



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Transformator

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

Trafo terdiri dari dua gulungan kawat yang terpisah satu sama lain, yang dibelitkan pada inti yang sama. Daya listrik dipisahkan dari kumparan primer ke kumparan sekunder dengan perantaraan garis gaya magnet (flux magnet) yang dibangkitkan oleh aliran listrik yang mengalir melalui kumparan primer.

Untuk dapat membangkitkan tegangan listrik pada kumparan sekunder, flux magnet yang dibangkitkan oleh kumparan primer harus berubah-ubah. Untuk memenuhi hal ini, aliran listrik yang mengalir melalui kumparan primer haruslah aliran listrik bolak-balik.

Saat kumparan primer dihubungkan ke sumber listrik AC, pada kumparan primer timbul gaya gerak magnet bersama yang bolak-balik juga. Dengan adanya gaya gerak magnet ini, disekitar kumparan primer timbul flux magnet bersama yang juga bolak-balik. Adanya flux magnet bersama ini pada ujung-ujung kumparan sekunder timbul gaya gerak listrik induksi sekunder yang mungkin sama, lebih tinggi, atau lebih rendah dari gaya gerak listrik primer. Hal ini tergantung pada perbandingan transformasi kumparan trafo tersebut.

Jika kumparan sekunder dihubungkan ke beban, maka pada kumparan sekunder timbul arus listrik bolak-balik sekunder akibat adanya gaya gerak listrik induksi sekunder. Hal ini mengakibatkan timbul gaya gerak magnet pada kumparan sekunder dan akibatnya pada beban timbul tegangan sekunder.

---

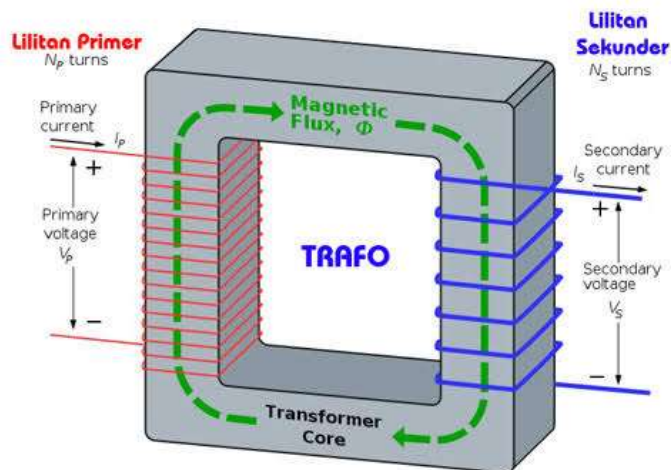
<sup>1</sup> Tim Review KEPDIR, *Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga*, 2014, Hal 1

Kombinasi antar gaya gerak magnet induksi sekunder dan primer disebut induksi silang atau *mutual induction*.<sup>2</sup>

## 2.2 Prinsip Kerja Transformator<sup>3</sup>

Transformator adalah suatu peralatan listrik elektromagnetik statis yang berfungsi untuk memindahkan / mengubah energi listrik dari satu rangkaian listrik ke rangkaian listrik lainnya, dengan frekuensi yang sama dan perbandingan transformasi tertentu. Transformator menggunakan prinsip hukum induksi Faraday dan hukum Lorentz dalam menyalurkan daya, dimana apabila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, maka akan mengalir arus dalam kumparan primer menimbulkan perubahan fluks magnetik dalam inti besi.

