



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Transformator¹

Transformator atau trafo adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi- elektromagnet. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaan transformator dalam sistem tenaga listrik memungkinkan terpilihnya tenaga yang sesuai, dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan misalnya kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pendistribusian listrik jarak jauh. Untuk lebih sederhananya transformator terbagi menjadi tiga bagian, yaitu lilitan primer, lilitan sekunder dan inti besi. Lilitan primer adalah bagian transformator yang terhubung dengan rangkaian sumber energi (catu daya). Lilitan sekunder adalah bagian transformator yang terhubung dengan rangkaian bebannya. Inti besi adalah bagian transformator yang bertujuan untuk mengarahkan keseluruhan flux magnet yang dari lilitan primer agar masuk ke lilitan sekunder. Berikut ini adalah Gambar dari susunan sebuah transformator.

Transformator adalah suatu peralatan mesin listrik statis yang bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik untuk menyalurkan tenaga/daya listrik dari suatu rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain tanpa merubah frekuensi. Pada umumnya transformator terdiri dari 2 belitan yaitu belitan primer dan belitan sekunder, dan ada juga transformator yang secara khusus memiliki belitan tersier sehingga menjadi 3 belitan. 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. Menurut Tondok (2019),

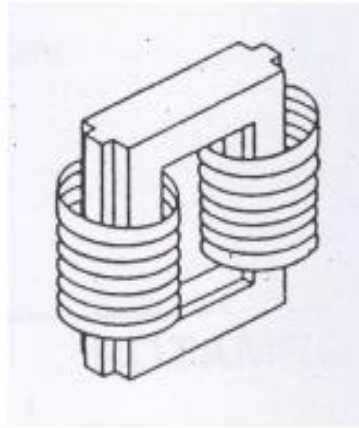
¹Tondok dkk.(2019).Perencanaan Transformator Distribusi 125 kVA. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*



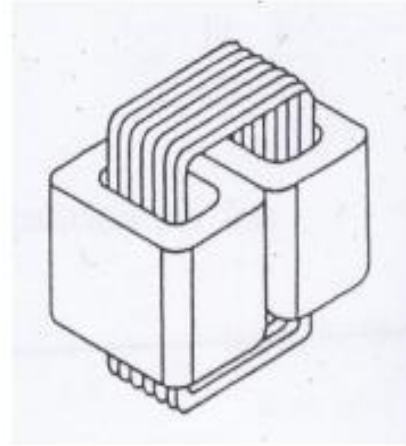
Dalam teknik tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi:

- a. Transformator daya, Transformator daya memiliki peranan sangat penting dalam sistem tenaga listrik. Transformator daya digunakan untuk menyalurkan daya dari generator bertegangan menengah ke transmisi jaringan distribusi. Kebutuhan transformator daya bertegangan tinggi dan berkapasitas besar, menimbulkan persoalan dalam perencanaan isolasi, ukuran bobotnya. dengan frekuensi kerja 50 Hz.
- b. Transformator distribusi, Transformator distribusi digunakan untuk mengubah tegangan menengah menjadi tegangan rendah. Sebagaimana halnya dengan komponen-komponen lain dari rangkaian distribusi, rugi-rugi energi dan turun tegangan yang disebabkan arus listrik mengalir menuju beban merupakan penentuan untuk pemilihan dan lokasi transformator.
- c. Transformator pengukuran, Dalam prakteknya tidaklah aman menghubungkan instrumen, alat ukur atau peralatan kendali langsung ke rangkaian tegangan tinggi. Transformator Instrumen umumnya digunakan untuk mengurangi tegangan tinggi dan arus hingga harga aman dan dapat digunakan untuk kerja peralatan demikian.

Kerja transformator yang berdasarkan induksi-elektromagnetik, menghendaki adanya gandengan magnet antara rangkaian primer dan sekunder. Gandengan magnet ini berupa inti besi tempat melakukan fluks bersama. Berdasarkan cara melilitkan kumparan pada inti, dikenal dua macam transformator, yaitu tipe inti dan tipe cangkang.



