



## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Transformator**

Transformator merupakan suatu alat magnetoelektrik yang sederhana, andal, dan efisien untuk mengubah tegangan arus bolak-balik dari suatu tingkat ketinggian yang lain. Pada umumnya transformator terdiri atas sebuah inti, yang terbuat dari besi berlapis dan dua kumparan, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder<sup>3</sup>

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain melalui suatu gendengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi-elektromagnet. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaannya dalam sistem tenaga memungkinkan dipilihnya tegangan yang sesuai dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan misalnya, kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya listrik jarak jauh.<sup>2</sup>

Berdasarkan frekuensi, transformator dapat dikelompokkan sebagai berikut:

1. Frekuensi daya, 50-60 c/s
2. Frekuensi pendengaran 50 c/s-20 kc/s
3. Frekuensi radio, diatas 30 kc/s

Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi:

1. Transformator daya.
2. Transformator distribusi.
3. Transformator pengukuran : yang terdiri dari transformator arus dan transformator tegangan

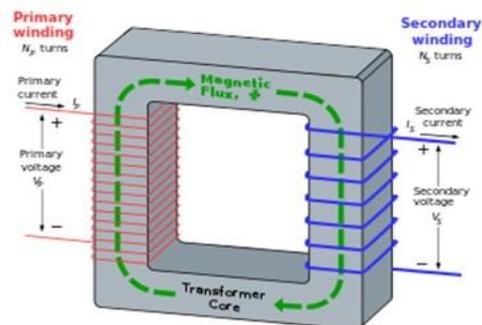
---

<sup>[3]</sup> Abdul kadir, Transformator, Penerbit Universitas Indonesia, 2010, hal1



## 2.2 Prinsip Kerja Transformator

Transformator bekerja berdasarkan prinsip elektromagnetik. Sebuah transformator yang sederhana pada dasarnya terdiri dari 2 lilitan atau kumparan kawat terisolasi yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Pada kebanyakan transformator, kumparan kawat terisolasi ini dililitkan pada sebuah besi yang dinamakan inti besi. Ketika kumparan primer dialiri arus AC (bolak-balik) maka akan menimbulkan medan magnet atau fluks magnetic disekitarnya. Kekuatan medan magnet tersebut dipengaruhi oleh besarnya arus listrik yang dialirinya. Semakin besar arus listriknya semakin besar pula medan magnetnya. Fluktuasi medan magnet yang terjadi disekitar kumparan primer akan menginduksi GGL (gaya gerak listrik) dalam kumparan sekunder. Dengan demikian, terjadilah perubahan taraf tegangan listrik baik dari tegangan rendah menjadi tegangan yang lebih tinggi maupun tegangan tinggi menjadi tegangan yang rendah.



Gambar 2.1 Gambar Prinsip kerja transformator<sup>1</sup>

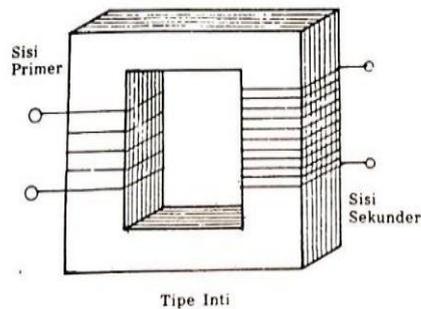
## 2.3 Konstruksi Transformator

Secara umum transformator dapat dibedakan dua jenis menurut konstruksinya yaitu tipe inti dan tipe cangkang.

### 2.3.1 Tipe inti

Pada transformator tipe inti terdapat dua kaki, dan masing-masing kaki dibelit oleh kumparan.

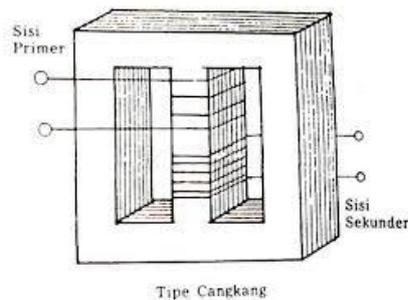
<sup>[1]</sup> Bambang Cahyono, dkk, Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga (Jakarta: PT. PLN (Persero) 2014). Hal1



**Gambar 2.2** Gambar Konstruksi Transformator Tipe Inti<sup>2</sup>

### 2.3.2 Tipe cangkang

Pada transformator tipe cangkang, mempunyai tiga buah kaki, dan hanya kaki yang tengah-tengah dibelit oleh kedua kumparan.