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.<sup>4</sup>



Gambar 2.1 Prinsip Kerja Transformator

<sup>2</sup> Drs. Yon Rijono, *Dasar Teknik Tenaga Listrik*, 2004, Hal 5-6

<sup>3</sup> Badaruddin, Fery agung Firdianto, *Analisa Minyak Transformator pada Transformator Tiga Fasa di PT X*, 2016, Hal 2

<sup>4</sup> Yaved Pasereng Tondok, Lily setyowaty Patras, Fielman Lisi, *Perencanaan Transformator Distribusi 125 kVA*, 2019, Hal 2

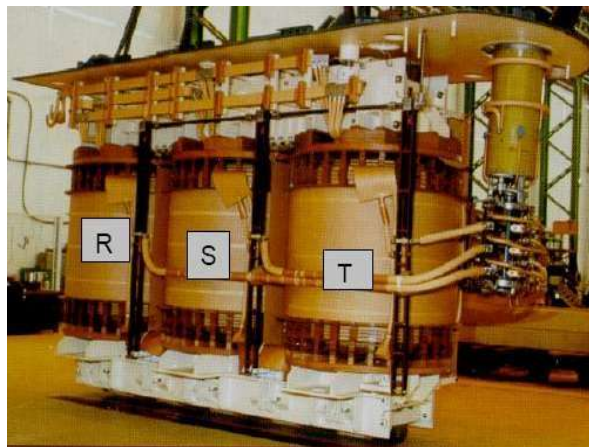
## 2.3 Komponen Transformator

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

### 2.3.1 Kumparan Trafo<sup>5</sup>

Kumparan transformator terdiri dari lilitan kawat berisolasi dan membentuk kumparan. Kawat yang dipakai adalah kawat tembaga berisolasi yang berbentuk bulat atau plat. Kumparan-kumparan transformator diberi isolasi baik terhadap kumparan lain maupun inti besinya.

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.<sup>6</sup>



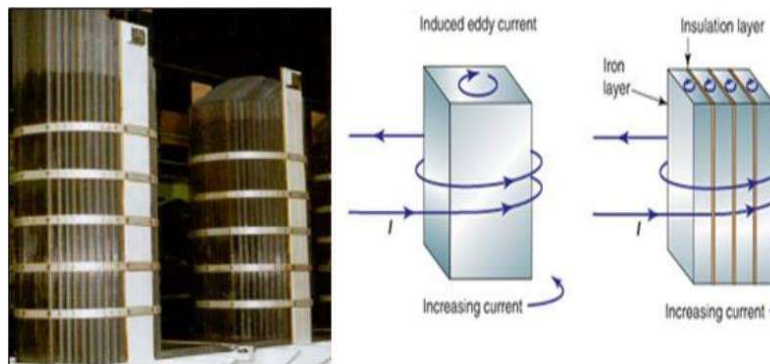
**Gambar 2.2 Kumparan Transformator**

<sup>5</sup> Ali Supriyadi, *Hubungan pada Transformator Tiga Fasa*, 2017, Hal 47

<sup>6</sup> Direktorat Jenderal Pendidikan Dasar dan Menengah, *Teknik Pengendalian Intrumen Logam Kelas X Semester 4*, 2013, Hal 216

### 2.3.2 Inti Besi<sup>7</sup>

Inti besi digunakan sebagai media mengalirnya flux yang timbul akibat induksi arus bolak balik pada kumparan yang mengelilingi inti besi sehingga dapat menginduksi kembali ke kumparan yang lain. Dibentuk dari lempengan-lempengan besi tipis berisolasi dengan maksud untuk mengurangi eddy current yang merupakan arus sirkulasi pada inti besi hasil induksi medan magnet, dimana arus tersebut akan mengakibatkan rugi-rugi (losses).



Gambar 2.3 Inti Besi

### 2.3.3 Minyak Trafo<sup>8</sup>

Untuk mendinginkan transformator saat beroperasi maka kumparan dan inti transformator direndam di dalam minyak transformator, minyak juga berfungsi sebagai isolasi.

Oleh karena itu minyak transformator harus memenuhi persyaratan, sebagai berikut :

- Mempunyai kekuatan isolasi (Dielectric Strength).
- Penyalur panas yang baik dengan berat jenis yang kecil, sehingga partikel-partikel kecil dapat mengendap dengan cepat;
- Viskositas yang rendah agar lebih mudah bersirkulasi dan kemampuan pendinginan menjadi lebih baik;
- Tidak nyala yang tinggi, tidak mudah menguap.
- Sifat kimia yang stabil.