Gambar 2.1 Tipe Inti



Gambar 2.2 Tipe Cangkang

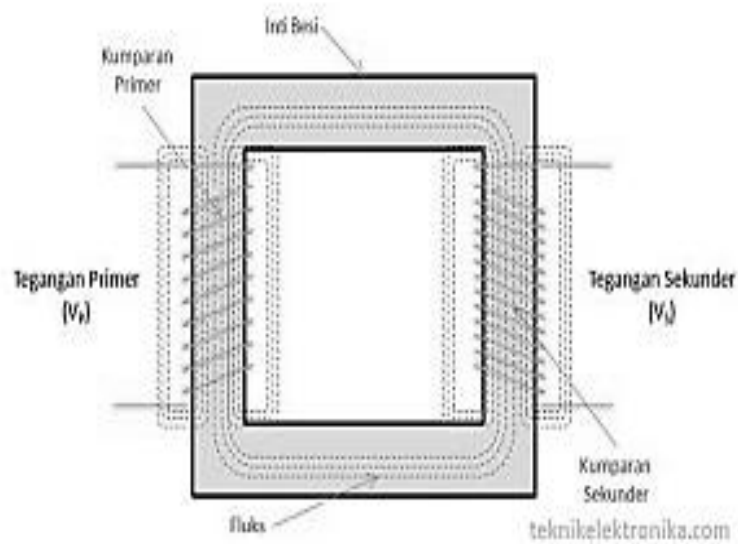
(Sumber : Zuhail, 1991)²

2.2 Prinsip Kerja Transformator

Transformator akan bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Berdasarkan pada hukum tersebut maka apabila sebuah kumparan (primer) dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik (AC) maka akan timbul fluks bolak-balik pada inti yang terbungkus kumparan. Kumparan tersebut membuat jaringan tertutup, sehingga mengalir arus primer. Karena adanya fluks pada kumparan primer, maka pada kumparan primer terjadi induksi sendiri (self induction). Pengaruh induksi dari kumparan primer membuat kumparan sekunder juga terjadi induksi.

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.

² Zuhail. 1991. *Dasar Tenaga Listrik*. Bandung : ITB.



Gambar 2.3 Prinsip Kerja Transformator

kumparan sekunder akan menerima garis gaya magnet atau fluksi yang berubah-ubah dan mempunyai harga yang sama dengan jumlah garis gaya yang dikeluarkan sisi primer, sehingga pada sisi sekunder terjadi induksi. Besarnya ggl induksi yang dihasilkan masing-masing kumparan berbanding lurus dengan jumlah lilitannya, sehingga di dapat:

$$e^1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \dots \dots \dots (3.1)$$

$$e^2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} \dots \dots \dots (3.2)$$

Dimana:

e_1 = ggl induksi sesaat pada sisi primer

e_2 = ggl induksi sesaat pada sisi sekunder

N_1 = jumlah lilitan kumparan primer

N_2 = jumlah lilitan kumparan sekunder

Jika dianggap bahwa tidak ada daya yang hilang, maka daya yang dilepas pada sisi primer sama dengan daya yang diterima pada sisi sekunder:

$$E_1 \cdot I_1 = E_2 \cdot I_2 \dots \dots \dots (3.3)$$



$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{I_1}{I_2} \dots \dots \dots (3.4)$$

Dimana:

E_1 = ggl induksi sisi primer (volt) efektif

E_2 = ggl induksi sisi sekunder (volt) efektif

I_1 = arus sisi primer

I_2 = arus sisi sekunder

2.3 Bagian-Bagian Transformator¹

Bagian-bagian transformator terdiri atas:

1. Kumparan Transformator

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 synchronone, kapasitor shunt dan reactor shunt.



Gambar 2.4 Kumparan Transformator



2. Inti Besi

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 untuk mengurangi eddy current yang merupakan arus sirkulasi pada inti besi hasil induksi medan magnet, dimana arus tersebut akan mengakibatkan rugi – rugi.

Inti besi, merupakan bahan ferro magnet yang berfungsi untuk melipat gandakan nilai atau mempermudah jalan fluksi yang ditimbulkan oleh arus listrik yang dialirkan melalui kumparan. Nilai induksi atau kerapatan fluksi di dalam inti besi jauh lebih besar dan nilai induksi kumparan yang sama jika intinya terbuat dari bahan non ferro, karena nilai permeabilitas bahan ferro ribuan kali lebih besar dari nilai permeabilitas bahan non ferro magnet. Inti besi juga berfungsi menghantarkan dan mengarahkan arus magnet (fluksi), sehingga hampir seluruh fluksi yang dibangkitkan kumparan primer menerobos kumparan sekunder sehingga di kumparan sekunder terinduksi GGL yang selanjutnya memasok energi listrik ke beban. Dengan demikian, hampir seluruh energi listrik di kumparan primer dipindahkan dan diubah menjadi energi listrik di kumparan sekunder melalui medan magnet. Namun, inti besi juga memberikan efek negatif pada operasi transformator, yaitu menyebabkan timbulnya rugi-rugi energi yang disebut rugi besi yaitu :