**Gambar 2.3** Gambar Konstruksi Transformator Tipe Cangkang<sup>2</sup>

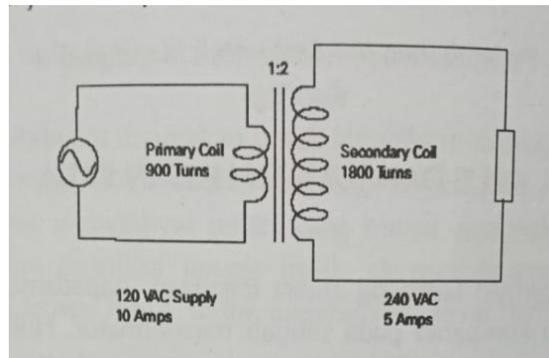
## 2.4 Jenis Jenis Transformator

### 2.4.1 Step Up

Sebuah Transformator *step-up* digunakan Ketika Transformator ini diinginkan untuk menaikkan nilai tegangan. Berikut ilustrasi rangkaian sebuah transformator *step-up*. Kumparan primer memiliki lilitan yang lebih sedikit dari pada kumparan sekunder. Jumlah lilitan pada transformator dinyatakan sebagai sebuah rasio, yang menunjukkan perbandingan jumlah lilitan pada masing-masing kumparan primer dan sekunder

[3] Abdul Kadir, Transformator, penerbit universitas indonesia, 2010, hal2

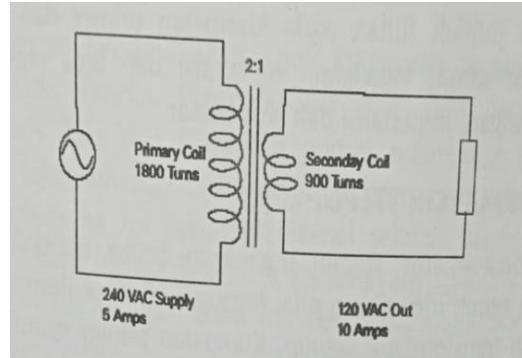
[3] Ibid hal2



**Gambar 2.4** Gambar Transformator *Step-Up*<sup>2</sup>

### 2.4.2 Step Down

Sebuah Transformator *step-down* digunakan ketika transformator ini diinginkan untuk menurunkan nilai tegangan. Berikut ilustrasi rangkaian sebuah transformator *step down*. Kumparan primer memiliki lebih banyak lilitan dari pada kumparan sekunder. Rasio *step-down* adalah 2:1, tegangan dan impedansi diturunkan, arus dinaikkan



**Gambar 2.5** Gambar Transformator *Step-Down*<sup>2</sup>

### 2.4.3 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

[2] Iftadi Irwan, Kelistrikan Industri, Penerbit Graha Ilmu, 2015, Hal152

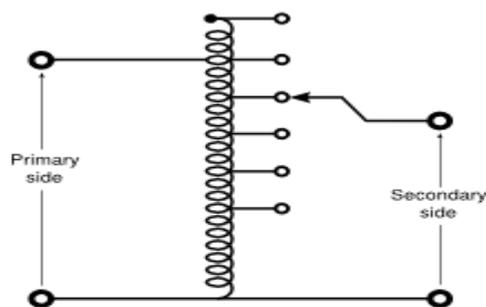
[2] Ibid Hal152



sekunder bisa dibuat dengan kawat yang tipis dibandingkan transformator biasa. Keuntungan dari *autotransformator* adalah ukuran fisiknya yang cenderung kecil dan kerugian yang lebih rendah dari pada jenis dua lilitan. Tetapi transformator jenis ini tidak dapat memberikan isolasi secara listrik antara lilitan primer dengan lilitan sekunder. Selain itu, *autotransformator* tidak dapat digunakan sebagai penaik tegangan lebih dari beberapa kali lipat (biasanya tidak lebih dari 1,5 kali)

#### 2.4.4 *Autotransformator Variabel*

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



**Gambar 2.6** Gambar Skema *Autotransformator Variabel*<sup>4</sup>

#### 2.4.5 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.

<sup>[4]</sup> Adjie Pranamata, Laporan Akhir. “Perhitungan Efisiensi Transformator Daya 54 Mva PLTGU unit 1 di PT. PLN (Persero) sektor pembangkitan keramasan Palembang dengan bantuan software matlab” (Palembang : POLSRI 2019) Hal12



---

#### **2.4.6 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

#### **2.4.7 Transformator *Center Tap***

Transformator *Center Tap* adalah salah satu jenis transformator yang mempunyai dua gulungan sekunder yang sama dan terhubung secara seri. dengan kata lain transformator yang mempunyai gulungan sekunder yang di - tap (dibuat terminal sambungan) tepat pada titik tengah gulungannya, itulah sebabnya ada sebutan "*center tap*" yang berarti "tap tengah" transformator jenis ini