<sup>7</sup> Tim Review KEPDIR, *Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga*, 2014, Hal 2

<sup>8</sup> Ali Supriyadi, Loc.Cit

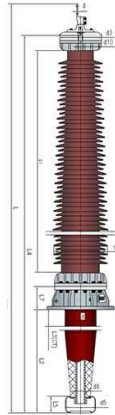
**Tabel 2.1 Keterangan Minyak Trafo**

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

Sumber: *Crostech Oil Tes Report*

### 2.3.4 Bushing<sup>9</sup>

Bushing merupakan sarana penghubung antara belitan dengan jaringan luar. Bushing terdiri dari sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator. Isolator tersebut berfungsi sebagai penyekat antara konduktor bushing dengan body main tank trafo.



**Gambar 2.4 Bushing**

### 2.3.5 Tangki dan Konservator<sup>10</sup>

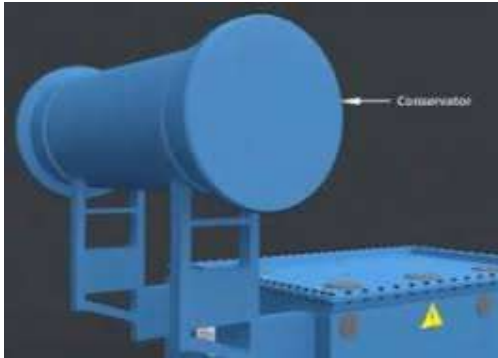
Tangki transformator berfungsi untuk menyimpan minyak transformator dan sebagai pelindung bagian-bagian transformator yang direndam dalam minyak. Ukuran tangki disesuaikan dengan ukuran inti dan kumparan.

Konservator merupakan tabung berisi minyak transformator yang diletakan pada bagian atas tangki. Fungsinya adalah :

- Untuk menjaga ekspansi atau meluapnya minyak akibat pemanasan;
- Sebagai saluran pengisian minyak.

<sup>9</sup> Tim Review KEPDIR, *Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga*, 2014, Hal 3

<sup>10</sup> Prih sumardjati Sofian yahya ali Mashar, *Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik*, 2008, Hal 359-360



**Gambar 2.5 Tangki Konservator Trafo**

## **2.4 Jenis-jenis Transformator<sup>11</sup>**

### **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

---

<sup>11</sup> Idham A. Djufri, *Transformator*, 2021, hal 8-12

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 ( $\Delta$ ).

### **2.5 Peralatan Bantu Transformator<sup>12</sup>**

Adapun peralatan bantu transformator terdiri dari:

#### **2.5.1 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

---

<sup>12</sup> Ibid., Hal 13-15



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.

### **2.5.2 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.

### **2.5.3 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 an langsung mentriapkan 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 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.

- 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 diferential.
- 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.

#### **2.5.4 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.

#### **2.5.5 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<sup>13</sup>

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 ( $\tan \delta$ ), kandungan air (*water content*), neutralization number, interfacial tension, furtual analysis dan kandungan katalisator negatif (*inhibitor content*).

---

<sup>13</sup> Sabari, *Pemeliharaan transformator 60 MVA di Gardu Induk 150 KV Kebasen*, 2015, Hal 34

## 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 <sub>2</sub> )
2	Busur Api/Arching	Asethylene (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )
3	Kegagalan Thermal	Carbon Hydrides ( CH <sub>4</sub> C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )
4	Kegagalan Kertas	Carbon Monoxide dan dioxide ( CO <sub>1</sub> CO <sub>2</sub> )

## 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 transformer*)
  - 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 H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> dan C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>.