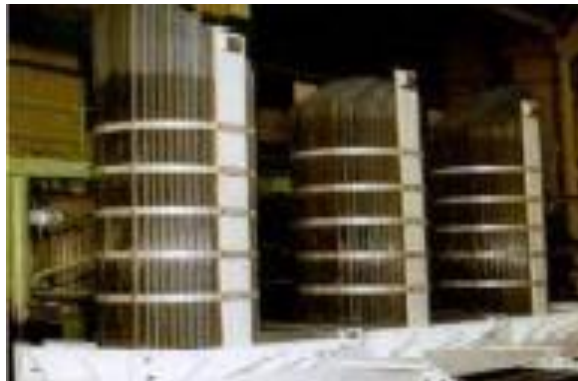
1. Rugi-rugi arus pusar, rugi-rugi ini timbul akibat fluksi bolak-balik menerobos inti besi sehingga timbul arus pusar yang mengalir di dalam inti besi tersebut sehingga mengakibatkan timbulnya panas.
2. Rugi-rugi histerisis, rugi-rugi ini juga menimbulkan panas pada inti besi tersebut. Nilai rugi histerisis proporsional dengan luas lengkung kemagnetan inti besi tersebut.

Untuk menekan rugi besi akibat arus pusar, inti besi harus dibuat berlapis dengan dilaminasi antar lapis satu dengan lapis lain agar nilai



arus pusar dapat ditekan. Dengan demikian, inti besi merupakan salah satu bagian yang paling utama, karena inti sebagai jalan sirkulasi fluks magnet, maka bahan yang digunakan pada inti besi harus dipilih yang mempunyai rugi histerisis rendah yang dikenal dengan nama besi lunak.

Luas penampang inti besi sangat menentukan terhadap desain transformator yang akan dibuat. Dimensi yang diinginkan baik itu lebarnya maupun tingginya dapat diatur melalui luas dan tinggi dari inti besi yang dibuat. Luas penampang dan tinggi inti besi mengikuti desain yang ada atau yang sudah didesain oleh pabrikan, hanya mengikuti desain yang ada dan menghitung ulang terhadap material yang rusak untuk direkondisi supaya kembali ke spesifikasi semula seperti merekondisi kumparan primer yang sering mengalami kerusakan yang sangat parah sehingga diperlukan penggantian dan penggulangan ulang.



Gambar 2.5 Inti Besi Transformator

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 transformator.



Gambar 2.6 Bushing High and Low Voltage

(Sumber : Tondok dkk, 2019).¹

4. Pendinginan

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 dia 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 1. Macam-macam Sistem Pendingin Trafo

No	Jenis sistem pendingin	Media			
		Di Dalam Trafo		Di Luar Trafo	
		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	Gabungan 3 dan 4			
9	ONAN/OFAN	Gabungan 3 dan 5			
10	ONAN/OFAF	Gabungan 3 dan 6			
11	ONAN/OFWF	Gabungan 3 dan 7			

Keterangan:

- a. ONAN (Oil Natural-Air Natural) merujuk pada hilangnya panas dari minyak ke atmosfer. Hal ini disebabkan oleh sirkulasi alami minyak melalui minyak dan peralatan pendinginan yang didinginkan secara eksternal oleh udara alam.
 - b. ONAF (Oil Natural-Air Force) merupakan pendinginan menjaga sirkulasi alami minyak melalui kumparan dan heat exchanger kemudian udara dipaksa ke permukaan radiator.
 - c. OFAF (Oil Force-Air Force) merupakan pendinginan dirancang untuk meningkatkan tingkat pertukaran panas dengan memaksa sirkulasi minyak oleh pompa. Untuk mendapatkan disipasi panas maksimum, kipas harus menghembuskan udara secara terus menerus pada permukaan radiator.
 - d. OFOD (Oil Forced-Oil Directed) merupakan jenis pendinginan ketika minyak dipaksa mengalir melalui kumparan, ini dinamakan aliran langsung (Directed Flow).
5. Tangki dan Konservator



Tangki Konservator berfungsi untuk menampung minyak cadangan dan uap/udara akibat pemanasan trafo karena arus beban. Diantara tangki dan trafo dipasangkan relai bucholz yang akan menyerap gas produksi akibat kerusakan minyak. Untuk menjaga agar minyak tidak terkontaminasi dengan air, ujung masuk saluran udara melalui saluran pelepasan/venting dilengkapi media penyerap uap air pada udara, sering disebut dengan silica gel dan dia tidak keluar mencemari udara disekitarnya.

6. Tap Changer

Kualitas tegangan merupakan suatu hal yang penting dalam mendistribusikan energi listrik. Tegangan keluaran dari transformator harus stabil meskipun tegangan input tidak selalu sama, dalam hal ini maka perubahan ratio belitan dapat mempengaruhi tegangan keluaran dari transformator sehingga dapat disesuaikan dengan kebutuhan sistem meskipun tegangan inputnya tidak selalu sama. penyesuaian ratio dari belitan transformator ini disebut tap charger.