#### **2.4.8 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 ( $\Delta$ )

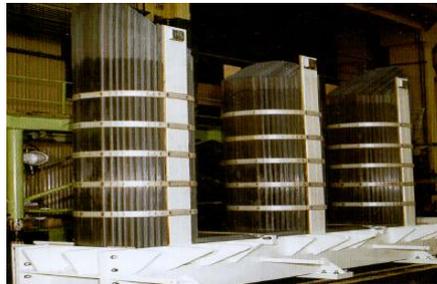
- a. Berdasarkan fungsinya, transformator tenaga dapat dibedakan menjadi :
  1. Trafo pembangkit
  2. Trafo gardu induk/penyaluran
  3. Trafo distribusi
- b. Transformator tenaga untuk fungsi penyaluran dapat dibedakan menjadi
  1. Trafo besar
  2. Trafo sedang
  3. Trafo kecil



## 2.5 Bagian-bagian Transformator

### 2.5.1 Inti besi

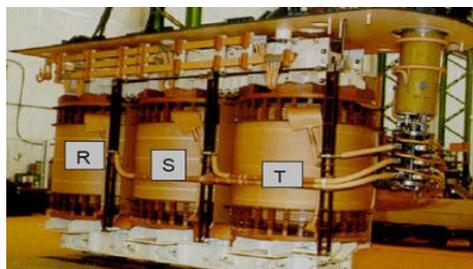
Inti besi merupakan salah satu komponen pada transformator yang terbuat dari iron base material agar memiliki permeability yang tinggi. Inti besi mempunyai fungsi untuk memepermudah jalannya flux magnetic yang timbul oleh arus listrik yang melalui kumaran. Dalam inti besi dibuat lempengan besi tipis yang diselimuti isolasi untuk mengurangi rugi-rugi besi berupa panas yang ditimbulkan oleh Eddy Current.



**Gambar 2.7** Gambar Inti Besi<sup>1</sup>

### 2.5.2 Kumaran

Beberapa lilitan kawat pada inti besi membentuk suatu kumaran, dan kumaran tersebut diisolasi, baik terhadap inti besi maupun terhadap kumaran lain menggunakan isolasi padat seperti karton, pertinax. Pada transformator terdapat kumaran primer, kumaran sekunder dan kumaran tersier.



**Gambar 2.8** Gambar Kumaran Phasa RST<sup>1</sup>

[1] Bambang Cahyono, dkk, Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga (Jakarta: PT. PLN (Persero 2014). Hal2

[1] Ibid Hal2



### 2.5.3 Bushing

Hubungan antara kumparan trafo ke jaringan luar melalui sebuah *bushing* yaitu sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator, yang sekaligus berfungsi sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan tangki trafo. Pada *bushing* dilengkapi fasilitas untuk pengujian tentang kondisi *bushing* yang sering disebut *center tap*. Secara garis besar *bushing* dapat dibagi menjadi empat bagian utama yaitu isolasi, konduktor, klem koneksi, dan asesoris.



**Gambar 2.9** Gambar Bushing Trafo<sup>9</sup>

### 2.5.4 Minyak Isolasi Transformator

Minyak isolasi pada transformator 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 2.10** Gambar Minyak Isolasi Trafo<sup>1</sup>

[9] [https://www.academia.edu/9900561/BAB\\_I\\_TRANSFORMATOR\\_DAYA](https://www.academia.edu/9900561/BAB_I_TRANSFORMATOR_DAYA),

[1] Bambang Cahyono, dkk, Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga (Jakarta: PT. PLN (Persero) 2014). Hal11

**Tabel 2.1** Spesifikasi Minyak Isolasi Dalam Kondisi Baru<sup>7</sup>

No	Sifat Minyak Isolasi	Satuan	Minyak trafo	Metode Uji
1	Kejernihan	-	Jernih, tidak terlihat adanya partikel dan sedimen	
2	Masa Jenis (20°C)	g/ml	< 0,895	ISO 3675
3	Viscositas 40°C	Mm	< 12	ISO 3104
4	Titik nyala	°C	>135	ISO 2719
5	Titik Tuang	°C	< -40	ISO 3016
6	Keasaman (acidity)	MgKOH/ g	< 0,01	IEC 6201
7	Korosi Belerang	-	Tidak Korosif	DIN 51353
8	Tegangan Tembus a. Sebelum Treatment b. Sesudah Treatment	KV/2,5 mm	>30 >70	IEC 60156
9	Faktor Kerugian Dielektrik 90°C	-	< 0,005 Setelah beroperasi < 0,5	IEC 60247
10	Ketahanan Oksidasi a. keasaman b. Kotoran	mgKOH/ g %	< 1,2 < 0,8	IEC 61125
11	Kandungan Air	mg/kg	Minyak dalam tangki < 30 Minyak dalam drum < 40	IEC 60814
12	DBDS	mg/kg	< 5	IEC 62697
13	Inhibitor	%		IEC 60666
14	Metal passivator Additive	mg/kg	Tidak terdeteksi atau < 5	IEC 60666
15	Kandungan PCA	%	< 3	IP346
16	Kandungan PCB	mg/kg	Tidak terdeteksi atau < 2	IEC 61619

<sup>[7]</sup> Bonggas L Tobbing. Peralatan Tegangan tinggi, Penerbit Erlangga, Hal255



Untuk minyak isolasi yang sudah terpakai, transformator berkapasitas >1 MVA dan bertegangan >30 kV, spesifikasi yang dipersyaratkan pada Tabel 2.2.

