



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Transformator

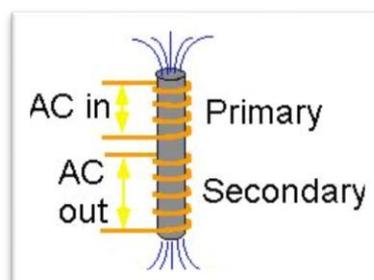
2.1.1 Pengertian Transformator

Transformator ialah peralatan listrik yang digunakan untuk mengubah nilai tegangan arus bolak – balik. Ukuran transformator bervariasi dari ukuran kecil yang biasa digunakan pada rangkaian elektronik sampai dengan transformator berukuran sangat besar yang dapat dijumpai di pusat – pusat pembangkit tenaga listrik. Transformator hanya bekerja pada sumber listrik arus bolak – balik. Jadi, jika disuplai oleh sumber tegangan arus searah, misalnya baterai, transformator tidak akan dapat bekerja.

Sebuah transformator pada dasarnya terdiri atas dua buah lilitan, masing – masing disebut sebagai lilitan primer dan sekunder, yang terisolasi satu sama lainnya yang dililitkan pada inti yang sama yang umumnya terbuat dari baja atau besi.¹

2.1.2 Prinsip Kerja Transformator

Transformator menggunakan prinsip hukum induksi faraday dan hukum lorentz dalam menyalurkan daya, dimana arus bolak balik yang mengalir mengelilingi suatu inti besi maka inti besi itu akan berubah menjadi magnet. Dan apabila magnet tersebut dikelilingi oleh suatu belitan maka pada kedua ujung belitan tersebut akan terjadi beda potensial.

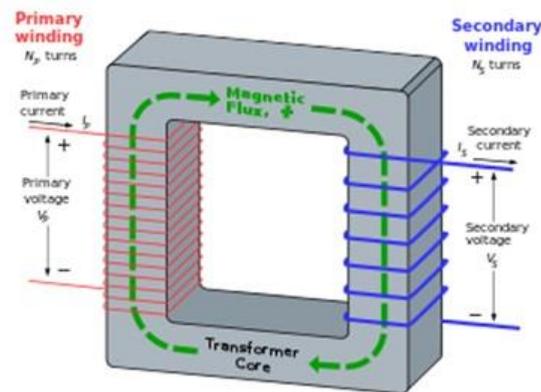


Gambar 2.1. Arus bolak balik mengelilingi inti besi ²

¹ Instalasi Listrik Tingkat Lanjut Edisi Ketiga, Trevor Linsley, Penerbit Erlangga, Hal : 161



Arus yang mengalir pada belitan primer akan menginduksi inti besi transformator sehingga didalam inti besi akan mengalir flux magnet dan flux magnet ini akan menginduksi belitan sekunder sehingga pada ujung belitan sekunder akan terdapat beda potensial. ²

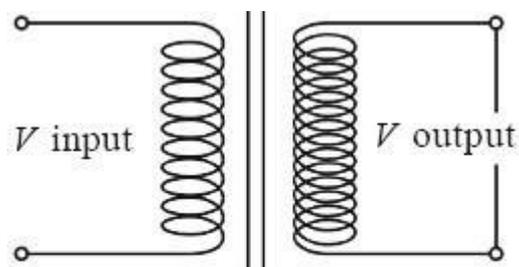


Gambar 2.2 Prinsip kerja transformator ²

2.1.3 Jenis- Jenis Transformator

1. Transformator *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.



Skema sebuah trafo step up

$$N_s > N_p$$

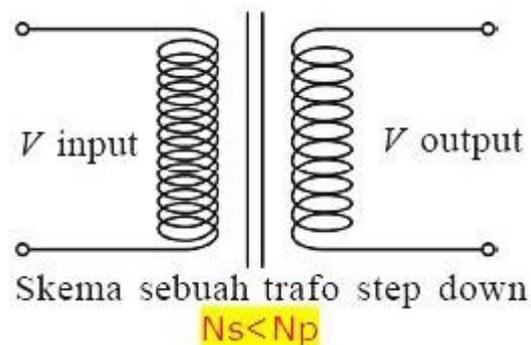
Gambar 2.3 Transformator step-up ³

² PT. PLN (Persero), Pemeliharaan Trafo Tenaga, Pusat Pendidikan dan Pelatihan, Hal : 54 - 55



2. Transformator *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.



Gambar 2.4 Transformator step- down³

3. Autotransformator

Transformator jenis ini hanya terdiri dari satu lilitan yang berlanjut secara listrik, dengan sadapan tengah. Dalam transformator ini, sebagian lilitan primer juga merupakan lilitan sekunder. Fasa arus dalam lilitan sekunder selalu berlawanan dengan arus primer, sehingga untuk tarif daya yang sama lilitan sekunder bias 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).

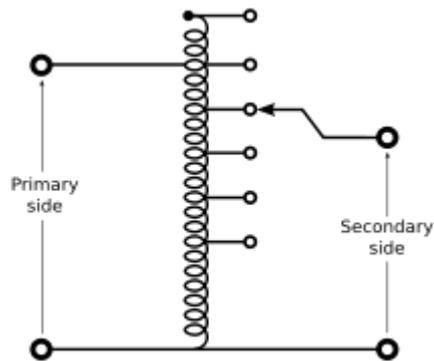


Gambar 2.5 Autotransformator³



4. Autotransformator Variabel

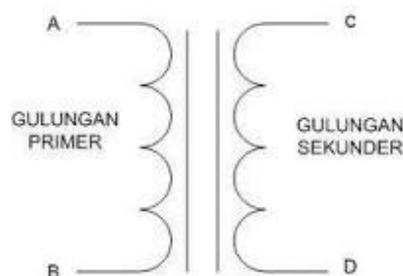
Autotransformator variabel adalah autotransformator biasa yang sadapan tengahnya bias diubah- ubah, .memberikan perbandingan lilitan primer- sekunder yang berubah- ubah.