Pada proses perubahan ratio belitan transformator bisa dilakukan pada berbagai kondisi baik pada saat transformator berbeban maupun tidak berbeban. Tap charger terdiri dari selector Switch yang digunakan untuk menentukan posisi tap charger, Diverter Switch yang digunakan untuk melakukan dan melepaskan kontak dengan kecepatan yang tinggi, dan Tahanan Transisi yang akan dilewati arus primer pada saat perubahan tap.

Kestabilan tegangan dalam suatu jaringan merupakan salah satu hal yang dinilai sebagai kualitas tegangan. Transformator dituntut memiliki nilai tegangan output yang stabil sedangkan besarnya tegangan input tidak selalu sama. Dengan mengubah banyaknya belitan pada sisi primer diharapkan dapat mengubah ratio antara belitan primer dan sekunder dan dengan demikian tegangan output/sekunderpun dapat di. proses perubahan ratio belitan ini dapat dilakukan pada saat



transformator sedang berbeban (On load tap changer) atau saat transformator tidak berbeban (Off load tap changer).

Tap changer terdiri dari :

1. Selector Switch
2. Diverter Switch
3. 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.

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 dilokalisir dan tidak merusak minyak.



Gambar 2.7 Tap Changer (Sumber : Tondok dkk, 2019).



7. NGR (Netral Ground Resistant)

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

8. Peralatan Proteksi

Peralatan yang mengamankan trafo terhadap bahaya fisis, listrik maupun kimiawi

9. Indikator

Untuk mengawasi selama transformator beroperasi, maka perlu adanya indikator pada transformator yang antara lain sebagai berikut; indikator suhu minyak, indikator permukaan minyak, indikator sistem pendingin, indikator kedudukan tap.

2.4 Jenis-Jenis Transformator³

1. Step-Up Transformator

Step-up adalah transformator yang memiliki lilitan sekunder lebih banyak daripada lilitan primern, 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.

- Rumus Hubungan Tegangan dan Lilitan

$$\frac{VP}{VS} = \frac{NP}{NS}$$

- Rumus hubungan lilitan dan kuat arus

$$\frac{IS}{IP} = \frac{NP}{NS}$$

- Rumus hubungan Kuat arus dan Tegangan

$$\frac{VP}{VS} = \frac{IS}{IP}$$

Keterangan

³A. Kadir. 1998. *Distribusi dan Utilitas Tenaga Listrik*. Jakarta : Universitas Indonesia.



VP=Tegangan Primer atau Tegangan Masukan (Volt)

VS=Tegangan Sekunder atau Tegangan Keluaran (Volt)

IP=Arus Primer (A)

IS=Arus Sekunder (A)

NP=Jumlah Lilitan Sekunder

NS=Jumlah Lilitan Primer

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.

- Menghitung Jumlah Lilitan dan Tegangan Transformator Step Down

$$\frac{NP}{NS} = \frac{VP}{VS}$$

- Menghitung Arus Pada Transformator Pada Step Down

$$\frac{VP}{VS} = \frac{IP}{IS}$$

Atau sama saja dengan:

$$\frac{IP}{IS} = \frac{NP}{NS}$$

3. Auto Transformator

Auto transformator adalah transformator listrik dengan hanya menggunakan satu belitan atau satu kumparan. Awalan 'otomatis' (Bahasa Yunani untuk 'diri') mengacu pada kumparan tunggal yang bekerja sendiri, bukan pada mekanisme otomatis apapun. Dalam autotransformator, bagian-bagian dari belitan sama dengan sisi primer dan sekunder transformator. Sebaliknya transformator biasa memiliki belitan primer dan sekunder yang terpisah yang tidak terhubung secara listrik.

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.

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.

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). Transformator tenaga atau tiga fasa adalah suatu peralatan tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan daya atau energi listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya (mentransformasikan tegangan) dengan frekuensi yang tidak berubah. Transformator 3 fasa secara prinsip sama dengan sebuah transformator 1 fasa. Perbedaan mendasar adalah pada sistem yaitu sistem satu fasa dan tiga fasa, sehingga sebuah transformator tiga fasa dapat dihubungkan segitiga (wye), bintang (delta) atau zig-zag.

Transformator tiga fasa digunakan untuk sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik karena pertimbangan agar lebih ekonomis. Transformator tiga fasa banyak sekali mengurangi berat dan lebar



kerangka, sehingga harganya akan lebih murah bila dibandingkan dengan penggabungan tiga buah transformator satu fasa dengan rating daya yang sama. Tetapi transformator tiga fasa ini juga mempunyai beberapa kekurangan, salah satunya bila fasa mengalami kerusakan, maka seluruh transformator harus diganti atau dilakukan pengujian secara komprehensif, tetapi bila transformator terdiri dari tiga buah transformator satu fasa, bila salah satu fasa transformator mengalami kerusakan. Sistem masih bisa dioperasikan dengan sistem hubungan “open delta”.

