



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 (rangkaiian 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.

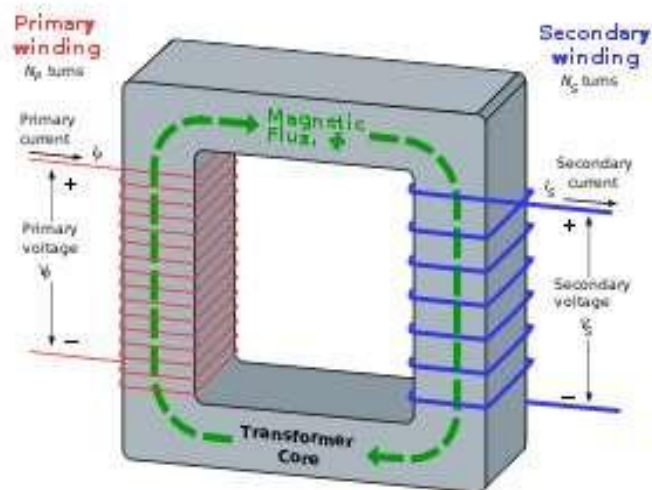
Jika kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan AC (dialiri arus listrik AC), besi lunak akan menjadi elektromagnet. Karena arus yang mengalir tersebut adalah arus AC, garis-garis gaya elektromagnet selalu berubah-ubah. Oleh karena itu,

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).

2.2 Prinsip Kerja Transformator

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

Transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Tegangan masukan bolak-balik yang membentangi primer menimbulkan fluks magnet yang idealnya semua bersambung dengan lilitan sekunder. Fluks bolak-balik ini menginduksikan GGL dalam lilitan sekunder. Jika efisiensi sempurna, semua daya pada lilitan primer akan dilimpahkan ke lilitan sekunder.



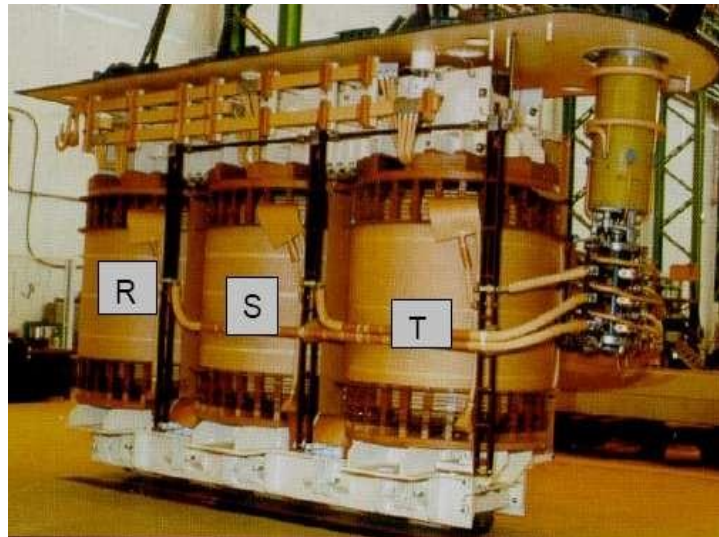
Gambar 2.1 Prinsip Kerja Transformator

2.3 Komponen Transformator

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

2.3.1 Kumparan Trafo

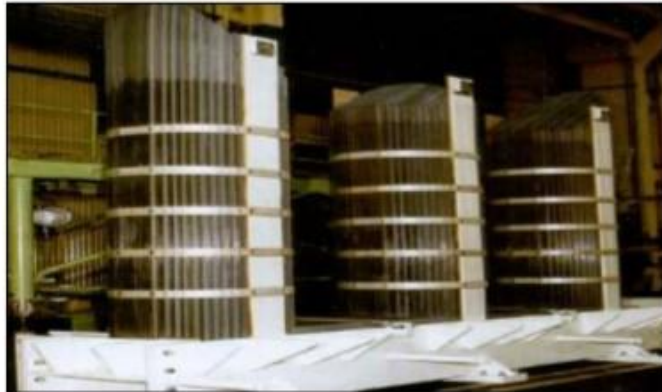
Kumparan trafo terdiri dari beberapa lilitan kawat tembaga yang dilapisi dengan bahan isolasi (karton, pertinax, dll) untuk mengisolasi baik terhadap inti besi maupun kumparan lain. Untuk trafo dengan daya besar lilitan dimasukkan dalam minyak trafo sebagai media pendingin. Banyaknya lilitan akan menentukan besar tegangan dan arus yang ada pada sisi sekunder. Kadang kala transformator memiliki kumparan tertier. Kumparan tertier diperlukan untuk memperoleh tegangan tertier atau untuk kebutuhan lain. Untuk kedua keperluan tersebut, kumparan tertier selalu dihubungkan delta. Kumparan tertier sering juga untuk dipergunakan penyambungan peralatan bantu seperti kondensator synchrone, kapasitor shunt dan reactor shunt.



Gambar 2.2 Kumparan Transformator

2.3.2 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".



Gambar 2.3 Inti Besi

2.3.3 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 Trafo

No	Sifat Minyak Isolasi	Satuan	Klas V Klas II	Metode Uji	Tempat Uji
1	Kejernihan	-	Jernih	IEC 296	Ditempat
2	Masa Jenis (20 ⁰ C)	g/cm ³	<0.895	IEC 296	Lab
3	Viskositas (20 ⁰ C)	cSt	<40 <25	IEC 296	Lab
	Kinematik – (15 ⁰ C)	cSt	<800		
	Kinematik – (30 ⁰ C)	cSt	<1800		
4	Titik Nyala	⁰ C	>140 >100	IEC 296A	Lab
5	Titik Tuang	⁰ 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	Tegang Tembus	kV/2.5mm	>30 >50	IEC 156	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

2.3.4 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.

2.3.5 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 pemuai minyak trafo, tangki dilengkapi dengan konservator.

2.4 Jenis-jenis Transformator

2.4.1 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.

2.4.2 Step Down

Transformator step-down memiliki lilitan sekunder lebih sedikit daripada lilitan primer, sehingga berfungsi sebagai penurun tegangan. Transformator jenis ini sangat mudah ditemui, terutama dalam adaptor AC-DC.

2.4.3 Auto Transformator

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).

2.4.4 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.

2.4.5 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.

2.4.6 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).