Gambar 2.6 Autotransformator variabel ³

5. 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.



Gambar 2.7 Transformator isolasi ³

6. 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.

7. 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).³

a. Berdasarkan fungsinya, transformator tenaga dapat dibedakan menjadi :

- 1). Trafo pembangkit
- 2). Trafo gardu induk/ penyaluran
- 3). Trafo distribusi

b. Transformator tenaga untuk fungsi penyaluran dapat dibedakan menjadi

- 1). Trafo besar
- 2). Trafo sedang
- 3). Trafo kecil²

c. Pada pusat pembangkit listrik, macam – macam transformator antara lain:

- 1). Transformator penaik tegangan generator
- 2). Transformator unit pembangkit
- 3). Transformator pemakaian sendiri
- 4) Transformator antar rel⁴

2.1.4 Bagian- Bagian Transformator

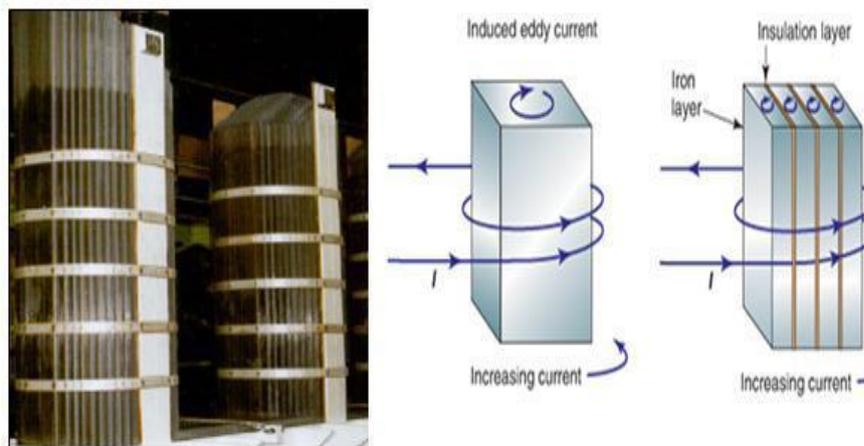
1). Inti Besi (*Electromagnetic Circuit*)

³ General Assesment Transformator, Bayu, Politeknik Negeri Sriwijaya, Hal : 44 - 47

⁴ Pembangkitan Energi Listrik, Marsudi, Penerbit Erlangga, Hal : 32



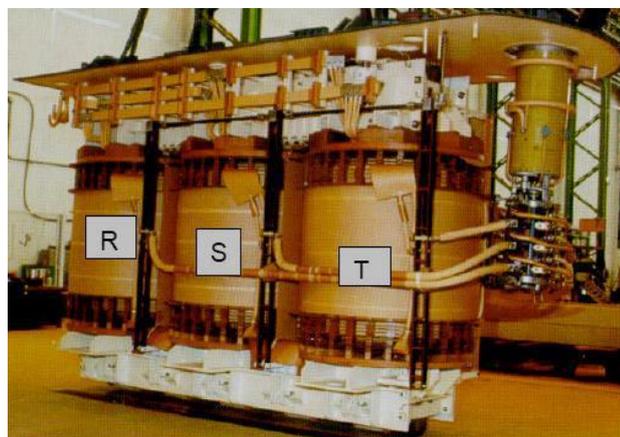
Inti besi digunakan sebagai media mengalirnya flux yang timbul akibat induksi arus bolak balik pada kumparan yang mengelilingi inti besi sehingga dapat menginduksi kembali ke kumparan yang lain. Dibentuk dari lempengan – lempengan besi tipis berisolasi dengan maksud untuk mengurangi *eddy current* yang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



Gambar 2.8 Inti Besi ⁵

2). Belitan (*Winding*)

Belitan terdiri dari batang tembaga berisolasi yang mengelilingi inti besi, dimana saat arus bolak balik mengalir pada belitan tembaga tersebut, inti besi akan terinduksi dan menimbulkan flux magnetik.



Gambar 2.9 Belitan Trafo ⁵



3). *Bushing*

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



Gambar 2.10 Bushing ⁵

Secara garis besar *bushing* dapat dibagi menjadi empat bagian utama yaitu:

1. Isolasi

Berdasarkan media isolasi *bushing* terbagi menjadi dua (IEC 60137 tahun 2008) yaitu:

- a. *Bushing* kondenser

Bushing kondenser umumnya dipakai pada tegangan *rating bushing* 72,5 kV ke atas. *Bushing* kondenser terdapat tiga jenis media isolasi (IEC 60137 tahun 2008) yaitu:

- *Resin Bonded Paper (RBP)*

Bushing tipe RBP adalah teknologi *bushing* kondenser yang pertama dan sudah mulai ditinggalkan.