**Tabel 2.2** Spesifikasi Minyak Isolasi Pakai<sup>9</sup>

No	Sifat Minyak Isolasi	Tegangan Peralatan	Batas yang diperbolehkan	Metode Uji	Tempat Uji
1	Tegangan tembus	>170 KV 70. 170 KV	>50 KV/ 2,5 mm	<i>IEC 156</i> <i>ISO 760</i>	Ditempat/ Lab
2	Kandungan Air	< 70 KV >170 KV < 70 KV	>30 KV/ 2,5 mm < 20 mg/L < 30 mg/L	<i>IEC 93 &amp;</i> <i>IEC 250</i> (90°)	Lab
3	Faktor	<i>All Voltage</i>	< 0,2 – 2,0	<i>IEC 93 &amp;</i> <i>IEC 247</i>	Lab
4	Dielektrik Tahanan Jenis	<i>All Voltage</i>	G/mm	<i>IEC 93 &amp;</i> <i>IEC 247</i>	Lab
5	Angka Kenetralan	<i>All Voltage</i>	< 0,5 mg/KOH	<i>IEC 296</i>	Lab
6	Sedimen		Tidak terukur penurunan	<i>IEC 296</i>	Lab
7	Titik Nyata		Maksimum 15°C	<i>IEC 296</i>	Lab
8	Tegangan Permukaan	>170 KV	>15 x 10 <sup>3</sup> Nm <sup>-1</sup>	Sedang dikerjakan <i>IEC</i>	Dalam proses pengerjaan <i>IEC</i>
9	Kandungan Gas			Sedang dikerjakan <i>IEC</i>	Dalam proses pengerjaan <i>IEC</i>

<sup>[9]</sup> [https://www.academia.edu/9900561/BAB\\_I\\_TRANSFORMATOR\\_DAYA](https://www.academia.edu/9900561/BAB_I_TRANSFORMATOR_DAYA)



### 2.5.5 NGR (*Neutral Grounding Resistant*)

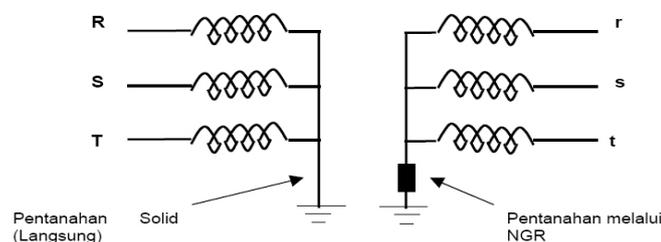
Salah satu metode pentanahan adalah dengan menggunakan NGR. NGR adalah sebuah tahanan yang dipasang seri dengan netral sekunder pada transformator sebelum terhubung ke *ground*/tanah. Tujuan dipasangnya NGR adalah untuk mengontrol besarnya arus gangguan yang mengalir dari sisi netral ke tanah. Ada dua jenis NGR yaitu, Liquid dan Solid

#### 1. Liquid

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

#### 2. Solid

Sedangkan NGR jenis padat terbuat dari *stainless steel*, *FeCrAL*, *Cast Iron*, *Copper Nickel* atau *Nichrome* yang diatur sesuai nilai tahanannya



**Gambar 2.11** Gambar Pentanahan Melalui NGR<sup>1</sup>

### 2.5.6 Tangki Konservator

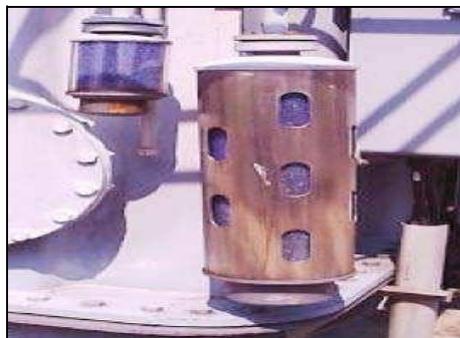
Saat terjadi kenaikan suhu operasi pada transformator, minyak isolasi akan memuai sehingga volumenya bertambah. Sebaliknya saat terjadi penurunan suhu operasi, maka minyak akan menyusut dan volume minyak akan turun. Konservator digunakan untuk menampung minyak pada saat transformator mengalami kenaikan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

<sup>[1]</sup> Bambang Cahyono, dkk, Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga (Jakarta: PT. PLN (Persero) 2014), Hal13



**Gambar 2.12** Gambar Tangki Konservator<sup>1</sup>

Seiring dengan naik turunnya volume minyak di konservator akibat pemuaian dan penyusutan minyak, volume udara didalam konservator pun akan bertambah dan berkurang. Penambahan atau pembuangan udara didalam konservator akan berhubungan dengan udara luar. Agar minyak isolasi transformator tidak terkontaminasi oleh kelembaban dan oksigen dari luar, maka udara yang akan masuk kedalam konservator akan difilter melalui silicagel.