## 2.7 Pemeliharaan Transformator<sup>14</sup>

Transformator daya memerlukan pengujian, perawatan, serta pengarsipan data hasil uji guna menghilangkan potensi-potensi sebab kerusakan. Jenis program pengujian yang dilakukan:

### 1. In Service Inspection

Inspeksi yang dilakukan saat trafo dalam kondisi operasi (in service). Tujuannya untuk mendeteksi secara dini ketidaknormalan yang mungkin terjadi tanpa melakukan pemadaman.

### 2. In Service Measurement

Pengukuran yang dilakukan saat trafo dalam keadaan in service. Tujuannya untuk mengetahui kondisi trafo lebih dalam tanpa melakukan pemadaman.

### 3. Shutdown Testing/Measurement

Pengukuran yang dilakukan saat trafo padam, seperti saat pemeliharaan rutin maupun saat investigasi ketidaknormalan.

Merawat trafo listrik berguna untuk memaksimalkan kinerja trafo listrik dan memperpanjang usia trafo tersebut. proses ini perlu dilakukan secara berkala untuk tujuan jangka pendek dan jangka panjang melalui pemeriksaan rutin dan mendesak. Berikut ini beberapa langkah-langkah perawatan trafo listrik yang dilakukan secara berkala :

---

<sup>14</sup> Bayu Ari Wibowo, *Analisis Pengukuran dan Pemeliharaan Transformator Daya di PT.PLN (Persero) P3B Jawa Bali APP Semarang, 2013, Hal 2*

### 2.7.1 Pengujian dan Pemeriksaan Harian<sup>15</sup>

Ada 3 pemeliharaan trafo yang perlu dilakukan setiap hari. Berikut ini 3 proses tersebut :

1. Selalu periksa Magnetic Oil Gauge (MOG) dari tangka utama dan tangki konservatori. Pastikan Magnetic Oil Gauge berada pada level yang tepat.
2. Cek silika gel dan ganti jika warnanya sudah berubah menjadi merah muda.
3. Periksa kebocoran dan jika terjadi segera segel.

### 2.7.2 Pemeliharaan Trafo Bulanan

Perawatan trafo setiap bulannya juga perlu dilakukan melalui serangkaian proses berikut ini:

1. Periksa level minyak dalam tutupnya agar tidak turun dibawah batas yang disarankan. Proses ini berguna untuk mencegah kerusakan trafo listrik.
2. Periksa kebersihan silika gel untuk menjaga lubang ‘pernapasan’ di silika gel.
3. Jika terdapat oil filling bushing pada trafo listrik Anda, pastikan selalu oil didalamnya berada di level yang benar. Proses ini sangat penting dan perlu dilakukan secara berkala setiap bulannya.

### 2.7.3 Pemeliharaan Trafo 6 Bulanan

Disamping melakukan pemeliharaan bulanan, pemeliharaan setiap 6 bulan juga perlu dilakukan khususnya pada bagian oli transformator. Dalam 6 bulan, oli transformator perlu diperhatikan kekuatan dielektriknya, kadar air, keasaman, kandungan lumpur, titik nyala, DDA, IFT dan tingkat resistivitasnya.

### 2.7.4 Pemeliharaan Trafo Tahunan

Proses perawatan trafo tahunan bisa dilakukan dengan beberapa tahapan sebagai berikut :

1. Memeriksa kipas udara dan pompa oli yang berguna untuk mendinginkan trafo dan sirkuit kontrol.
2. Membersihkan area bushing trafo dengan menggunakan kain katun lembut

---

<sup>15</sup> PT Sumberdaya Sewatama, *Langkah-langkah Perawatan Trafo Listrik yang Perlu dilakukan secara Berkala*, <https://sewatama.com/id/langkah-langkah-perawatan-trafo-listrik-yang-perlu-dilakukan-secara-berkala/>, akses 7 Juli 2022