- *Oil Impregnated Paper (OIP)*

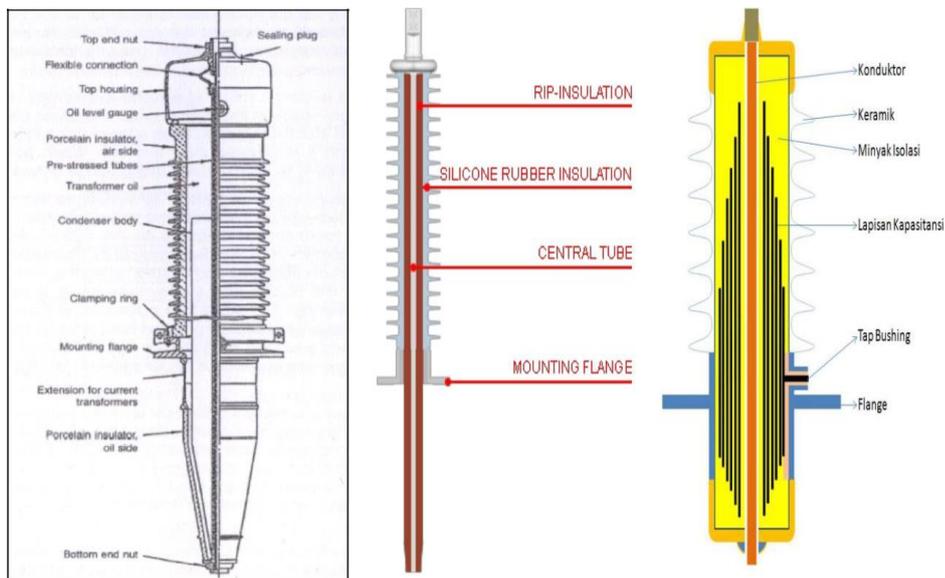
Pada tipe OIP isolasi yang digunakan adalah kertas dan minyak yang merendam kertas isolasi.

- *Resin Impregnated Paper (RIP)*

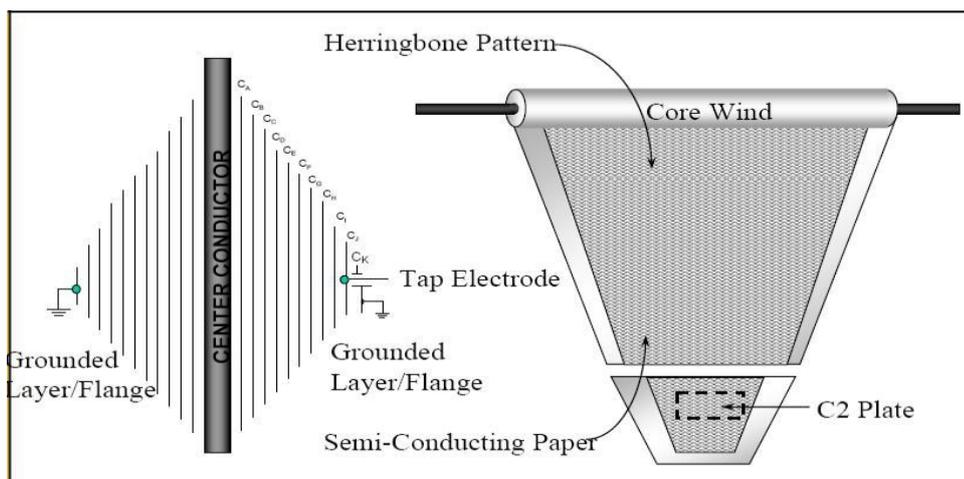


Pada tipe RIP isolasi yang digunakan adalah kertas isolasi dan resin.

Di dalam *bushing* kondenser terdapat banyak lapisan kapasitansi yang disusun secara seri sebagai pembagi tegangan. Pada *bushing* terdapat dua kapasitansi utama yang biasa disebut C1 dan C2. C1 adalah kapasitansi antara konduktor dengan tap *bushing*, dan C2 adalah kapasitansi dari tap *bushing* ke *ground* (*flange bushing*). Dalam kondisi operasi tap *bushing* dihubungkan ke *ground*, sehingga C2 tidak ada nilainya ketika *bushing* operasi.



Gambar 2.11 Bagian – Bagian *Bushing* ⁵



Gambar 2.12 Kertas Isolasi Pada *Bushing* (*Oil Impregnated Paper Bushing*) ⁵



Gambar 2.13 Konduktor Bushing Dilapisi Kertas Isolasi ⁵

b. *Bushing* non-kondenser.

Bushing non kondenser umumnya digunakan pada tegangan rating 72,5 kV ke bawah. Media isolasi utama *bushing* non-kondenser adalah isolasi padat seperti *porcelain* atau keramik.

2. Konduktor

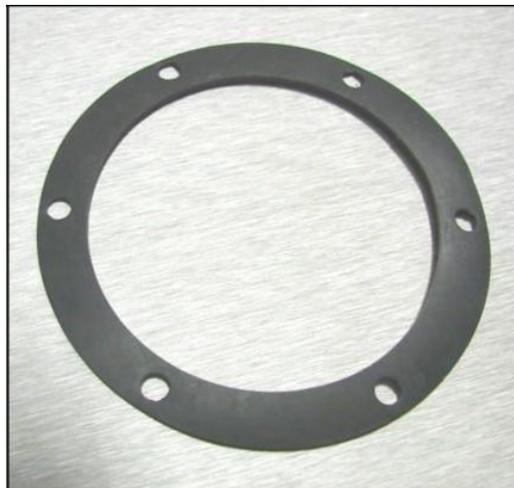
Terdapat jenis – jenis konduktor pada *bushing* yaitu *hollow conductor* dimana terdapat besi pengikat atau penegang di tengah lubang konduktor utama, konduktor pejal dan *flexible lead*.

3. Klem Koneksi

Klem koneksi merupakan sarana pengikat antara stud *bushing* dengan konduktor penghantar di luar *bushing*.

4. Asesoris

Asesoris *bushing* terdiri dari indikasi minyak, *seal* atau gasket dan tap pengujian. *Seal* atau gasket pada *bushing* terletak di bagian bawah *mounting flange*.