2.5 Peralatan Bantu Transformator

Adapun peralatan bantu transformator terdiri dari:

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. **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.

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

- Rele Buchholz; 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.
- Rele tekanan lebih; peralatan rele yang dapat mendeteksi gangguan pada transformator bila terjadi kenaikan tekanan gas secara tiba-tiba dan langsung mentrippingkan CB pada sisi upstream-nya.
- 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.
- 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.
- Rele arus lebih; rele ini berfungsi untuk mengamankan transformator terhadap gangguan hubung singkat antar fasa didalam maupun diluar daerah pengamanan trafo, juga diharapkan rele ini mempunyai sifat komplementer dengan rele beban lebih. Rele ini juga berfungsi sebagai cadangan bagi pengamanan instalasi lainnya. Arus berlebih dapat terjadi karena beban lebih atau gangguan hubung singkat.
- Rele fluks lebih; rele ini berfungsi untuk mengamankan transformator

- dengan mendeteksi besaran fluksi atau perbandingan tegangan dan frekwensi.
- Rele tangki tanah; rele ini berfungsi untuk mengamankan transformator bila terjadi hubung singkat antara bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan pada transformator.
 - 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.
 - 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.
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.
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

2.6 Perawatan dan Pemantauan Transformator

Dengan melakukan perawatan secara berkala dan pemantauan kondisi transformator pada saat beroperasi akan banyak keuntungan yang didapat, antara lain:

- a. Meningkatkan keandalan dari transformator tersebut.
- b. Memperpanjang masa pakai.
- c. Jika masa pakai lebih panjang, maka secara otomatis akan dapat menghemat biaya penggantian unit transformator.

Adapun langkah-langkah perawatan dari transformator, antara lain adalah:

- a. Pemeriksaan berkala kualitas minyak isolasi.
- b. Pemeriksaan/pengamatan berkala secara langsung (Visual Inspection)
- c. Pemeriksaan-pemeriksaan secara teliti (overhauls) yang terjadwal.

Pada saat transformator beroperasi ada beberapa pemeriksaan dan analisa yang harus dilakukan, antara lain:

1. Pemeriksaan dan analisa minyak isolasi transformator, meliputi:
 - Tegangan tembus (*breakdown voltage*) Analisa gas terlarut (*dissolved gas analysis, DGA*)
 - Analisa minyak isolasi secara menyeluruh (sekali setiap 10 tahun)

Pemeriksaan dan analisa kandungan gas terlarut (*dissolved gas analysis, DGA*), untuk mencegah terjadinya partial discharge, kegagalan thermal (*thermal faults*), deteriorasi/pemburukan kertas isolasi/laminasi.

Pemeriksaan dan analisa minyak isolasi secara menyeluruh, meliputi: power factor ($\text{Tan } \delta$), kandungan air (*water content*), neutralization number, interfacial tension, furtual analysis dan kandungan katalisator negatif (*inhibitor content*).

2. Pengamatan dan Pemeriksaan Langsung (Visual Inspections)
 - Kondisi fisik transformator secara menyeluruh
 - Alat-alat ukur, relay, saringan/filter, dan lain-lain.

- Pemeriksaan dengan menggunakan sinar infra-merah (infrared monitoring) setiap dua tahun
3. Karakteristik Akibat Kegagalan Gas

Tabel 2.2 Karakteristik Akibat Kegagalan Gas

No	Jenis Kegagalan	Unsur Gas Yang Timbul
1	Partial Discharge	Hydrogen (H ₂)
2	Busir Api/Arching	Asethylene (C ₂ H ₂)
3	Kegagalan Thermal	Carbon Hydrides (CH ₄ C ₂ H ₄ C ₂ H ₆)
4	Kegagalan Kertas	Carbon Monoxide dan dioxide (CO CO ₂)

4. Tindakan yang biasa dilakukan pada saat Pemeriksaan Teliti (Overhaul)
 - a. Perawatan dan pemeriksaan ringan (*Minor overhaul*), setiap 3 atau 6 tahun.
 - On-load tap changers
 - Oil filtering dan vacuum treatment
 - Relays dan auxiliary devices
 - b. Perawatan dan pemeriksaan teliti (*Major overhaul*)
 - Secara teknis setidaknya 1 kali selama masa pakai
 - Pembersihan, pengencangan kembali dan pengeringan.
 - c. Analisa kimia
Analisa kertas penyekat/laminasi (sekali setiap 10 tahun)
 - d. Pengujian listrik (*Electrical Test*) untuk peralatan
 - Power transformer
 - Bushing
 - Transformator ukur (*measurement transformator*)
 - Breaker capacitors

Pengujian listrik (*Electrical Test*) dilakukan setiap 6 sampai 9 tahun.

Pengujian yang dilakukan meliputi:

- Doble measurements
- PD-measurement
- Frequency Response Analysis (FRA)
- Voltage Test

Penyebab hubung singkat didalam transformator, antara lain:

- a. Gangguan hubung singkat antara lilitan karena kerusakan laminasi
- b. Perubahan kandungan gas H₂, CH₄, CO, C₂H₄ dan C₂H₂.

2.7 Pemeliharaan Transformator

Tujuan pemeliharaan adalah untuk mencegah terjadinya gangguan pada saat unit beroperasi, sehingga tidak mengakibatkan kerusakan yang lebih besar / fatal, dan peralatan tersebut mempunyai masa pakai yang lebih lama, menghasilkan unjuk kerja yang lebih baik serta tingkat keselamatan lebih terjamin. Kerusakan terbesar pada mesin listrik berputar terutama pada mesin induksi disebabkan oleh kerusakan isolasi winding stator. Kerusakan isolasi winding stator biasa disebabkan oleh :

1. Thermal Stresses

Overheating yang terjadi pada winding dan berlangsung lama, menyebabkan stress pada winding & isolasi kawat menjadi rapuh, dan lama kelamaan isolasi akan menjadi retak. Jika gejala ini disertai dengan timbulnya PD (*partial discharge*), maka proses penuaan isolasi akan menjadi lebih cepat.

2. Mechanical Stresses

Winding yang tidak divarnis dengan baik, *connection point*, *blocking coil*, adalah merupakan titik paling lemah terhadap pengaruh dari luar, seperti *mechanical vibration*, dan *magnetic vibration*.