3. Periksa kondisi minyak OLTC. Cara ini bisa dilakukan dengan mengambil sampel dari katup pembuangan. Kemudian uji kadar air dan kekuatan dielektriknya. Jika kekuatan dielektriknya rendah sementara kadar airnya tinggi, maka minyak OLTC perlu segera diganti.
4. Inspeksi relay Buchholz
5. Bersihkan semua kotak Marshalling dari dalam. Periksa juga penerangan dan pemanas ruangan apakah berfungsi dengan baik atau tidak. Kemudian, periksa koneksi terminal kontrol dan kabel relay serta kencangkan setiap setahun sekali.
6. Periksa area sakelar kontrol, Alarm dan relay beserta sirkuitnya. Bersihkan area tersebut dengan tepat.
7. Periksa indikator suhu dan pastikan berfungsi dengan benar
8. Periksa resistansi isolasi dan indeks polarisasi transformator dengan megger
9. Analisa DGA atau gas terlarut dalam transformator oil. Proses ini perlu dilakukan sekali dalam setahun untuk trafo 132 KV, 2 tahun sekali untuk trafo listrik dibawah 132 KV dan dalam interval 2 tahun untuk trafo listrik diatas 132 KV.

## 2.8 Pedoman Pemeliharaan Shutdown Measurement<sup>16</sup>

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. Metode 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

---

<sup>16</sup> Tim Review KEPDIR, *Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga*, 2014, Hal 38-57

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 2.6** 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 arbsorpsi 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.

#### **Nilai Minimum Tahanan Isolasi**

Batasan tahanan isolasi sesuai Buku Pemeliharaan Peralatan SE.032/PST/1984 dan menurut standard VDE (catalogue 228/4) *minimum* besarnya tahanan isolasi pada suhu operasi dihitung:

$$1 \text{ kilo Volt} = 1 \text{ M}\Omega \text{ (Mega Ohm)} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dengan catatan 1 kV = besarnya tegangan fasa terhadap tanah, kebocoran arus yang diijinkan setiap kV = 1 mA.



### 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:

$$IP = \frac{\text{pengukuran tahanan isolasi menit ke-10}}{\text{pengukuran tahanan isolasi menit ke-1}} \dots\dots\dots(2.3)$$

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

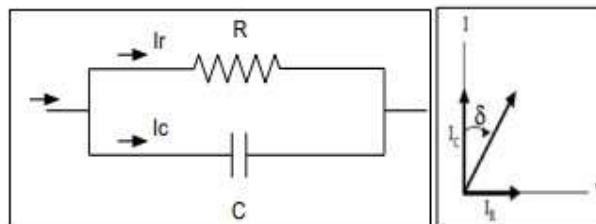
Untuk isolasi belitan yang baik, nilai Indeks Polarisasi harus minimum 1.25 pada pengukuran di temperatur 20 °C.

- 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 2.7 Rangkaian Ekivalen Isolasi dan Diagram Phasor Arus Pengujian Tangen Delta**

### A. Pengujian Tangen Delta Pada Isolasi Trafo

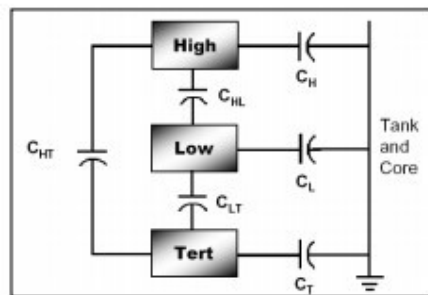
Sistem isolasi trafo secara garis besar terdiri dari isolasi antara belitan dengan ground dan isolasi antara dua belitan. Terdapat tiga metode pengujian untuk trafo di lingkungan PT PLN, yaitu metode trafo dua belitan, metode trafo tiga belitan dan metode autotrafo.