2.5 Peralatan Bantu Transformator⁴

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:
 - a. Rele Bucholz; yaitu peralatan rele yang dapat mendeteksi dan mengamankan terhadap gangguan di dalam trafo yang menimbulkan gas. Di dalam transformator, gas mungkin dapat timbul akibat hubung singkat antar lilitan (dalam phasa/ antar phasa), hubung singkat antar

⁴A. M. Suganda. 2021. Analisa Kualitas Tahanan Isolasi Transformator



-
- phasa ke tanah, busur listrik antar laminasi, atau busur listrik yang ditimbulkan karena terjadinya kontak yang kurang baik.
- b. Rele tekanan lebih; peralatan rele yang dapat mendeteksi gangguan pada transformator bila terjadi kenaikan tekanan gas secara tiba-tiba dan an langsung mentriapkan CB pada sisi upstream-nya.
 - c. Rele diferensial; rele yang dapat mendeteksi terhadap gangguan transformator apabila terjadi flash over antara kumparan dengan kumparan, kumparan dengan tangki atau belitan dengan belitan di dalam kumparan ataupun antar kumparan.
 - d. Rele beban lebih; rele ini berfungsi untuk mengamankan trafo terhadap beban yang berlebihan dengan menggunakan sirkit simulator yang dapat mendeteksi lilitan trafo yang kemudian apabila terjadi gangguan akan membunyikan alarm pada tahap pertama dan kemudian akan menjatuhkan PMT.
 - e. Rele arus lebih; rele ini berfungsi untuk mengamankan transformator terhadap gangguan hubunga singkat antar fasa didalam maupun diluar daerah pengaman trafo, juga diharapkan rele ini mempunyai sifat komplementer dengan rele beban lebih. Rele ini juga berfungsi sebagai cadangan bagi pengaman instalasi lainnya. Arus berlebih dapat terjadi karena beban lebih atau gangguan hubung singkat.
 - f. Rele fluks lebih; rele ini berfungsi untuk mengamankan transformator dengan mendeteksi besaran fluksi atau perbandingan tegangan dan frekwensi.
 - g. Rele tangki tanah; rele ini berfungsi untuk mengamankan transformator bila terjadi hubung singkat antara bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan pada transformator.
 - h. Rele gangguan tanah terbatas; rele ini berfungsi untuk mengamankan transformator terhadap gangguan tanah didalam daerah pengaman transformator khususnya untuk gangguan di dekat titik netral yang tidak dapat dirasakan oleh rele diferensial.



-
- i. Rele termis; rele ini berfungsi untuk mengamankan transformator dari kerusakan isolasi kumparan, akibat adanya panas lebih yang ditimbulkan oleh arus lebih. Besaran yang diukur di dalam rele ini adalah kenaikan temperatur.

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:
 - a. Tegangan tembus (breakdown voltage) Analisa gas terlarut (*dissolved gas analysis*, DGA)
 - b. 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)
 - a. Kondisi fisik transformator secara menyeluruh
 - b. Alat-alat ukur, relay, saringan/filter, dan lain-lain.
 - c. Pemeriksaan dengan menggunakan sinar infra-merah (infrared monitoring) setiap dua tahun
3. Karakteristik Akibat Kegagalan Gas

Tabel 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 (CO1 CO2)
---	------------------	---

4. Tindakan yang biasa dilakukan pada saat Pemeriksaan Teliti (Overhaul)

- a. Perawatan dan pemeriksaan ringan (Minor overhaul), setiap 3 atau 6 tahun.
- b. Perawatan dan pemeriksaan teliti (Major overhaul)
- 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 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.

1. Pengukuran Tahanan Isolasi⁵

⁵Indra dkk., 2022. Pengujian tahanan isolasi pada transformasi distribusi 160 kVA . *Jurnal Amplifier*.Vol.12



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. Pengujian tahanan isolasi dapat dipengaruhi suhu, kelembaban dan jalur bocor pada permukaan eksternal seperti kotoran pada bushing atau isolator. Megaohm meter biasanya memiliki kapasitas pengujian 500, 1000 atau 2500 V dc.