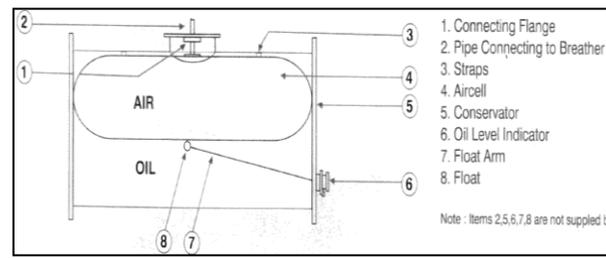


**Gambar 2.13** Gambar Silicagel<sup>1</sup>

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

<sup>[1]</sup> Bambang Cahyono, dkk., Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga (Jakarta: PT. PLN (Persero) 2014). Hal9

<sup>[1]</sup> Ibid Hal9



**Gambar 2.14** Gambar Konstruksi Konservator dengan *Rubber Bag*<sup>1</sup>

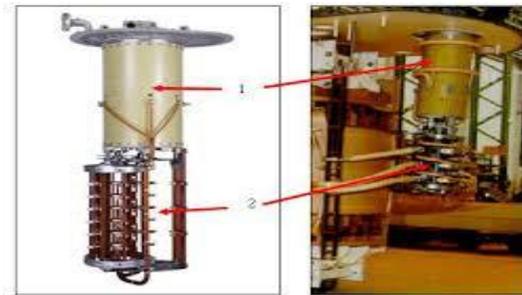
### 2.5.7 Tap Changer

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 perbandingan antara belitan primer dan sekunder. Dengan demikian tegangan *output* sekunder pun dapat disesuaikan dengan kebutuhan sistem, berapa pun tegangan *input*/primernya. Penyesuaian perbandingan belitan ini disebut *Tap changer*. Proses perubahan perbandingan belitan ini dapat dilakukan pada saat transformator sedang berbeban (*On load tap changer*) atau saat transformator tidak berbeban (*Off load tap changer*). *Tap changer* sendiri 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 perbandingan 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.

<sup>[1]</sup> Bambang Cahyono, dkk, Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga (Jakarta: PT. PLN (Persero) 2014). Hal10



**Gambar 2.15** Gambar OLTC Pada Trafo<sup>6</sup>

### 2.5.8 Indikator

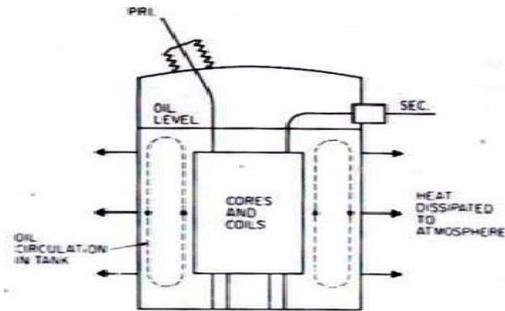
Untuk mengawasi selama transformator beroperasi, maka perlu adanya indikator yang dipasang pada transformator. Indikator tersebut adalah sebagai berikut:

1. indikator suhu minyak
2. indikator permukaan minyak
3. indikator sistem pendingin
4. indikator kedudukan tap, dan sebagainya.

### 2.5.9 Pendingin Transformator

Sebagai instalasi tenaga listrik yang dialiri arus maka pada transformator akan terjadi panas yang sebanding dengan arus yang mengalir serta temperatur udara disekeliling transformator tersebut. Jika temperatur luar cukup tinggi dan beban transformator juga tinggi maka transformator akan beroperasi dengan temperatur yang tinggi pula. Untuk mengatasi hal tersebut transformator perlu dilengkapi dengan sistim pendingin yang bisa memanfaatkan sifat alamiah dari cairan pendingin dan dengan cara mensirkulasikan secara teknis, baik yang menggunakan sistem radiator, sirip-sirip yang tipis berisi minyak dan dibantu dengan hembusan angin dari kipas-kipas sebagai pendingin yang dapat beroperasi secara otomatis berdasarkan pada *setting* rele temperatur dan sirkulasi air yang bersinggungan dengan pipa minyak isolasi panas.