Titik pengujian trafo dua belitan yaitu:

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

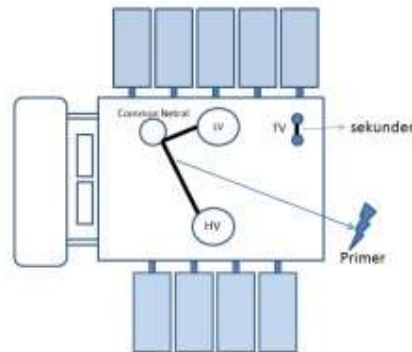
Untuk pengujian trafo tiga belitan titik pengujiannya adalah:

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



**Gambar 2.8 Rangkaian Ekuivalen Isolasi Trafo**

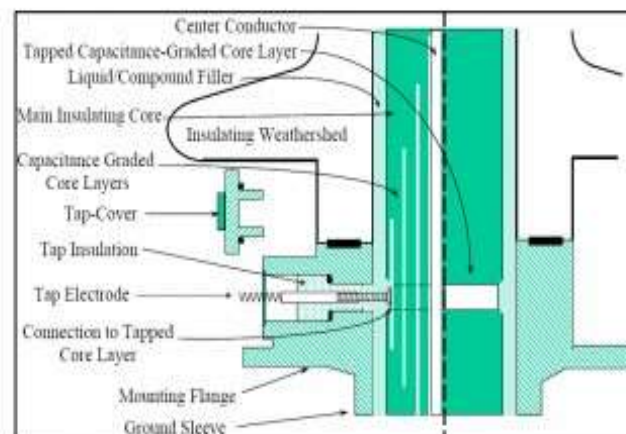
Untuk autotrafo, metode pengujian dilakukan sama dengan metode trafo dua belitan dengan perbedaan dan beberapa pertimbangan yaitu; Sisi HV dan LV pada autotrafo dirangkai menjadi satu belitan yang tidak dapat dipisahkan, sehingga bushing HV, LV dan Netral dijadikan satu sebagai satu titik pengujian (Primer). Sisi Belitan TV dijadikan sebagai satu titik pengujian (Sekunder).



**Gambar 2.9 Skema Rangkaian Pengujian Tan Delta Auto Trafo**

**B. Pengujian Tangen Delta pada Bushing**

Pengujian tangen delta pada bushing bertujuan untuk mengetahui kondisi isolasi pada C1 (isolasi antara konduktor dengan center tap) dan C2 (isolasi antara center tap dengan Ground). Pengujian hot collar dilakukan untuk mengetahui kondisi keramik. Metode hotcollar hanya digunakan untuk pengujian lanjut atau apabila bushing tidak memiliki tap pengujian. Apabila tap pengujian rusak maka bushing segera diusulkan untuk penggantian.

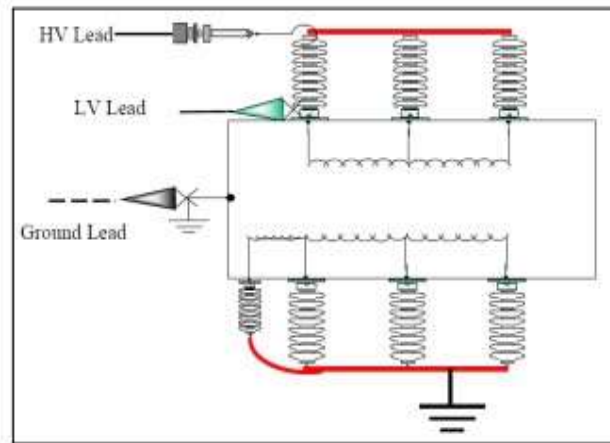


**Gambar 2.10 Struktur Bushing**

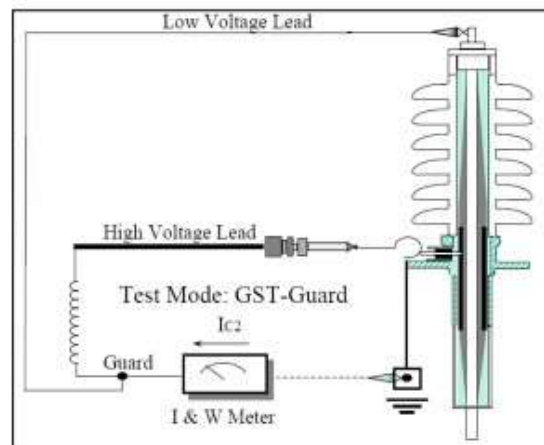
Keterangan:

C1 : Isolasi antara Tap Electrode dengan konduktor

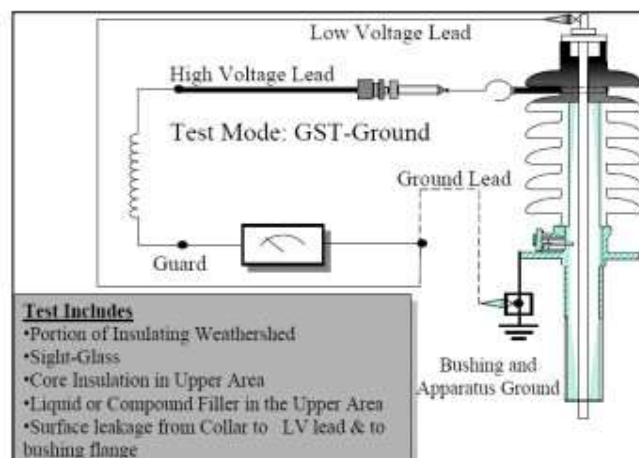
C2 : Isolasi antara Tap Electrode dengan ground



**Gambar 2.11 Diagram Pengujian Tangen Delta C1 pada Bushing**



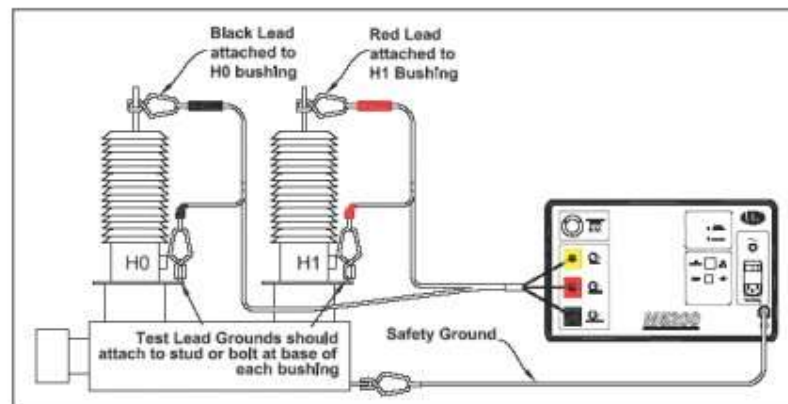
**Gambar 2.12 Diagram Pengujian Tangen Delta C2 pada Bushing**



**Gambar 2.13 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.



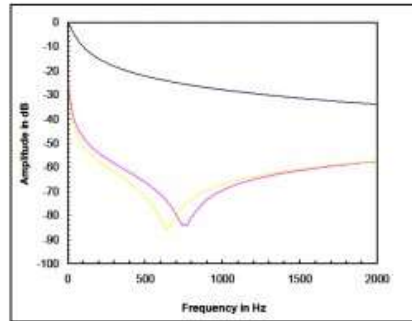
**Gambar 2.14 Wiring Pengujian SFRA**

SFRA dapat 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 2.15 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, putusnya 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 2.16 Alat Uji Ratio Test**

### **2.8.6 Pengukuran Tahanan DC (Rdc)**

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  $\Omega$  (ohm).