Gambar 2.14 Indikator Level Minyak *Bushing* ⁵Gambar 2.15 Gasket/ *Seal* Antara *Flange Bushing* Dengan *Body Trafo* ⁵Gambar 2.16 Tap Pengujian ⁵



4). Pendingin

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

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

Tabel 2.1 Macam – Macam Pendingin Pada Trafo ⁵

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

5). Konservator

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

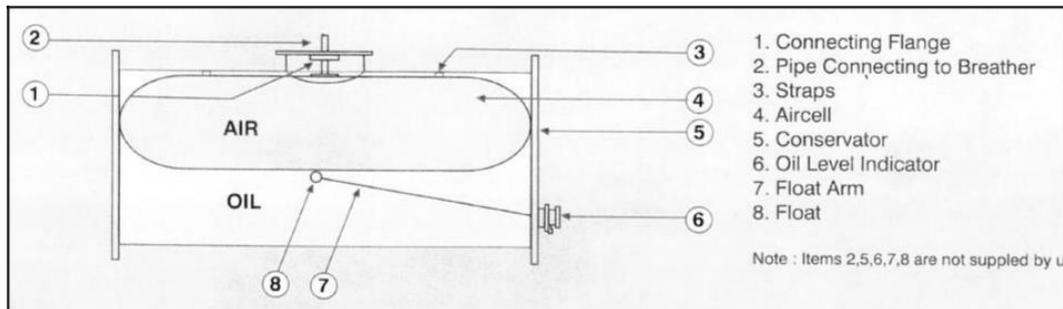
Gambar 2.17 *Konservator*⁵

Seiring dengan naik turunnya volume minyak di *konservator* akibat pemuaian dan penyusutan minyak, volume udara di dalam *konservator* pun akan bertambah dan berkurang. Penambahan atau pembuangan udara di dalam *konservator* akan berhubungan dengan udara luar. Agar minyak isolasi trafo tidak terkontaminasi oleh kelembaban dan oksigen dari luar (untuk tipe *konservator* tanpa *rubber bag*), maka udara yang akan masuk ke dalam *konservator* akan disaring melalui *silicagel* sehingga kandungan uap air dapat diminimalkan.

Gambar 2.18 *Silicagel*⁵



Untuk menghindari agar minyak trafo tidak berhubungan langsung dengan udara luar, maka saat ini *konservator* dirancang dengan menggunakan *breather bag/ rubber bag*, yaitu sejenis balon karet yang dipasang di dalam tangki *konservator*.



Gambar 2.19 Konstruksi *Konservator* Dengan *Rubber Bag* ⁵

Silicagel sendiri memiliki batasan kemampuan untuk menyerap kandungan uap air sehingga pada periode tertentu *silicagel* tersebut harus dipanaskan bahkan perlu dilakukan penggantian. *Dehydrating Breather* merupakan teknologi yang berfungsi untuk mempermudah pemeliharaan *silicagel*, dimana terdapat pemanasan otomatis ketika *silicagel* mencapai kejenuhan tertentu.



Gambar 2.20 *Dehydrating Breater* ⁵



6). Dielektrik (Minyak Isolasi Trafo& Isolasi Kertas)

Minyak Isolasi Trafo

Minyak isolasi pada trafo berfungsi sebagai media isolasi, pendingin dan pelindung belitan dari oksidasi. Minyak isolasi trafo merupakan minyak mineral yang secara umum terbagi menjadi tiga jenis, yaitu *parafinik*, *naphthanik* dan *aromatik*. Antara ketiga jenis minyak dasar tersebut tidak boleh dilakukan pencampuran karena memiliki sifat fisik maupun kimia yang berbeda.



Gambar 2.21 Minyak Isolasi Trafo ⁵

Kertas Isolasi Trafo

Kertas isolasi berfungsi sebagai isolasi, pemberi jarak, dan memiliki kemampuan mekanis.



Gambar 2.22 Tembaga Yang Dilapisi Kertas Isolasi ⁵



7). Tap *Changer*

Kestabilan tegangan dalam suatu jaringan merupakan salah satu hal yang dinilai sebagai kualitas tegangan. Trafo dituntut memiliki nilai tegangan output yang stabil sedangkan besarnya tegangan input tidak selalu sama. Dengan mengubah banyaknya belitan sehingga dapat merubah *ratio* antara belitan primer dan sekunder dan dengan demikian tegangan *output/* sekunder pun dapat disesuaikan dengan kebutuhan sistem berapapun tegangan *input/* primernya. Penyesuaian ratio belitan ini disebut Tap *changer*.

Proses perubahan ratio belitan ini dapat dilakukan pada saat trafo sedang berbeban (*On load tap changer*) atau saat trafo tidak berbeban (*Off Circuit tap changer/ De Energize Tap Charger*).

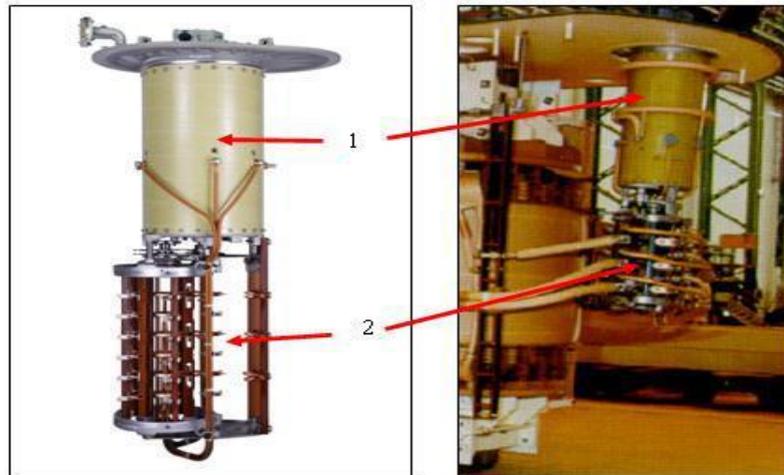
Tap *changer* terdiri dari:

- *Selector Switch*
- *Diverter Switch*
- Tahanan transisi

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

Diverter switch merupakan rangkaian mekanis yang dirancang untuk melakukan kontak atau melepaskan kontak dengan kecepatan yang tinggi.