[<sup>6</sup>] Suci Siswandari, “Studi Efisiensi Pemakaian Transformator Daya 54 MVA /11/150 KV di PT PLN (Persero) Sektor Pembangkitan Keramasan Palembang”. (Palembang: POLSRI 2016) Hal21

Gambar 2.16 Gambar Pendingin Trafo<sup>9</sup>Tabel 2.3 Macam-Macam Pendingin Pada Transformator<sup>1</sup>

No	Macam sistem pendingin	Media				Singkatan
		Didalam transformator		Diluar Transformator		
		Sirkulasi alami	Sirkulasi paksa	Sirkulasi alami	Sirkulasi paksa	
1	<i>AN</i>	-	-	Udara	-	<i>Air Natural</i>
2	<i>AF</i>	-	-	-	Udara	<i>Air Forced</i>
3	<i>ONAN</i>	Minyak	-	Udara	-	<i>Oil Natural</i> <i>Air Natural</i>
4	<i>ONAF</i>	Minyak	-	-	Udara	<i>Oil Natural</i> <i>Air Forced</i>
5	<i>OFAN</i>	-	Minyak	Udara	-	<i>Oil Forced</i> <i>Air Forced</i>
6	<i>OFAF</i>	-	Minyak	-	Udara	<i>Oil Forced</i> <i>Air Forced</i>
7	<i>OFWF</i>	-	Minyak	-	Air	<i>Oil Forced</i> <i>Water Forced</i>
8	<i>ONAN/ONAF</i>	Kombinasi 3 dan 4				
9	<i>ONAN/OFAN</i>	Kombinasi 3 dan 5				
10	<i>ONAN/OFAF</i>	Kombinasi 3 dan 6				
11	<i>ONAN/OFWF</i>	Kombinasi 3 dan 7				

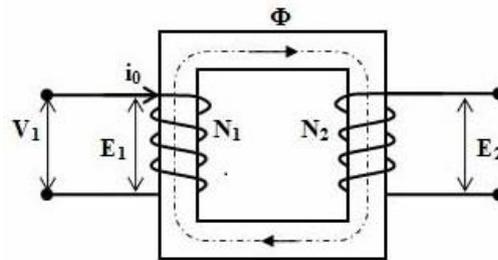
[9] [https://www.academia.edu/9900561/BAB\\_I\\_TRANSFORMATOR\\_DAYA](https://www.academia.edu/9900561/BAB_I_TRANSFORMATOR_DAYA)

[1] Bambang Cahyono, dkk, Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga (Jakarta: PT. PLN (Persero), 2014). Hal7



## 2.6 Keadaan Transformator Tanpa Beban

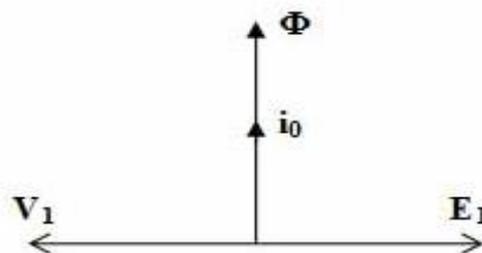
Transformator disebut tanpa beban jika kumparan sekunder dalam keadaan terbuka (*Open Circuit*)



**Gambar 2.17** Gambar Transformator Keadaan tanpa beban<sup>8</sup>

Dalam keadaan ini, arus  $i_0$  yang mengalir pada kumparan primer adalah sangat kecil. Arus ini disebut arus primer tanpa beban atau arus penguat. Arus  $i_0$  adalah terdiri dari arus pemagnet ( $i_M$ ) dan arus tembaga ( $i_C$ ).

Arus  $i_M$  inilah yang menimbulkan flux magnet bersama yang dapat mengakibatkan timbulnya rugi histerisis dan rugi *eddy current* (arus pusar). Rugi histerisis dan rugi eddy current inilah yang menimbulkan rugi inti sedangkan adanya arus tembaga akan menimbulkan rugi tembaga. Secara vektoris hubungan antara arus penguat, flux magnet bersama dan gaya gerak listrik primer ditunjukkan pada Gambar 2.18



**Gambar 2.18** Gambar Hubungan antara  $I_0\Phi$  dan  $E_1$ <sup>8</sup>

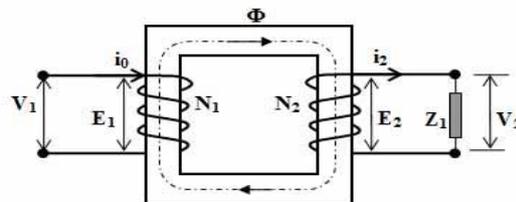
<sup>[8]</sup> Zuhail, Dasar Tenaga Listrik, Penerbit ITB Bandung, 1991, Hal17

<sup>[8]</sup> Ibid, Hal17



## 2.7 Keadaan Transformator Berbeban

Apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban  $Z_L$ ,  $I_2$  mengalir pada kumparan sekunder dimana  $I_2 = V_2/Z_L$  dengan  $q_2 =$  faktor kerja beban.