Faktor-faktor yang mempengaruhi pengukuran tahanan isolasi antara lain adalah arus absorpsi, suhu dan tegangan yang diterapkan. Dalam pengukuran tahanan perlu diperhatikan lamanya tegangan yang diterapkan dan bahwa sebelum pengukuran dimulai, bahan-bahan yang hendak diuji dibebaskan dari muatan yang melekat padanya (waktu pelepasan biasanya 5-10 menit). Selanjutnya untuk menilai kondisi sesuatu bahan isolasi dipakai suatu indeks polarisasi. Dimana R menyatakan tahanan isolasi, dan I menyatakan jumlah arus yang mengalir, semuanya diukur sesudah 1 atau 10 menit. Bila $\frac{R}{I} = 1$, maka dalam bahan isolasi terdapat kebocoran ini berarti bahwa bahan tersebut tidak baik.

Salah satu jenis pemeliharaan yang dilakukan dalam kegiatan Combustion Inspection (CI) yaitu pemeliharaan periodik yang dilakukan setiap 8.000 jam trafo beroperasi adalah pemeriksaan stator atau belitan trafo, kegiatan yang dilakukan dapat berupa pengujian tahanan isolasi (Insulation Resistance Test) dan Polarization Index Test.

Nilai Insulation Resistance (IR) stator diukur pada suhu ruangan 30,5°C, pengukuran dilakukan dengan cara melepas hubungan way (Y) trafo terhadap ground terlebih dahulu. Pengukuran dilakukan pada tiap fasa yaitu fasa R, S, dan T masing-masing diukur langsung terhadap ground. Sehingga megger yang digunakan yaitu megger fasa terhadap



ground. Jenis Megger yang digunakan adalah Megger jenis analog dengan tegangan 5000 Volt, pemilihan megger dengan tegangan 5000 Volt sesuai dengan besarnya tegangan kerja Trafo dan berdasarkan standar IEEE. Pengujian ini dilakukan untuk mendeteksi adanya kelemahan isolasi tahanan.

Pengujian isolasi secara rutin dapat dilakukan dengan menggunakan Megger yang pembacaannya langsung dalam megaohm. Tahanan isolasi adalah ukuran kebocoran arus yang melalui isolasi. Tahanan berubah-ubah karena pengaruh temperatur dan lamanya tegangan yang diterapkan pada lilitan tersebut, oleh karena itu faktor-faktor tersebut harus dicatat pada waktu pengujian. Nilai tegangan minimum pengujian adalah satu kilovolt sebanding dengan satu (1) megaohm nilai resistansi pada lilitan stator trafo, nilai tahanan yang rendah dapat menunjukkan lilitan dalam keadaan kotor atau basah.

Moisture dapat juga terdapat pada permukaan isolasi, atau pada lilitan atau pada keduanya. Oleh sebab itu, pengujian dengan megger sebelum dan sesudah mesin dibersihkan harus dilakukan. Jika nilai tahanan tetap rendah dan lilitan relatif bersih, ada kemungkinan adanya moisture pada lilitan, dan lilitan harus dikeringkan sekurang-kurangnya sampai diperoleh tahanan minimum yang dianjurkan.

Nilai Insulation Resistance lilitan belitan trafo masing-masing Phasa dihitung dengan rumus:

$$IR = \frac{\sum IR (m\Omega)}{n}$$

Dimana:

IR = Nilai Insulation Resistance rata-rata

IR = Insulation Resistance hasil pengukuran

n = Banyak jumlah data

Kemungkinan besarnya nilai arus bocor yang terjadi pada masing-masing phasa adalah sebesar :



$$I_{is} = \frac{V(LL)}{IR_{average}}$$

Dimana :

I_{is} = Nilai arus bocor

$V(LL)$ = Tegangan line to line

IR = nilai insulatioin resistance rata-rat

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 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 2.8 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.

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 ke1).

Tabel 3. Kondisi Isolasi berdasarkan Indeks Polarisas

Kondisi	Indeks Polaritas
Berbahaya	< 1,0
Jelek	1,0 – 1,1
Dipertanyakan	1,1 – 1,25
Baik	1,25 – 2,0



Sangat Baik

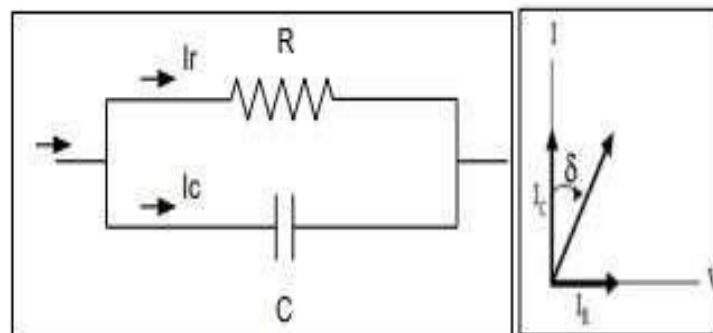
Di atas 2.0

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.