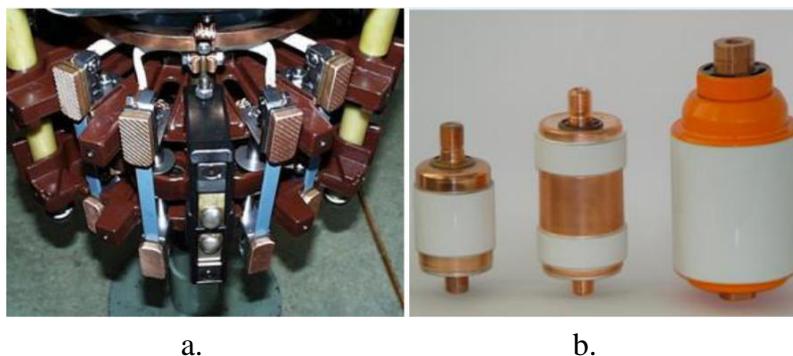
Tahanan transisi merupakan tahanan sementara yang akan dilewati arus primer pada saat perubahan tap.

Gambar 2.23 OLTC Pada Transformator ⁵

Keterangan:

1. Kompartemen *Diverter Switch*
2. *Selektor Switch*

Media pendingin atau pemadam proses *switching* pada *diverter switch* yang dikenal sampai saat ini terdiri dari dua jenis, yaitu media minyak dan media *vaccum*. Jenis pemadaman dengan media minyak akan menghasilkan energi arc yang membuat minyak terurai menjadi gas C_2H_2 dan karbon sehingga perlu dilakukan penggantian minyak pada periode tertentu. Sedangkan dengan metoda pemadam *vaccum* proses pemadaman *arc* pada waktu *switching* akan dilokalisasi dan tidak merusak minyak.



a.

b.

Gambar 2.24 Kontak *Switching* Pada *Diverter Switch* ⁵



(a. media pemadam *arcing* menggunakan minyak, b. media pemadam *arcing* menggunakan kondisi *vaccum*)

8). NGR (*Neutral Grounding Resistor*)

Salah satu metode pentanahan adalah dengan menggunakan NGR. NGR adalah sebuah tahanan yang dipasang serial dengan netral sekunder pada trafo sebelum terhubung ke *ground*/tanah. Tujuan dipasangnya NGR adalah untuk mengontrol besarnya arus gangguan yang mengalir dari sisi netral ke tanah.

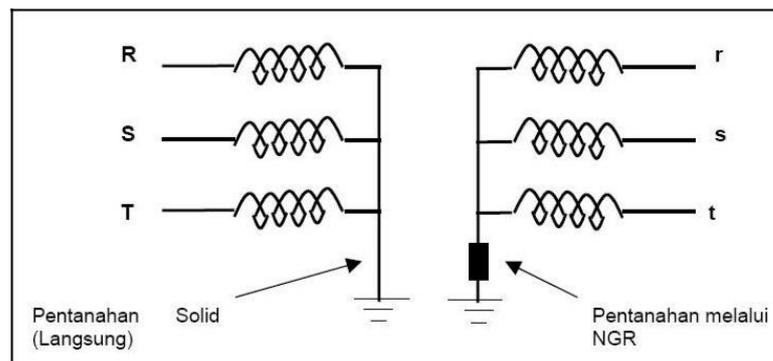
Ada dua jenis NGR, yakni *Liquid* dan *Solid*.

1. *Liquid*

Berarti resistornya menggunakan larutan air murni yang ditampung di dalam bejana dan ditambahkan garam (NaCl) untuk mendapatkan nilai resistansi yang diinginkan.

2. *Solid*

Sedangkan NGR jenis padat terbuat dari *Stainless Steel*, FeCrAl, *Cast Iron*, *Copper Nickel* atau *Nichrome* yang diatur sesuai nilai tahanannya.



Gambar 2.25 Pentanahan Langsung dan Pentanahan Melalui NGR ⁵



Gambar 2.26 *Neutral Grounding Resistor (NGR)* ⁵

9). Proteksi Trafo

Rele Bucholz

Pada saat trafo mengalami gangguan internal yang berdampak kepada suhu yang sangat tinggi dan pergerakan mekanis di dalam trafo, maka akan timbul tekanan aliran minyak yang besar dan pembentukan gelembung gas yang mudah terbakar. Tekanan atau gelembung gas tersebut akan naik ke konservator melalui pipa penghubung dan *rele bucholz*.

Tekanan minyak maupun gelembung gas ini akan dideteksi oleh *rele bucholz* sebagai indikasi telah terjadinya gangguan internal.