**Gambar 2.19** Gambar Transformator Keadaan Berbeban<sup>8</sup>

Arus beban  $I_2$  ini akan menimbulkan gaya gerak magnet (ggm)  $N_2 I_2$  yang cenderung menentang fluks ( $\Phi$ ) bersama yang telah ada akibat arus pemagnitan  $I_M$ . Agar fluks bersama itu tidak berubah nilainya, pada kumparan primer harus mengalir arus  $I_2$ , yang menentang fluks yang dibangkitkan oleh arus beban  $I_2$

## 2.8 Rasio

Tegangan yang dihasilkan pada sekunder bergantung pada besaran tegangan dan arus primer dan tentunya jumlah lilitan pada primer dan sekunder,

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$V_1 = V_2 \times a \dots\dots\dots (2.2)$$

$$I_1 = \frac{I_2}{a} \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan:

$a$  = Rasio

$V_1$  = Tegangan primer

$V_2$  = Tegangan sekunder

$I_1$  = Arus primer

$I_2$  = Arus sekunder

$N_1$  = Jumlah lilitan primer

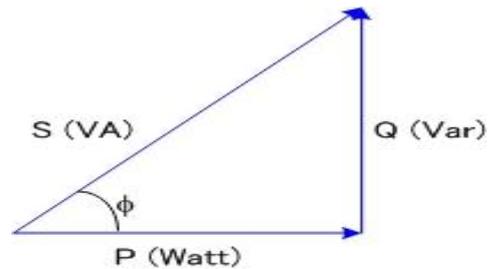
$N_2$  = Jumlah lilitan sekunder

<sup>[8]</sup> Zuhail, *Dasar Tenaga Listrik*, Penerbit ITB Bandung, 1991, Hal21



## 2.9 Segitiga Daya

Segitiga daya adalah suatu hubungan antara daya nyata, daya semu, dan daya reaktif, yang dapat dilihat hubungannya pada gambar bentuk segitiga berikut ini:



**Gambar 2.20** Gambar Segitiga Daya<sup>3</sup>

Daya Listrik dibagi menjadi 3 bagian yaitu sebagai berikut :

### 1. Daya Nyata (P)

Daya nyata merupakan daya listrik yang digunakan untuk keperluan menggerakkan mesin-mesin listrik atau peralatan lainnya.

$$P = S \times \cos \theta = V \times I \times \cos \theta \dots \dots \dots (2.4)$$

Keterangan :

P = Daya aktif

S = Daya semu

$\cos \theta$  = Faktor daya

### 2. Daya Semu (S)

Daya semu merupakan daya listrik yang melalui suatu penghantar transmisi atau distribusi. Daya ini merupakan hasil perkalian antara tegangan dan arus yang melalui penghantar.

$$S = \sqrt{3} \times V \times I \dots \dots \dots (2.5)$$

[3] Adjie Pranamta, "Perhitungan Efisiensi Transformator Daya 54 Mva PLTGU unit 1 di PT. PLN (Persero) sektor pembangkitan keramasan Palembang dengan bantuan software matlab". (Palembang : POLSRI 2019) Hal27



Keterangan:

S = Daya semu (VA)

V = Tegangan

I = Arus

### 3. Daya Reaktif (Q)

Daya reaktif merupakan selisih antara daya semu yang masuk pada penghantar dengan daya aktif pada penghantar itu sendiri, dimana daya ini terpakai untuk daya mekanik dan panas.

$$Q = V \times I \times \sin \theta \dots\dots\dots(2.6)$$

Keterangan:

Q = Daya reaktif

I = Arus

V = Tegangan

$\sin \theta$  = Faktor reaktif

### 2.10 Faktor Daya

Faktor daya listrik adalah perbandingan antara daya aktif dengan daya semu, atau dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\cos \theta = \frac{P}{S} \dots\dots\dots(2.7)$$

Keterangan:

$\cos \theta$  = Faktor daya

P = Daya aktif (W)

S = Daya Semu (VA)

### 2.11 Rugi-rugi Transformator<sup>4</sup>

Rugi-rugi daya trafo berupa rugi inti atau rugi besi dan rugi tembaga yang terdapat pada kumparan primer maupun sekunder. Untuk mengurangi rugi besi haruslah diambil inti besi yang penampangnya cukup besar agar fluks magnet

<sup>[4]</sup> Rijono Yon, Dasar Teknik Tenaga Listrik, Penerbit ANDI, 1997, Hal41



mudah mengalir di dalamnya. Untuk memperkecil rugi tembaga haruslah diambil kawat tembaga yang penampangannya cukup besar untuk mengalirkan arus listrik yang diperlukan. Rugi inti terdiri dari rugi eddy dan rugi histeris. Rugi arus eddy timbul akibat adanya arus pusar pada inti yang dapat menghasilkan panas. adapun arus pusar inti ditentukan oleh tegangan induksi pada inti yang menghasilkan perubahan-perubahan flux magnet. rugi histeris merupakan rugi tenaga yang disebabkan oleh flux magnet bolak-balik pada inti