3. Environmental Stresses

Kontaminasi udara lembab, debu, karbon, minyak atau bahan kimia lain, yang terkumpul di permukaan isolasi, adalah merupakan partikel konduktive yang dapat menghantar listrik.

Karena adanya beda potensial antara winding dengan ground, maka partikel tersebut, akan berfungsi sebagai media hantaran untuk menghantar



arus listrik dari winding ke ground, karena sifat kotoran yang demikian maka pada tempat-tempat penumpukan kotoran akan terbentuk jalur hantaran listrik (*Electrical tracking*).

Seperti kita ketahui bahwa pelaksanaan pemeliharaan terdapat beberapa klasifikasi, diantaranya pemeliharaan yang biasa dilakukan secara rutin adalah pemeliharaan jenis preventif.

Pada umumnya pemeliharaan komponen trafo di unit pembangkit thermal dilakukan dalam 2 kategori, yaitu :

- Pemeliharaan yang bersifat rutin.
- Pemeliharaan yang bersifat periodik.

2.7.1 Pemeliharaan Rutin

Pemeliharaan bersifat rutin adalah pemeliharaan yang dilakukan secara berulang dengan periode harian, mingguan dan bulanan dengan kondisi yang sedang beroperasi, yaitu meliputi:

- a. Pemeriksaan temperatur belitan stator, bearing, air pendingin dan lainnya dilakukan setiap hari.
- b. Pemeriksaan kebocoran pendingin minyak (khusus generator dengan pendingin hydrogen) dalam sekali sebulan.
- c. Pemeriksaan vibrasi sekali dalam sebulan.
- d. Pemeriksaan tekanan hydrogen, *seal oil pump*.
- e. Pemeriksaan *fuse rotating rectifier (Brushless Excitation)* atau pemeriksaan sikat arang (*Static Excitation / DC Dinamic Excitation*)

Pada dasarnya penggantian sikat arang dapat dilakukan pada saat mesin beroperasi, karena pada mesin-mesin yang besar sikat arang biasanya dipasang tidak hanya satu tetapi ada beberapa pasang dengan cara parallel.

Ada beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam pelaksanaan penggantian pada kondisi beroperasi, yaitu:

- Terjadinya sengatan listrik atau terbakar



- Terjadi kontak dengan peralatan yang berputar
- Lokasi tempat bekerja harus bersih, penerangan yang cukup dan diberi batas
- Petugas pelaksana harus berpakaian rapi, tidak sobek dan pakaian lengan pendek
- Semua piranti kerja harus terisolasi dan tidak dapat jauh pada saat bekerja
- Beri catatan (Tagging) pada peralatan kontrol bahwa sedang dilakukan pekerjaan penggantian sikat arang.
- Sebelum sikat arang lepas dari rumah sikat arang, periksa dan yakinkan bahwa sikat arang yang lain mengontak dengan baik terhadap komutator Slip Ring
- Cek tekanan sikat arang, tidak boleh terlalu lemah atau terlalu keras

2.7.2 Pemeliharaan Periodik

Pemeriksaan yang bersifat periodik adalah pemeriksaan yang dilakukan berdasarkan lama beroperasi generator, yang diklasifikasikan sebagai berikut:

- a. Pemeriksaan sederhana yang dilakukan setiap 8.000 jam
- b. Pemeriksaan sedang, setiap 16.000 jam
- c. Pemeriksaan serius, setiap 32.000 jam

Pemeriksaan periodik kegiatan yang dilakukan meliputi pembongkaran (*disassembly*), pemeriksaan (*inspection*) dan pengujian (*testing*). Kegiatan pemeriksaan tersebut tidak harus semua komponen dilakukan sama, melainkan tergantung dari klasifikasi pemeriksaan periodiknya.

Pemeriksaan sederhana dan sedang, komponen yang diperiksa tidak seluruhnya melainkan sebagian saja. Tetapi pemeriksaan serius, kegiatan-kegiatan seperti disebutkan diatas dilakukan secara menyeluruh terhadap transformator dan alat bantu.

2.8 Pedoman Pemeliharaan Shutdown Measurement

Shutdown measurement adalah pekerjaan pengujian yang dilakukan pada saat trafo dalam keadaan padam. Pekerjaan ini dilakukan pada saat pemeliharaan rutin maupun pada saat investigasi ketidaknormalan.

2.8.1 Pengukuran Tahanan Isolasi

Pengujian ini dilakukan untuk mendeteksi adanya kelemahan tahanan isolasi. Pengujian isolasi secara rutin dapat dilakukan dengan menggunakan Megger yang pembacaannya langsung dalam Mega Ohm. Tahanan isolasi (*Insulation Resistance*) adalah ukuran kebocoran arus yang melalui isolasi. Yang bertujuan untuk mengetahui kondisi isolasi antara belitan dengan ground atau antara dua belitan. Meroda yang umum dilakukan adalah dengan memberikan tegangan DC dan mempresentasikan kondisi isolasi dengan satuan Mega Ohm. Tahanan isoalsi yang diukur merupakan fungsi dari arus bocor yang menembus melewati isolasi atau melalui jalur bocor pada permukaan eksternal. Pengujian tahanan isolasi dapat dipengaruhi suhu, kelembaban dan jalur bocor pada permukaan eksternal seperti kotoran pada bushing atau isolator. Mega Ohm meter biasanya memiliki kapasitas pengujian 500, 1000 atau 2500 VDC.



Gambar 2.4 Alat ukur Megger

Beberapa faktor yang mempengaruhi pengujian tahanan isolasi faktor-faktor antara lain adalah:

- Arus arbsorpsi
- Suhu

- Tegangan yang diterapkan

Berhubungan dengan adanya arus absorpsi seperti yang diuraikan di muka, maka dalam pengukuran tahanan perlu diperhatikan lamanya tegangan diterapkan dan bahwa sebelum pengukuran dimulai, bahan yang hendak diuji sudah dibebaskan dari muatan yang melekat padanya (waktu pelepasan biasanya 5-10 menit). Selanjutnya untuk menilai kondisi sesuatu bahan isolasi dipakai suatu indeks polarisasi.