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 2.9 Rangkaian Ekuivalen Isolasi dan Diagram Phasor Arus
Pengujian Tangen Delta

A. Pengujian Tangen Delta Pada Isolasi Trafo

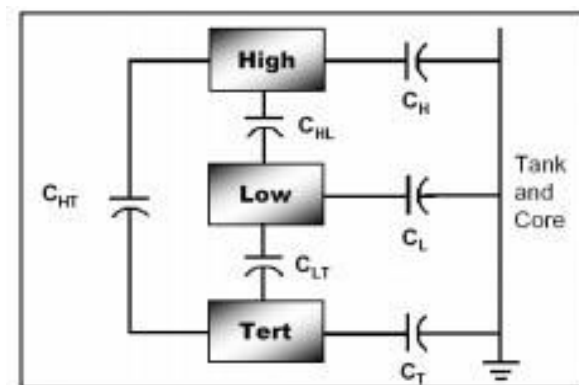
Sistem isolasi trafo secara garis besar terdiri dari isolasi antara belitan dengan ground dan isolasi antara dua belitan. Terdapat tiga metode pengujian untuk trafo di lingkungan PT PLN, yaitu metode trafo dua belitan, metode trafo tiga belitan dan metode autotrafo.

Titik pengujian trafo dua belitan yaitu:

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

Untuk pengujian trafo tiga belitan titik pengujiannya adalah:

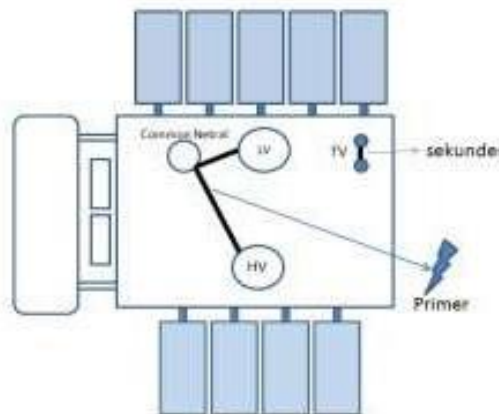
- Primer – Ground
- Sekunder – Ground
- Tertier – Ground
- Primer – Sekunder



Gambar 2.10 Rangkaian Ekuivalen Isolasi Trafo



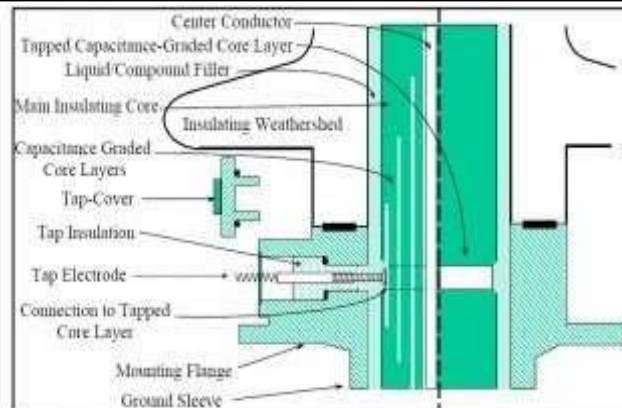
Untuk autotrafo, metode pengujian dilakukan sama dengan metode trafo dua belitan dengan perbedaan dan beberapa pertimbangan yaitu; Sisi HV dan LV pada autotrafo dirangkai menjadi satu belitan yang tidak dapat dipisahkan, sehingga bushing HV, LV dan Netral dijadikan satu sebagai satu titik pengujian (Primer).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



Gambar 2.11 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.