Gambar 2.27 *Rele Bucholz* ⁵

Rele Jansen

Sama halnya seperti *rele Bucholz* yang memanfaatkan tekanan minyak dan gas yang terbentuk sebagai indikasi adanya ketidaknormalan/ gangguan, hanya saja



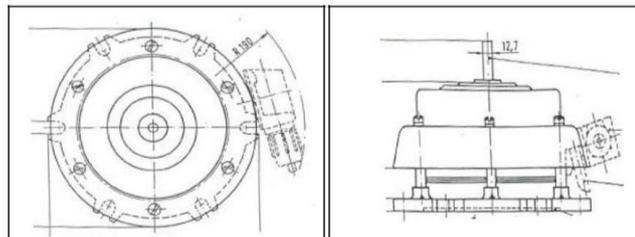
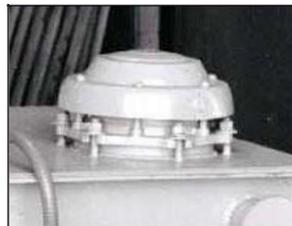
rele ini digunakan untuk memproteksi kompartemen OLTC. Rele ini juga dipasang pada pipa saluran yang menghubungkan kompartemen OLTC dengan konservator.



Gambar 2.28 *Rele Jansen* ⁵

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 *main tank*.



Gambar 2.29 *Rele Sudden Pressure* ⁵

Rele Thermal

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



Untuk mengetahui suhu operasi dan indikasi ketidaknormalan suhu operasi pada trafo digunakan *rele thermal*. *Rele thermal* ini terdiri dari sensor suhu berupa *thermocouple*, pipa kapiler dan meter penunjukan.



Gambar 2.30 Bagian – Bagian dari *Rele Thermal*⁵

2.2 Pengukuran Tahanan Isolasi (IR) dan Indeks Polarisasi (IP)

2.2.1 Pengukuran Tahanan Isolasi

Pengukuran ini bertujuan untuk mengetahui kondisi isolasi antara belitan dengan *ground* atau antara dua belitan. Metoda yang umum dilakukan adalah dengan memberikan tegangan dc dan merepresentasikan kondisi isolasi dengan satuan megohm. Tahanan isolasi yang diukur merupakan fungsi dari arus bocor yang menembus melewati isolasi atau melalui jalur bocor pada permukaan eksternal.

Pengukuran tahanan isolasi adalah suatu proses pengukuran dengan suatu alat ukur *Megaohm meter (Megger)/insulation tester*.



Megaohm meter biasanya memiliki kapasitas pengujian 500, 1000, 2500 atau 5000 V dc.⁵



Gambar 2.31 Alat Ukur Megaohm Meter ²

Faktor – faktor yang mempengaruhi pengukuran tahanan isolasi antara lain adalah : (a) arus arbsorpsi, (b) suhu dan (c) tegangan yang diterapkan. Selanjutnya untuk menilai kondisi sesuatu bahan isolasi dipakai suatu indeks polarisasi.⁶

2.2.2 Indeks Polarisasi (IP)

Indeks Polarisasi, digunakan untuk mengetahui tingkat kekeringan, kebersihan dan keamanan isolasi suatu belitan pada mesin listrik. Pengukuran ini dilakukan selama 10 menit, dengan membandingkan hasil pengukuran tahanan isolasi menit ke-10 terhadap hasil pengukuran menit ke-1. Dengan rumus sebagai berikut :

$$IP = \frac{R_{10 \text{ menit}}}{R_{1 \text{ menit}}} \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana :

IP = Indeks Polarisasi

⁵ PT. PLN (Persero), Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga, SK Direksi No. 0520-2.K/DIR/2014, Hal : 2 – 17

⁶ Analisa Pengukuran Tahanan Isolasi Transformator 30 MVA Menggunakan Indeks Polarisasi (IP) di Gardu Induk Bungaran PT. PLN (Persero) WS2JB, Reka, Politeknik Negeri Sriwijaya, Hal : 29



R10 menit = Nilai resistansi yang diukur pada saat $t = 10$ menit

R1 menit = Nilai resistansi yang diukur pada saat $t = 1$ menit

Tujuan dari pengujian indeks polarisasi adalah untuk memastikan peralatan tersebut layak dioperasikan atau bahkan untuk dilakukan *overvoltage test*. Indeks polarisasi merupakan *rasio* tahanan isolasi saat menit ke 10 dengan menit ke 1 dengan tegangan yang konstant. ²

Menurut Hukum Ohm yakni resistansi isolasi yang diukur dengan tegangan V_2 lebih kecil daripada R_{V1} yakni resistansi isolasi yang diukur dengan dengan tegangan V_1 . Artinya, resistansi isolasi berkurang ketika diukur dengan tegangan V_2 idealnya, nilai resistansi isolasi harus tetap sebesar R_{V1} . Jika R_{V2} semakin kecil, faktor titik lemah semakin besar. Dengan kata lain, jika faktor titik lemah suatu bahan isolasi semakin besar, kualitas bahan isolasi tersebut semakin buruk.

Akibat adanya arus penyerapan, hasil pengukuran resistansi isolasi tergantung juga pada waktu pengukuran. Pada saat $t = 1$ menit, dimisalkan arus penyerapan kedua bahan sama sehingga resistansi kedua bahan isolasi pada saat itu adalah sama. Pada saat $t = 10$ menit, arus penyerapan bahan isolasi A lebih besar daripada arus penyerapan bahan isolasi B sehingga pada saat itu, resistansi bahan isolasi A lebih kecil daripada resistansi bahan isolasi B. Dengan kata lain. Pertambahan nilai resistansi bahan isolasi A lebih kecil daripada pertambahan nilai resistansi bahan isolasi B. Pertambahan nilai resistansi bahan isolasi seharusnya semakin besar agar arus penyerapan sama dengan nol. Dengan kata lain, bahan isolasi semakin baik jika pertambahan nilai resistansinya semakin besar. Untuk membedakan pertambahan nilai resistansi pada berbagai jenis bahan isolasi di buat suatu definisi yang disebut indeks polarisasi yaitu perbandingan nilai resistansi suatu bahan yang diukur pada saat $t = 1$ menit dengan nilai resistansi yang diukur pada saat $t = 1$ menit dengan nilai resistansi yang diukur pada saat $t = 10$ menit.