2.8.2 Indeks Polarisasi

Indeks Polarisasi merupakan petunjuk kekeringan dan kebersihan dari lilitan, dan hasilnya akan menentukan apakah peralatan aman untuk dioperasikan. Tujuan dari indeks polarisasi adalah untuk memastikan peralatan tersebut layak dioperasikan atau bahkan untuk dilakukan pengujian tegangan lebih. Indeks Polarisasi merupakan rasio tahanan isolasi saat menit ke-10 dengan menit ke-1 dengan tegangan yang konstan.

Pengkategorian kondisi isolasi berdasarkan hasil pengujian tahanan isolasi dilihat dari nilai tahanan isolasinya itu sendiri (*MegaOhm*) dan indeks polarisasinya (perbandingan hasil pengujian tahanan isolasi pada menit ke-10 dengan menit ke-1).

Dengan rumus sebagai berikut:

$$IP = \frac{\text{pengukuran tahanan isolasi menit ke-10}}{\text{pengukuran tahanan isolasi menit ke-1}} \dots\dots\dots(2.1)$$

Jika nilai indeks polarisasi (IP) terlalu rendah ini mengindikasikan bahwa lilitan mungkin terkontaminasi oil, kotoran, serangga, atau terbasahi oleh air (lembab). Maka sebagai nilai parameter Indeks Polaritas menurut standar IEEE Std 43-2000(R2006) tentang Indeks Polaritas yaitu jika nilai Indeks Polarisasi kurang dari 1.25 maka kemungkinan adanya kontaminasi pada isolator stator, misalnya isolasi winding terlalu banyak menyerap uap air (lembab) atau terdapat penumpukan kotoran konduktive, sehingga perlu dilakukan pemeliharaan yaitu membersihkan winding stator dari kontaminasi kotoran atau dengan cara mengeringkan winding stator.

Tabel 2.3 Kondisi Isolasi berdasarkan Indeks Polarisasi

Kondisi	Indeks Polarisasi
Berbahaya	< 1,0
Jelek	1,0 - 1,1
Dipertanyakan	1,1 - 1,25
Baik	1,25 - 2,0
Sangat baik	Di atas 2.0

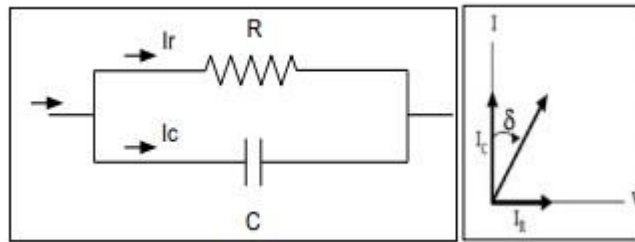
Untuk isolasi belitan yang baik, nilai Indeks Polarisasi harus minimum 1.25 pada pengukuran di temperatur 20 °C.

- Nilai Indeks Polarisasi dibawah diantara 1.25 - 2 , peralatan masih dapat dioperasikan, tapi perlu pengawasan dan pemantauan berkala.
- Nilai Indeks Polarisasi dibawah 1.25, mengindikasikan isolasi belitan peralatan tersebut dalam keadaan basah, kotor atau sudah ada yang bocor. Sehingga perlu dilakukan pembersihan, pengeringan dan refurbish apabila ditemukan kerusakan pada isolasinya.

2.8.3 Pengukuran Tangen Delta

Isolasi yang baik akan bersifat kapasitif sempurna seperti halnya sebuah isolator yang berada diantara dua elektroda pada sebuah kapasitor. Pada kapasitor sempurna, tegangan dan arus fasa bergeser 90° dan arus yang melewati isolasi merupakan kapasitif. Jika ada defect atau kontaminasi pada isolasi, maka nilai tahanan dari isolasi berkurang dan berdampak kepada tingginya arus resistif yang melewati isolasi tersebut. Isolasi tersebut tidak lagi merupakan kapasitor sempurna. Tegangan dan arus tidak lagi bergeser 90° tapi akan bergeser kurang dari 90°. Besarnya selisih pergeseran dari 90° merepresentasikan tingkat kontaminasi pada isolasi.

Dibawah ini merupakan gambar rangkaian ekivalen dari sebuah isolasi dan diagram phasor arus kapasitansi dan arus resistif dari sebuah isolasi. Dengan mengukur nilai IR/IC dapat diperkirakan kualitas dari isolasi.



Gambar 2.5 Rangkaian Ekivalen Isolasi dan Diagram Phasor Arus Pengujian Tangen Delta

A. Pengujian Tangen Delta Pada Isolasi Trafo

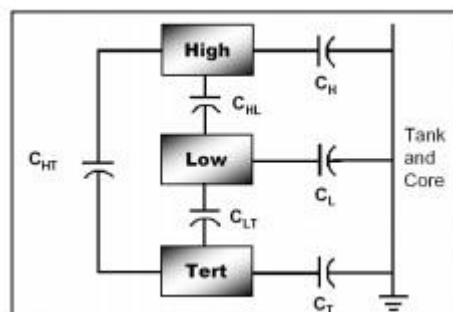
Sistem isolasi trafo secara garis besar terdiri dari isolasi antara belitan dengan ground dan isolasi antara dua belitan. Terdapat tiga metode pengujian untuk trafo di lingkungan PT PLN, yaitu metode trafo dua belitan, metode trafo tiga belitan dan metode autotrafo.

Titik pengujian trafo dua belitan yaitu:

- Primer – Ground (CH)
- Sekunder – Ground (CL)
- Primer – Sekunder (CHL)

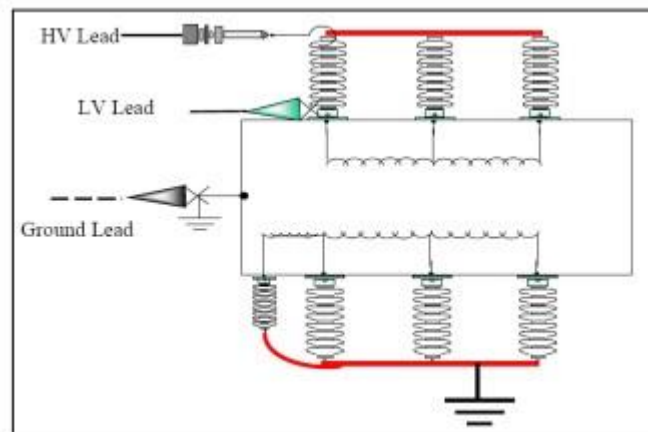
Untuk pengujian trafo tiga belitan titik pengujiannya adalah:

- Primer – Ground
- Sekunder – Ground
- Tertier – Ground
- Primer – Sekunder
- Sekunder – Tertier
- Primer – Tertier

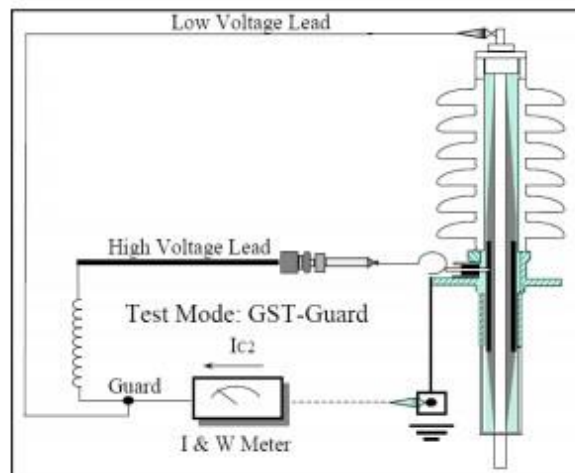


Gambar 2.6 Rangkaian Ekivalen Isolasi Trafo

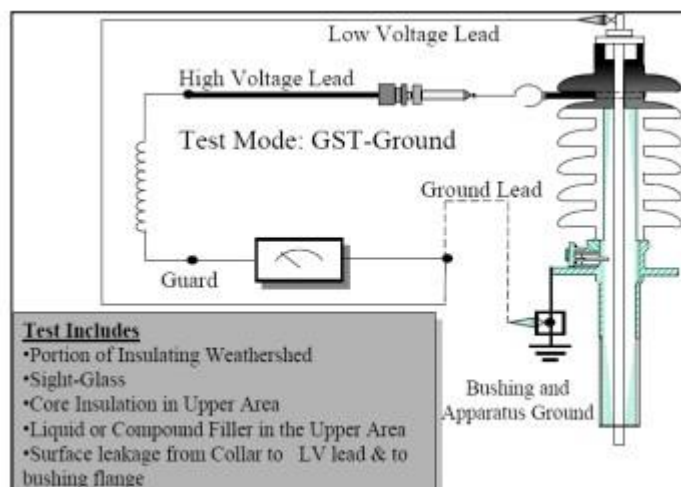
Untuk autotrafo, metode pengujian dilakukan sama dengan metode trafo dua



Gambar 2.9 Diagram Pengujian Tangen Delta C1 pada Bushing



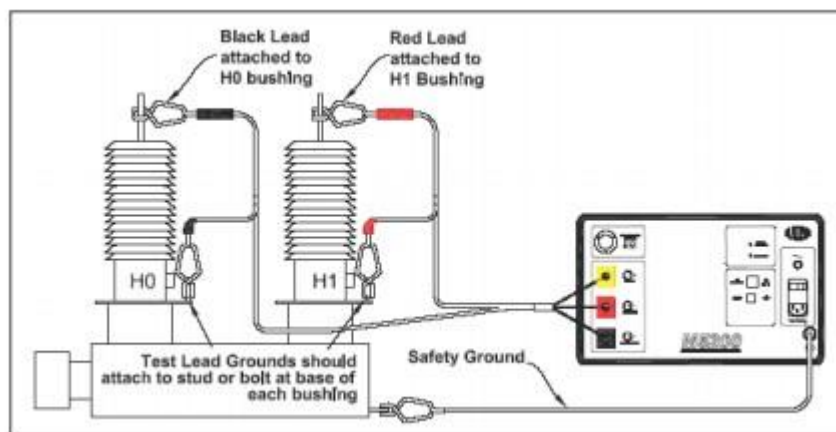
Gambar 2.10 Diagram Pengujian Tangen Delta C2 pada Bushing



Gambar 2.11 Diagram Pengujian Tangen Delta Hot Collar Pada Bushing

2.8.4 Pengukuran SFRA (Sweep Frequency Response Analyzer)

SFRA adalah suatu metode untuk mengevaluasi kesatuan struktur mekanik dari inti, belitan dan struktur clamping pada trafo dengan mengukur fungsi transfer elektrik terhadap sinyal bertengangan rendah dalam rentang frekuensi yang lebar. SFRA merupakan metode komparatif, yaitu evaluasi kondisi trafo dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran terbaru terhadap referensi.

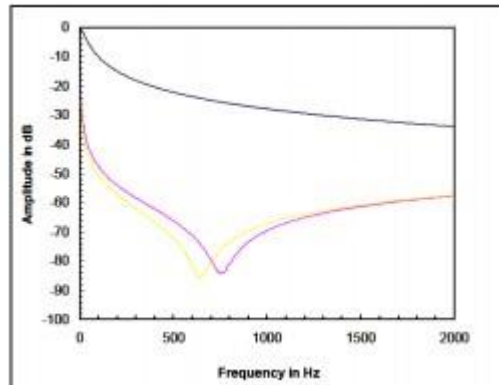


Gambar 2.12 Wiring Pengujian SFRA

SFRA mendeteksi:

- Deformasi belitan (Axial dan Radial seperti hoop buckling, tilting dan spiraling)
- Pergeseran antar belitan
- Partial Winding Collapse
- Lilitan yang terhubung singkat atau putus
- Kegagalan pentanahan pada inti atau screen
- Pergerakan inti
- Kerusakan struktur clamping
- Permasalahan pada koneksi internal

Gambar di bawah menunjukkan contoh dimana SFRA dapat mendiagnosa sebuah short turn dalam sebuah trafo step up generator. Dalam kasus ini, respons salah satu fasa sangat berbeda terhadap dua fasa yang lain yang mengindikasikan terjadi short turn.



Gambar 2.13 Short Turn Satu Fasa Pada Trafo Generator

Pengujian SFRA merupakan pengujian lanjutan apabila terjadi hal-hal sebagai berikut, antara lain: Sebelum dan setelah transportasi, gempa dan gangguan hubung singkat yang besar.

2.8.5 Ratio Test

Tujuan dari pengujian ratio belitan pada dasarnya untuk mendiagnosa adanya masalah dalam antar belitan dan seksi – seksi sistem isolasi pada trafo. Pengujian ini akan mendeteksi adanya hubung singkat antar lilitan, putusya lilitan, maupun ketidaknormalan pada tap changer.