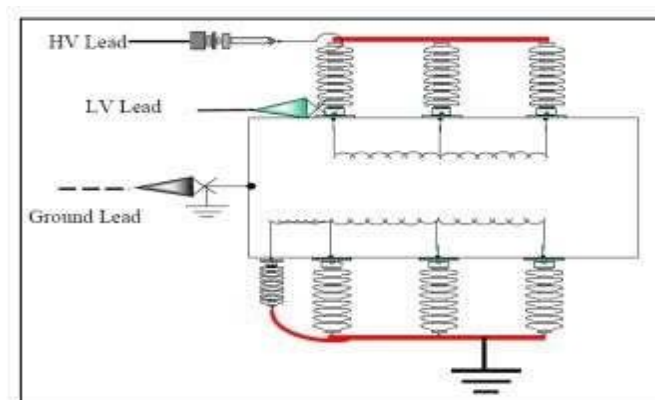


Gambar 2.12 Struktur Bushing

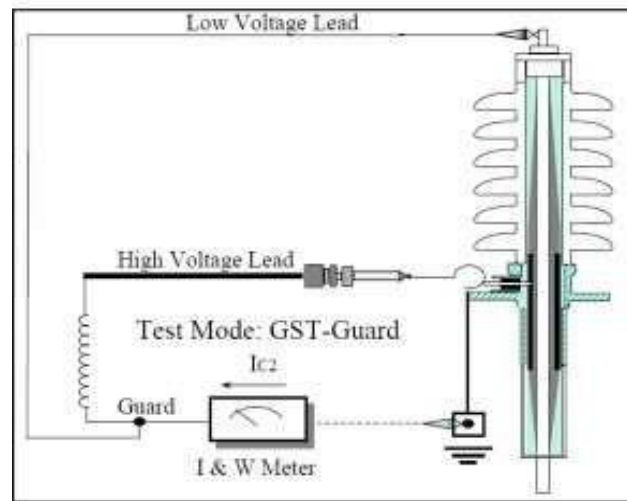
Keterangan:

C1 : Isolasi antara Tap Electrode dengan konduktor

C2 : Isolasi antara Tap Electrode dengan ground

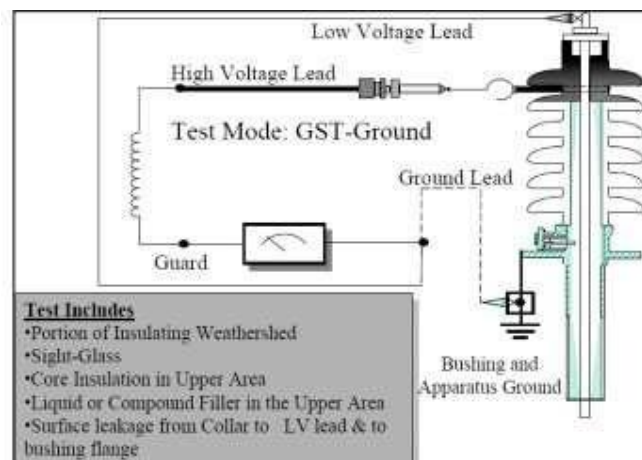


Gambar 2.13 Diagram Pengujian Tangen Delta C1 pada Bushing



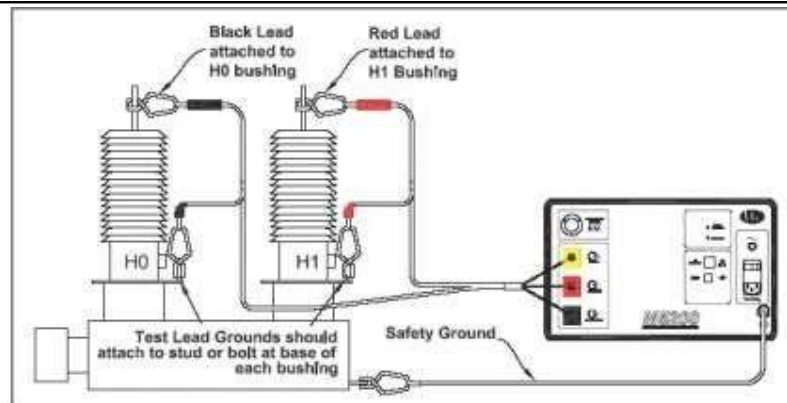
Gambar 2.14 Diagram Pengujian Tangen Delta C2 pada Bushing

4. Pengukuran SFRA (Sweep Frequency Response Analyzer)



Gambar 2.15 Diagram Pengujian Tangen Delta Hot Collar Pada Bushing

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.

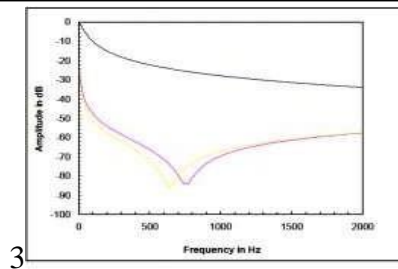


Gambar 2.16 Wiring Pengujian SFRA

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 2.17 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.

5. Ratio Test⁶

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 2.18 Alat Uji Ratio Test⁷

⁶Makkulau dkk., 2018. Pengujian Tahanan Isolasi dan Rasio Pada Trafo Ps T15. Jurnal Ilmiah Energi dan Kelistrikan. Vol. 10 No.1

⁷Koswara & Daryanto. 2018. *Analisis Pengujian Transformator Distribusi Daya 160kVA-Tegangan 20kv/400v-4.6a/231A*. Jakarta:Universitas Dirgantara



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 2.19 Alat Uji Micro Ohm Meter

7. Pengukuran pengaruh 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.

8. 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.

9. 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 tahanannya.



Gambar 2.20 Voltage Slide Regulator



Gambar 2.21 Voltmeter