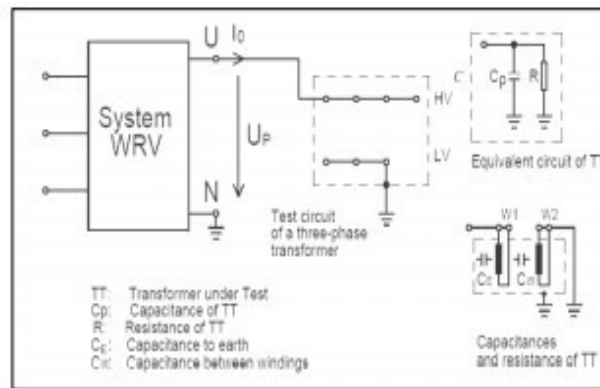
**Gambar 2.17 Alat Uji Micro Ohm Meter**



### 2.8.7 HV Test

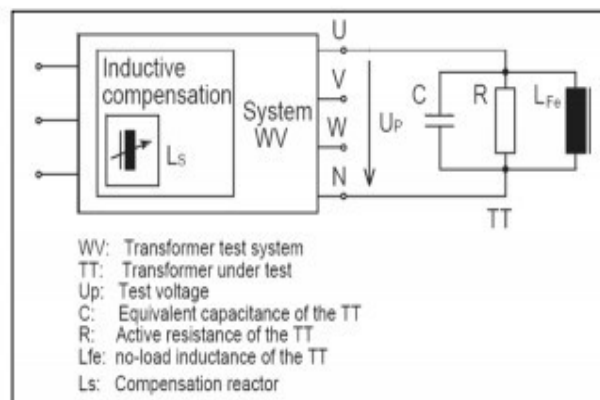
Pengujian HV test dilakukan dengan tujuan untuk meyakinkan bahwa ketahanan isolasi trafo sanggup menahan tegangan. Isolasi yang dimaksud adalah isolasi antara bagian aktif (belitan) terhadap ground, koneksi-koneksi terhadap ground dan antara belitan satu dengan yang lainnya.

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 2.18 Prinsip dan Rangkaian Pengujian Applied Voltage Test**

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



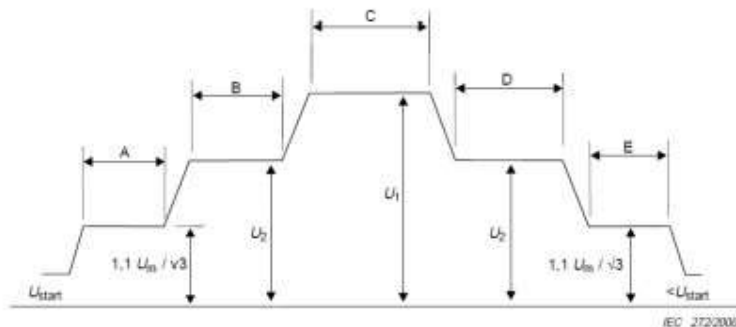
**Gambar 2.19 Rangkaian Pengujian Induce Voltage Test**

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 $U_m$ (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 < $U_m$ < 170			Routine test with PD		Routine test with PD
	170 < $U_m$ < 300	Routine test with PD			Routine test with PD	
	> 300	Routine test with PD			Routine test with PD	
Non Uniform Insulation	72.5 < $U_m$ < 170		Routine test with PD	Routine test with PD		Routine test with PD
	170 < $U_m$ < 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 2.20 Besar dan Durasi Waktu Pelaksanaan Induce Test**

Dimana:

$A = B = E \rightarrow 5$  menit

$C = 120 * fr / fp$  (sec), akan tetapi harus  $\geq 15$  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 $U_m$	Rated short-duration induced or separate source a.c. withstand voltage according to tables 2, 3 or 4	Test voltage $U_1$ phase-to-phase	Partial discharge evaluation level phase-to-earth $U_2 = 1,3 \frac{U_m}{\sqrt{3}}$	Partial discharge evaluation level phase-to-phase $U_2 = 1,3 U_m$
kV r.m.s.	kV r.m.s.	kV r.m.s.	kV r.m.s.	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 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.

### 2.8.9 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.

### 2.8.10 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 2.21 Voltage Slide Regulator**



**Gambar 2.22 Voltmeter**