Metoda pengujiannya adalah dengan memberikan tegangan variabel pada sisi HV dan melihat tegangan yang muncul pada sisi LV. Dengan membandingkan tegangan sumber dengan tegangan yang muncul maka dapat diketahui ratio perbandingannya.

Pengujian dapat dilakukan dengan menggunakan alat Transformer Turn Ratio Test.



Gambar 2.14 Alat Uji Ratio Test

2.8.6 Pengukuran Tahanan DC (R_{dc})

Pengujian tahanan dc dimaksudkan untuk mengukur nilai resistif (R) dari belitan dan pengukuran ini hanya bisa dilakukan dengan memberikan arus dc (direct current) pada belitan. Oleh karena itu pengujian ini disebut pengujian tahanan dc.

Pengujian tahanan dc dilakukan untuk mengetahui kelayakan dari koneksi – koneksi yang ada di belitan dan memperkirakan apabila ada kemungkinan hubung singkat atau resistansi yang tinggi pada koneksi di belitan. Pada trafo tiga fasa proses pengukuran dilakukan pada masing – masing belitan pada titik fasa ke netral.

Alat uji yang digunakan untuk melakukan pengukuran tahanan dc adalah micro ohmmeter atau jembatan wheatstone. Micro ohmmeter adalah alat untuk mengukur nilai resistif dari sebuah tahanan dengan orde $\mu\Omega$ (micro ohm) sampai dengan orde Ω (ohm).

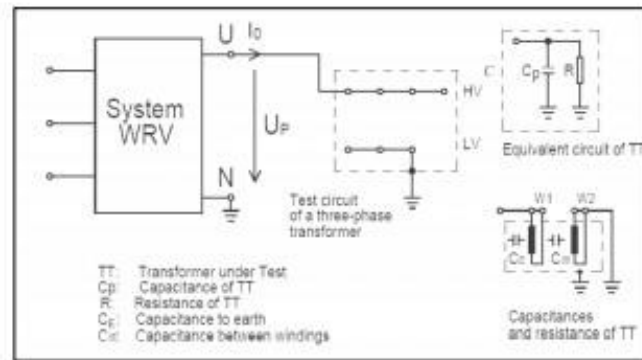


Gambar 2.15 Alat Uji Micro Ohm Meter

2.8.7 HV Test

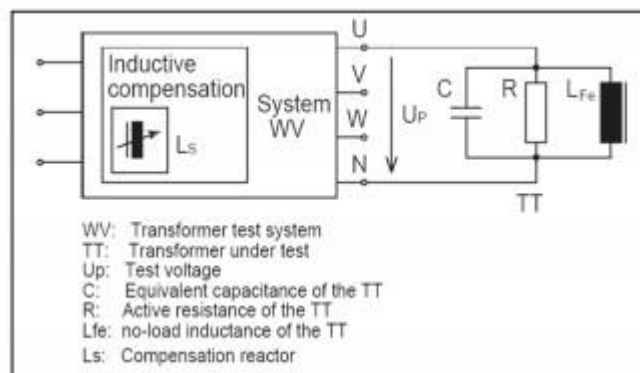
Pengujian HV test dilakukan dengan tujuan untuk meyakinkan bahwa ketahanan isolasi trafo sanggup menahan tegangan. Isolasi yang dimaksud adalah isolasi antara bagian aktif (belitan) terhadap ground, koneksi-koneksi terhadap ground dan antara belitan satu dengan yang lainnya.

Secara umum ada dua jenis pengujian HV test, Applied voltage test dan induce voltage test. Applied voltage test berarti menghubungkan objek uji langsung dengan sumber tegangan uji.



Gambar 2.16 Prinsip dan Rangkaian Pengujian Applied Voltage Test

Induce voltage test berarti objek uji akan mendapatkan tegangan uji melalui proses induksi.



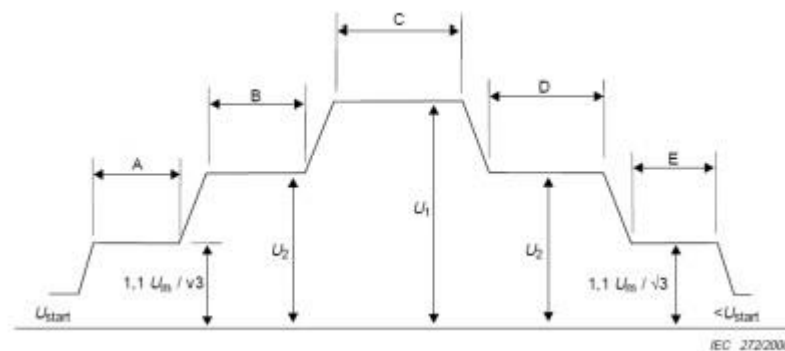
Gambar 2.17 Rangkaian Pengujian Induce Voltage Test

Berdasarkan standar IEC, pelaksanaan pengujian HV test dapat dilengkapi dengan pengujian Partial discharge (PD) untuk mengetahui kondisi isolasi trafo pada saat mendapat stress tegangan.

Tabel 2.4 Rekomendasi Pengujian PD Pada Pelaksanaan Induce Test

Category of winding	Highest voltage for equipment Um (Kv)	Three phase transformer			Single phase transformer	
		ACLD	ACSD		ACLD	ACSD
			Single phase (Phase to earth test)	Three-phase Phase to phase test		
Uniform Insulation	< 72.5			Routine test		Routine test
	72.5 < Um < 170			Routine test with PD		Routine test with PD
	170 < Um < 300	Routine test with PD			Routine test with PD	
	> 300	Routine test with PD			Routine test with PD	
Non Uniform Insulation	72.5 < Um < 170		Routine test with PD	Routine test with PD		Routine test with PD
	170 < Um < 300	Routine test with PD			Routine test with PD	
	> 300	Routine test with PD			Routine test with PD	

Besarnya tegangan uji dan lamanya proses pengujian telah diatur pada standar IEC 60076-3. Untuk peralatan yang sudah beroperasi di lapangan atau trafo yang sudah dilakukan perbaikan, maka tegangan pengujian yang dilakukan adalah sebesar 80% dari standar.



