan berbanding lurus dengan kekuatan dielektrik dari minyak isolasi tersebut, jadi jika terjadi kenaikan pada nilai tegangan tembus maka kekuatan dielektrik pada minyak isolasi juga akan meningkat (IEC 60422). Dan untuk perhitungan nilai dielektrik pada minyak isolasi dapat menggunakan rumus sebagai berikut.

$$E_{rata-rata} = \frac{V_{b(rata-rata)}}{d} \text{ (kV/mm)} \dots \dots \dots (10)$$

Keterangan :

- E rata-rata = Kekuatan Dielektrik (kV/mm)
- Vb = Tegangan Tembus (kV)
- d = Jarak Sela (mm)

2.2.7. Penuan Isolasi Transformator

Thermal stress, kandungan air dan oksigen mempengaruhi tingkat penurunan bahan isolasi. Komponen yang paling penting dari sistem isolasi kertas adalah yang membungkus lilitan konduktor tembaga atau aluminium yang tidak mudah diganti. Isolasi dari minyak mineral yang berkualitas baik diperkirakan berlangsung berumur 30 tahun atau lebih sebelum membentuk asam dan lumpur yang berlebihan. Untuk minyak isolasi walaupun penting, tetapi tidak sebegitu penting seperti isolasi kertas karena mudah direkondisi, reklamasi ataupun diganti. Oleh karena itu, umur *cellulosic* material isolasi kertas, menjadi faktor pembatas dalam operasi transformator.

Sebagian besar isolasi padat yang digunakan di dalam trafo tenaga mempunyai karakteristik-karakteristik mekanis dan elektrik yang baik. Sifat ini akan berkurang apabila di pergunakan pada suhu yang tinggi dan untuk selanjutnya lama-kelamaan akan mengakhiri umur trafo. Penurunan kemampuan suatu bahan isolasi akibat panas, biasa disebut dengan penuaan (*Ageing*) dan hal ini merupakan faktor utama yang membatasi kemampuan pembebanan / kemampuan mempertahankan umur perkiraan dari transformator tenaga.

Akibat utama dari penuaan adalah menurunnya kekuatan mekanis dan elektrik dari isolasi belitan transformator. Biasanya penuaan ini terjadi secara perlahan-lahan. Artinya penuaan adalah akibat dari salah satu atau lebih dari reaksi kimia.

Karena terjadi penuaan pada isolasi, maka faktor disipasi tahanan listriknnya akan berkurang. Hal ini akan menambah rugi-rugi dielektrik. Rugi-rugi akan menghasilkan panas yang selanjutnya akan menyebabkan suhu isolasi akan menjadi naik. Dengan naiknya suhu isolasi maka penuaan akan bertambah besar, yang selanjutnya akan memperbesar rugi-rugi dielektrik dan demikian untuk seterusnya.

Efek suhu, air, dan oksigen adalah faktor penting dalam penuaan kertas isolasi (*selulosa*) dan minyak. Proses penuaan telah dibahas secara luas melalui tes mempercepat penuaan dan pengalaman lapangan.

1. Efek Suhu

Secara umum dapat dinyatakan bahwa penyebab utama kemunduran kertas adalah dari ketidakstabilan panas. Penuaan isolasi kertas menurut Arrhenius, ia mengungkapkan pengaruh suhu terhadap penuaan dengan persamaan bahwa untuk setiap kenaikan suhu 6 sampai 8 °C, umur isolasi kertas dibagi dua. Sebagai contoh, jika suhu operasi isolasi adalah 40 °C, kehidupan yang isolasi diperkirakan 110.000 tahun. Namun, jika isolasi yang sama ini terkena suhu 140 °C yang diperkirakan sekarang umurnya hanya sekitar satu tahun. Apabila temperatur hotspot trafo melebihi 140 °C akan menimbulkan gelembung-gelembung gas pada minyak trafo.

2. Efek Air

Efek air pada penuaan kertas adalah sangat signifikan dan merugikan. Tingkat penurunan kertas berbanding lurus dengan kadar air. Sebagai contoh, mengurangi kadar air dalam kertas dari 1,0% menjadi 0,5% akan menggandakan umur kertas. Untuk isolasi kertas termal-upgrade kurang sensitif terhadap efek air daripada kertas Kraft.

3. Efek Oksigen

Penuaan kertas dipengaruhi oleh adanya oksigen meskipun tidak setingkat dengan minyak. Isolasi kertas termal-upgrade bahkan kurang sensitif terhadap efek oksigen daripada kertas Kraft. Perbandingan antara efek lingkungan yang mengandung oksigen tinggi dibandingkan dengan lingkungan oksigen rendah terhadap penuaan kertas Kraft adalah 2,5 : 1. Umur yang diharapkan saat kondisi kering (0,5% air) kertas Kraft biasa dalam lingkungan oksigen tinggi adalah sekitar 4 tahun melakukan operasi pada suhu 100 °C (kenaikan suhu hotspot yang diharapkan pada name plate 55 °C). Sebaliknya, umur yang diharapkan saat kondisi kering untuk kertas kraft termal-upgrade dalam lingkungan oksigen rendah beroperasi pada suhu 110 °C (kenaikan suhu hotspot yang diharapkan pada name plate 65 °C) adalah sekitar 18 tahun (Griffin, Paul J., "*Measurement of Cellulose Insulation Degradation: A Study of Service-Aged Transformers*", Notulen Konferensi Internasional Tahunan Doble Klien ke-15, 1992, Sec. 10, hal. 4,1-4,31).

Sistem isolasi pada transformator mempunyai tujuan untuk mengisolasi antar kumparan trafo dan mengisolasi kumparan trafo dengan dinding trafo atau dengan *ground*. Isolasi merupakan bagian terpenting dari transformator yang harus dipelihara, Umur isolasi merupakan umur dari transformator tersebut.

Kecepatan kerusakan isolasi akibat penuaan bahan isolasi selain ditentukan oleh besarnya panas yang terjadi juga lamanya panas yang dialaminya. Disamping itu adanya air, bocornya tangki transformator, adanya oksigen diatas minyak transformator juga akan mempercepat proses penuaan transformator.

Untuk setiap peralatan yang mempunyai tugas memberikan pelayanan akan mempunyai suatu batas umur dimana peralatan tersebut tidak dapat digunakan kembali. Umur perkiraan transformator tenaga disini didefinisikan berhubungan dengan timbulnya panas yang diakibatkan adanya pembebanan, sehingga transformator tersebut mengalami kegagalan dalam melaksanakan fungsinya.