Bahan isolasi yang baik adalah bahan yang arus penyerapannya kecil atau yang mempunyai R10 menit besar, dengan kata lain, yang indeks polarisasinya besar. Jika indeks polarisasi suatu bahan isolasi menurun, hal itu menandakan



bahwa kualitas bahan isolasi tersebut semakin buruk. Pada umumnya, indeks polarisasi bahan isolasi kelas A lebih besar daripada 1,5 sedang bahan isolasi kelas B lebih besar dari pada 2,5.⁷

Arus total yang muncul saat memberikan tegangan dc stabil terdiri dari:

1. Arus pengisian karena sifat kapasitansi dari isolasi yang diukur. Arus ini turun dari nilai maksimum ke nol sangat cepat.
2. Arus penyerapan karena molecular charge shifting pada isolasi. Arus transien ini menghilang sampai nol lebih lambat.
3. Arus bocor merupakan arus konduksi nyata pada isolasi. Arus bocor bervariasi tergantung tegangan uji atau dengan persamaan:

$$I_{is} = \frac{V_{rms}}{I_{Raverage}} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana :

I_{is} = Nilai arus bocor pada transformator

V_{rms} = Tegangan Kerja dalam KV (Line-to-Line)

$I_{Raverage}$ = Nilai Rata – rata tahanan isolasi 1 – 10 menit masing – masing belitan transformator

IR = Tahanan Isolasi (*Insulation Resistance*)

Arus bocor meningkat lebih cepat dengan kehadiran kelembaban dibanding arus penyerapan, pembacaan *megaohm* tidak akan meningkat seiring waktu layaknya antara kecepatan pada isolasi buruk dengan cepatnya isolasi yang bagus. Hal ini berdampak pada rendahnya indeks polarisasi. Keuntungan dari indeks *ratio* adalah dengan banyaknya hal yang dapat mempengaruhi pembacaan *megaohm* seperti suhu dan kelembaban baik pada 1 menit maupun 10 menit. Indeks polarisasi merupakan perbandingan antara nilai tahanan isolasi pada menit

⁷ Dasar – dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi Edisi Kedua, Bonggas L, Erlangga, Hal :



ke 10 dengan menit ke 1.

Untuk isolasi belitan yang baik, nilai IP harus minimum 2 pada pengukuran di temperatur 20° C.

- Nilai IP dibawah diantara 1.5 - 2 , peralatan masih dapat dioperasikan, tapi perlu pengawasan dan pemantauan berkala.
- Nilai IP dibawah 1.5, mengindikasikan isolasi belitan peralatan tersebut dalam keadaan basah, kotor atau sudah ada yang bocor. Sehingga perlu dilakukan pembersihan, pengeringan dan pembaruan apabila ditemukan kerusakan pada isolasinya.

Pengukuran tahanan isolasi (*Insulation Resistance*) berdasarkan standar IEEE C57.125-1991 mengenai Indeks Polarisasi dan resistansi isolasi berdasarkan table berikut ini :

Tabel 2.2 Tegangan Test Untuk Tiap-Tiap Tegangan Kerja ⁶

TEGANGAN KERJA MESIN YANG DIUKUR	TEGANGAN TEST
Mesin dengan tegangan kerja : 240 - 2400 Volt	500 Volt DC
Mesin dengan Tegangan kerja : 3000 - 4800 Volt	2500 Volt DC
Mesin dengan Tegangan kerja : 5200 - 13800 Volt	2500 atau 5000 Volt DC
Semua mesin DC	500 Volt DC
Semua winding rotor dengan rated tegangan > 100 Volt	500 , max. 1000 Volt DC

Serta nilai tahanan isolasi antara penghantar satu dan penghantar yang lain maupun antara penghantar dan *ground*, nilai resistansi minimumnya adalah sebesar tegangan operasi dalam KV ditambah 1 kemudian dikalikan 100 MΩ yang dapat di rumuskan sebagai berikut:

$$R_{min} = (V_{rms} + 1) \times 100 \text{ M}\Omega \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana :

R_{min} = Resistansi minimum lilitan (MΩ)



V_{rms} = Tegangan Kerja dalam KV (Line-to-Line)

Indeks yang biasa digunakan dalam menunjukkan pembacaan megger dikenal sebagai penyerapan dielektrik, yang diperoleh dengan pembacaan yang berkelanjutan untuk periode waktu yang lebih lama. Jika pengujian berkelanjutan untuk periode selama 10 menit, megger akan mempunyai kemampuan untuk mempolarisasikan atau mencharger kapasitansi tinggi ke isolasi stator, dan pembacaan resistansi akan meningkat jika isolasi bersih dan kering. *Rasio* pembacaan 10 menit dibandingkan pembacaan 1 menit dikenal sebagai Indeks Polarisasi (IP).atau *Polarization Index* (PI).

Jika nilai Indeks Polarisasi (IP) terlalu rendah ini mengindikasikan bahwa lilitan mungkin terkontaminasi oli, kotoran,serangga, atau terbasahi oleh air (lembab). Maka sebagai nilai parameter Indeks Polarisasi (IP) menurut standar IEEE C57.125-1991 tentang Indeks Polarisasi dan Resistansi Isolasi yaitu adalah jika nilai IP kurang dari 2.0 maka kemungkinan adanya kontaminasi pada isolasi stator, misalnya isolasi winding terlalu banyak menyerap uap air (lembab) atau terdapat penumpukan kotoran konduktif, sehingga perlu dilakukan pemeliharaan yaitu membersihkan *winding* stator dari kontaminasi kotoran atau dengan cara mengeringkan *winding* stator.