Gambar 2.18 Besar dan Durasi Waktu Pelaksanaan Induce Test

Dimana:

$A = B = E \rightarrow 5$ menit

$C = 120 * fr / fp$ (sec), akan tetapi harus ≥ 15 detik

fr = frekuensi rated peralatan, fp = frekuensi pengujian

$U_{start} < 1/3 * U_2$

ACSD:

D = 5 Menit

$U_2 = 1.3U_m$ (phase to phase) = $1.3U_m / \sqrt{3}$ (phase to earth)

Up (Lihat Annex D, tabel D.1 pada IEC 60076 – 3)

Tabel 2.5 Tegangan Pengujian Induce Test

Highest voltage for equipment U_m kV r.m.s.	Rated short-duration induced or separate source a.c. withstand voltage according to tables 2, 3 or 4 kV r.m.s.	Test voltage U_1 phase-to-phase kV r.m.s.	Partial discharge evaluation level phase-to-earth $U_2 = 1,3 \frac{U_m}{\sqrt{3}}$ kV r.m.s.	Partial discharge evaluation level phase-to-phase $U_2 = 1,3 U_m$ kV r.m.s.
100	150	150	75	130
100	185	185	75	130
123	185	185	92	160
123	230	230	92	160
145	185	185	110	185
145	230	230	110	185
145	275	275	110	185
170	230	230	130	225
170	275	275	130	225
170	325	325	130	225
245	325	325	185	320
245	360	360	185	320
245	395	395	185	320
245	460	460	185	320
300	395	395	225	390
300	460	460	225	390
362	460	460	270	470
362	510	510	270	470
420	460	460	290	505
420	510	510	290	505
420	570	570	315	545
420	630	630	315	545
550	510	510	380	660
550	570	570	380	660
550	630	630	380	660
550	680	680	380	660

NOTE 1 For $U_m = 550$ kV and part of $U_m = 420$ kV, the p.d. evaluation level should be reduced to $1,2 U_m / \sqrt{3}$ and $1,2 U_m$ respectively.

NOTE 2 When the ACSD withstand voltage U_1 is smaller than the p.d. phase-to-phase evaluation level U_2 , U_1 should be taken as equal to U_2 . Internal and external clearances should be designed accordingly.

ACLD:

D = 60 menit untuk $U_m > 300$ kV

D = 30 menit untuk $U_m < 300$ kV

$U_2 = 1.5U_m / \sqrt{3}$ (phase to earth)

$U_1 = 1.7U_m / \sqrt{3}$ (phase to earth)

2.8.8 Pengukuran Kadar Air Pada Kertas

Apabila persentasi saturasi air dalam minyak menunjukkan isolasi kertas dalam kondisi cukup basah atau lebih buruk, maka perlu dilakukan pengujian kadar air dalam kertas.

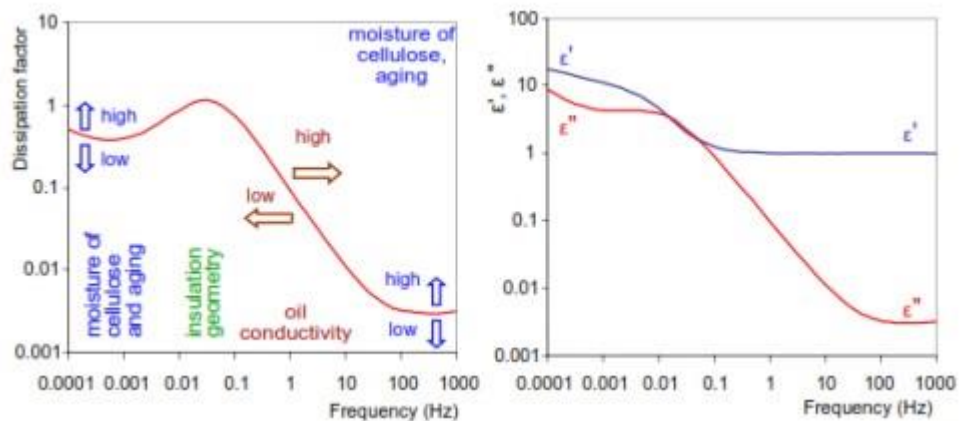
Kelembaban pada isolasi padat di belitan trafo dapat diketahui dengan menggunakan metode-metode sebagai berikut:

a. Metode Polarization Depolarization Current (PDC)

Pengujian dengan metode ini dilakukan dengan mengaplikasikan tegangan DC pada isolasi trafo pada periode waktu tertentu lalu diukur arus polarisasinya. Kemudian isolasi dihubung singkat pada waktu yang variable dan arus diukur lagi (depolarization current). Metode diagnostic dielektrik menghitung kelembaban pada kertas atau pressboard dari arus polarisasi dan depolarisasi yang diukur pada selang waktu tertentu.

b. Metode Frequency Domain Spectroscopy (FDS)

Prinsip pengujian dengan metode ini hampir sama dengan pengujian Capacitance dan Dissipation/ Power Factor. Perbedaannya adalah dalam pengujian ini digunakan frekuensi yang bermacam-macam, biasanya antara 0.001 Hz hingga 1000 Hz seperti ditunjukkan grafik di bawah ini.



Gambar 2.19 Grafik Pengukuran Kadar Air Dalam Kertas

2.8.9 Pengukuran Arus Eksitasi

Arus eksitasi trafo merupakan arus trafo yang terjadi ketika tegangan diberikan pada terminal primer dengan terminal sekunder terbuka. Arus eksitasi juga dikenal sebagai pengujian no load atau arus magnetisasi trafo.

Pengujian arus eksitasi mampu mendeteksi adanya permasalahan pada belitan seperti hubung singkat atau belitan yang terbuka, sambungan atau kontak buruk, permasalahan pada inti dan sebagainya. Pengujian ini merupakan pengujian lain yang bisa dilakukan menggunakan alat uji Power Factor. Pada pengujian ini, tegangan diberikan pada belitan primer dan belitan yang lain terbuka.

2.8.10 Pengujian OLTC

a. Continuity Test

Pengujian ini memanfaatkan Ohmmeter yang dipasang serial dengan belitan primer trafo. Setiap perubahan tap/ratio, nilai tahanan belitan diukur. Nilai tahanan belitan primer pada saat terjadi perubahan ratio tidak boleh terbuka (open circuit).

b. Dynamic Resistance

Pengukuran dynamic Resistance dilakukan untuk mengetahui ketidaknormalan kerja pada OLTC khususnya yang berkaitan dengan kontak diverter maupun selektor switch.

c. Pengukuran Tahanan Transisi dan Ketebalan Kontak Diverter Switch

Pengukuran tahanan transisi dan ketebalan kontak dilakukan untuk memastikan resistor masih tersambung dan nilai tahanannya masih memenuhi syarat.

2.8.11 Pengujian Rele Bucholz

Rele bucholz menggunakan kombinasi limit switch dan pelampung dalam mendeteksi ketidaknormalan di trafo. Oleh karena itu perlu dipastikan limit switch dan pelampung tersebut masih berfungsi dengan baik. Indikasi alarm yang diinformasikan dari rele ke ruang kontrol disampaikan melalui kabel kontrol. Pengujian rele bucholz juga ditujukan untuk memastikan kondisi kabel kontrol masih dalam kondisi baik sehingga mala kerja rele yang berakibat pada kesalahan informasi dapat dihindari.

Item-item pelaksanaan pemeliharaan Rele Bucholz adalah sebagai berikut:

a. Lepas terminasi kabel untuk kontak Alarm, kontak Trip, dan Common

dikontrol panel dan diberi tagging supaya tidak keliru pada saat memasang kembali.

- b. Pastikan kontak Alarm, kontak Trip, dan Common sudah lepas dengan mengukur tahanannya terhadap Ground
- c. Hubungkan probe alat uji tahanan isolasi dengan tegangan uji 500 V ke terminal kontak relai Bucholz di kontrol panel
- d. Ukur tahanan isolasi kontak (fasa-fasa) dan pilih yang terkecil nilainya dari
 - o Alarm – Common
 - o Trip – Common
 - o Alarm – TripUkur tahanan isolasi pengawatan (fasa-ground) dan pilih yang terkecil nilainya dari
 - o Alarm – Ground
 - o Trip – Ground
 - o Common – Ground

Hasil ujinya harus mempunyai nilai $R > 2M\Omega$

2.8.12 Pengujian Rele Jansen

Sama halnya dengan rele bucholz, indikasi alarm dari rele jansen yang diinformasikan ke ruang kontrol disampaikan melalui kabel kontrol. Pengujian rele jansen ditujukan untuk memastikan kondisi kabel kontrol masih dalam kondisi baik sehingga mala kerja rele yang berakibat pada kesalahan informasi dapat dihindari.

Item – item pelaksanaan pemeliharaan Rele Jansen adalah sebagai berikut:

- a. Pada terminal blok, lakukan cek continuity dengan AVO meter pada terminal ukur untuk memastikan posisi dari terminal common dan kontak NO. Sebelumnya, pastikan katup penggerak pada posisi normal.
- b. Ukur tahanan isolasi kontak (NO) dengan cara menghubungkan probe alat uji tahanan isolasi (tegangan uji 500 V) ke kontak NO dan Common pada terminal ukur relai jansen.
- c. Mengukur tahanan isolasi terminal ukur untuk Fasa-Fasa dan FasaGround.
- d. Mengukur tahanan isolasi pengawatan.
- e. Hasil ujinya harus mempunyai nilai sebesar $R > 2M\Omega$

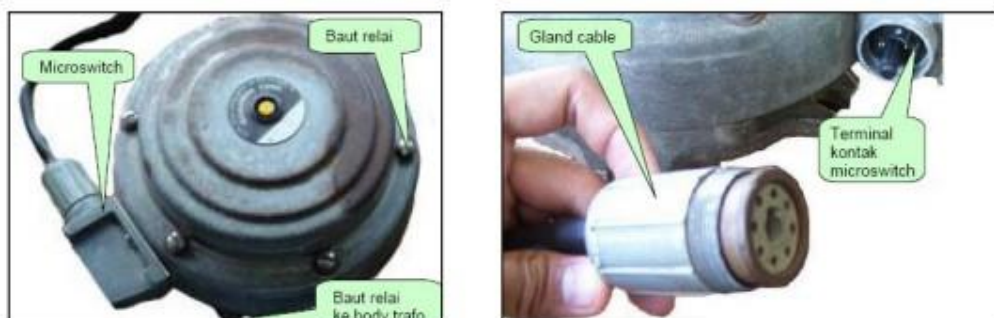


Gambar 2.20 Terminal Pada Rele Jansen

2.8.13 Pengujian Sudden Pressure

Rele sudden pressure ini didesain sebagai titik terlemah saat tekanan didalam trafo muncul akibat gangguan. Dengan menyediakan titik terlemah maka tekanan akan tersalurkan melalui sudden pressure dan tidak akan merusak bagian lainnya pada maintank. Untuk menjaga kesiapan kerja rele sudden pressure maka dilakukan pemeliharaan dengan item-item sebagai berikut:

- Membuka terminal kontak microswitch.
- Lakukan cek kontinuity dengan AVO meter pada terminal kontak untuk memastikan posisi kontak NO.
- Hubungkan probe alat uji tahanan isolasi dengan tegangan uji 500 V ke terminal kontak pada relai sudden pressure.
- Mengukur tahanan isolasi kontak untuk Phasa - Phasa dan Phasa - Ground (serta tahanan isolasi pengawatan).
- Catat hasil pengukuran pada blanko yang telah disiapkan
- Hasil ujinya harus mempunyai nilai sebesar $R > 2M\Omega$.



Gambar 2.21 Rele Sudden Pressure

2.8.14 Tahanan NGR

Neutral grounding resistor berfungsi sebagai pembatas arus dalam saluran netral trafo. Agar NGR dapat berfungsi sesuai desainnya perlu dipastikan bahwa nilai tahanan dari NGR tersebut sesuai dengan spesifikasinya dan tidak mengalami kerusakan.

Untuk mengukur nilai tahanan NGR dilakukan dengan menggunakan voltage slide regulator, voltmeter dan amperemeter.

Pada prinsipnya NGR akan diberikan beda tegangan pada kedua kutubnya dan dengan memanfaatkan pengukuran arus yang mengalir pada NGR dapat diketahui nilai tahanan.



Gambar 2.22 Voltage Slide Regulator



Gambar 2.23 Voltmeter



Gambar 2.24 Tang Meter