Tabel 2.3 Nilai Minimum IP Berdasarkan Kelas Isolasi ⁶

Thermal Class Rating	Minimum PI Value
Class A	1.5
Class B	2.0
Class F	2.0
Class H	2.0

Tabel 2.4 Kondisi Isolasi Berdasarkan Indeks Polarisasi ⁶

No	Hasil Uji	Keterangan	Rekomendasi
1	< 1,0	Berbahaya	Investigasi
2	1,0 – 1,1	Jelek	Investigasi
3	1,1 – 1,25	Dipertanyakan	Uji kadar air minyak, uji tan delta
4	1,25 – 2,0	Baik	-
5	> 2,0	Sangat Baik	-

2.3 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 discharges*), Kegagalan thermal (*thermal faults*), *Deteriorasi* / pemburukan kertas



isolasi/laminasi. Pemeriksaan dan analisa minyak isolasi secara menyeluruh, meliputi: *power factor* (cf. $\tan \delta$), kandungan air (*water content*), *neutralisation number*, *interfacial tension*, *furfural 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* dll.
- Pemeriksaan dengan menggunakan sinar infra-merah (*infrared monitoring*), setiap 2 tahun.

3. Karakteristik Akibat Kegagalan Gas

<u>Jenis Kegagalan</u>	<u>Unsur Gas yang timbul</u>
<i>Partial Discharge:</i>	<i>Hydrogen (H₂)</i>
Busur api/ <i>Arching:</i>	<i>Asethylene (C₂H₂)</i>
Kegagalan <i>Thermal:</i>	<i>Carbon Hydrides (CH₄ C₂H₄ C₂H₆)</i>
Kegagalan Kertas:	<i>Carbon Monoxide dan Dioxide (CO₁ CO₂)</i>

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 setidaknya setiap 6 - 9 tahun.

Pengujian yang dilakukan meliputi :

- *Double-measurements*
- *PD-measurement*
- *Frequency Responce Analysis, FRA*
- *Voltage Test*

Penyebab Hubung Singkat didalam Transformator, antara lain:

- Gangguan hubung singkat antar lilitan karena rusaknya laminasi.
- Perubahan kandungan gas H₂, CH₄, CO, C₂H₄ dan C₂H₂.⁶

2.4 Pemeliharaan Transformator

Tujuan pemeliharaan peralatan listrik pada umumnya bertujuan untuk memungkinkan penyediaan tenaga listrik kepada para langganan dengan mutu yang baik serta keandalan (*reliability*) yang tinggi dan untuk mempertahankan keadaan peralatan selama mungkin guna kepentingan perusahaan itu sendiri.⁸

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*
- 2) *Mechanical Stresses*
- 3) *Environmental Stresses*

▪ *Thermal Stresses*

Overheating yang terjadi pada *winding* dan berlangsung lama,

⁸ Teknik Tenaga Listrik Jilid II, Artono, Susumu, Pradnya Paramita, Hal : 113



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.

- ***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*.

- ***Environmental Stresses***

Kontaminasi : udara lembab, debu, karbon, minyak atau bahan kimia lain, yang terkumpul di permukaan isolasi, adalah merupakan partikel konduktif 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.

2.4.1 Pemeliharaan rutin

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

- Pemeriksaan temperatur belitan stator, *bearing*, air pendingin dan lainnya



dilakukan setiap hari.

- Pemeriksaan kebocoran pendingin minyak (khusus generator dengan pendingin *hydrogen*) dalam sekali sebulan.
- Pemeriksaan vibrasi sekali dalam sebulan.
- Pemeriksaan tekanan *hydrogen*, *seal oil pump*.
- 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 paralel.

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 pakain lengan pendek.
- Semua piranti kerja harus terisolasi dan tidak dapat jatuh 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 terdhadap komutator *Slip ring*.
- Cek tekanan sikat arang, tidak boleh terlalu lemah atau terlalu keras.

Bila tekanan kurang baik akan mengakibatkan:

- Kontak kurang baik
- Bergetar
- Timbul bunga api
- Sikat arang cepat aus



2.4.2 Pemeliharaan periodik

Pemeriksaan yang bersipat periodik adalah pemeriksaan yang dilakukan berdasarkan lama beroperasi generator, yang diklasifikasikan :

- Pemeriksaan sederhana yang dilakukan setiap 8.000 jam
- Pemeriksaan sedang, setiap 16.000 jam
- 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. ⁶

2.5 PENGUJIAN TRAFODAYA

IEC telah mengeluarkan standar pengujian suatu trafo. Dalam standar ini dapat ditemukan tentang kondisi pengujian, hal – hal yang perlu diuji dan prosedur pelaksanaan. Secara umum, pengujian rutin trafo meliputi hal – hal sebagai berikut:

- a. Pengukuran resistansi belitan.
- b. Pengukuran *rasio*, polaritas, dan hubungan fasa.
- c. Impedansi hubung singkat.
- d. Rugi – rugi berbeban.
- e. Rugi beban nol dan arus beban nol.
- f. Resistansi isolasi.
- g. Pengujian ketahanan tegangan lebih dengan induksi.
- f. Pengujian ketahanan tegangan lebih dengan sumber terpisah.⁹

⁹ Peralatan Tegangan Tinggi Edisi Kedua, Bonggas L ,Erlangga, Hal : 209