### 2.11.1 Rugi –Rugi Dalam Keadaan Berbeban

Rugi-Rugi yang terjadi pada transformator berbeban pada dasarnya selalu berubah-ubah, hal ini tergantung pada arus beban yang mengalir pada tahanan transformator. Sehingga rugi transformator dalam keadaan berbeban merupakan perkalian kwadrat arus dengan tahanan transformator, yang dikenal sebagai rugi-rugi tembaga ( $P_{cu}$ ) Rugi tembaga kumparan primer dan kumparan sekunder berturut-turut adalah :

$$P_{cu} = I_1^2 R \dots \dots \dots (2.8)$$

Keterangan:

$P_{cu}$  = rugi inti

$I$  = Arus

$R$  = Tahanan

Dengan demikian rugi tembaga total :

$$P_{cu} = P_{cu1} + P_{cu2}$$

$$P_{cu} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \dots \dots \dots (2.9)$$

Jumlah total rugi-rugi pada transformator adalah :

$$P_{\text{rugi total}} = P_{cu} + \text{Rugi inti } (P_i) \dots \dots \dots (2.10)$$

Besarnya rugi-rugi tembaga pada setiap perubahan beban dapat ditentukan dengan persamaan :

$$P_{t2} = \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^2 \times P_{t1} \dots \dots \dots (2.11)$$



Keterangan :

$P_{t2}$  = Rugi-rugi tembaga pada saat pembebanan tertentu.

$P_{t1}$  = Rugi-rugi tembaga beban penuh.

$S_2$  = Beban yang dioperasikan

$S_1$  = Nilai pengenalan

### 2.11.2 Rugi Tanpa Beban

#### a. Rugi histerisis

Kerugian Histerisis disebabkan oleh gesekan molekul yang melawan aliran gaya magnet didalam inti besi, Gesekan molekul dalam inti besi ini menimbulkan panas, Panas yang timbul ini menunjukkan kerugian energi, karena sebagian kecil energi listrik tidak dipindahkan, tetapi diubah menjadi energi panas, panas yang tinggi juga dapat merusak trafo, sehingga pada trafo transmisi daya listrik ukuran trafo besar harus didinginkan dengan media pendingin. Umumnya digunakan minyak khusus untuk mendinginkan trafo ini. Rugi histeris ( $P_h$ ) yaitu rugi yang disebabkan fluks bolak-balik pada inti besi yang dinyatakan sebagai berikut :

$$P_h = K_h f B_{maks} \text{ (watt) } \dots\dots\dots(2.12)$$

Keterangan:

$F$  = frekuensi jala jala

$K_h$  = konstanta histeris

$B_{maks}$  = fluks maksimum (weber)

#### b. Rugi ‘Arus Eddy’

Kerugian karena eddy Current disebabkan oleh aliran sirkulasi arus yang menginduksi logam. Ini disebabkan oleh aliran fluks magnetik disekitar inti besi. Karena inti besi trafo terbuat dari konduktor (umumnya besi lunak) maka arus eddy yang menginduksi inti besi akan semakin besar. Eddy current dapat menyebabkan kerugian daya pada sebuah trafo karena pada saat terjadi induksi arus listrik pada inti besi, maka sejumlah energi listrik akan diubah menjadi energi panas, ini merupakan kerugian. Untuk mengurangi arus eddy, maka inti besi



dibuat berlapis-lapis tujuan untuk memecah induksi arus eddy yang terbentuk didalam inti besi. Rugi arus eddy ( $P_e$ ) yaitu rugi yang disebabkan arus pusar pada inti besi dirumuskan sebagai berikut :

$$P_e = K_e f^2 B_{maks} \text{ (Watt)} \dots \dots \dots (2.13)$$

Keterangan :

- $P_e$  = rugi arus eddy
- $K_e$  = konstanta arus eddy
- $F$  = frekuensi jala-jala
- $B_{maks}$  = fluks maksimum (weber)

Jadi, rugi besi (rugi inti) adalah :

$$P_i = P_h + P_e \dots \dots \dots (2.14)$$

## 2.12 Efisiensi Transformator<sup>4</sup>

Efisiensi transformator adalah perbandingan antara keluaran daya yang berguna dan masuk daya total. Karena masukan ke transformator sama dengan keluaran daya yang berguna ditambah kerugiannya, maka persamaan efisiensi dapat ditulis dalam bentuk sebagai berikut :

$$\text{Daya keluaran} = \text{daya input} - \text{kerugian} \dots \dots \dots (2.15)$$

$$\eta = \frac{\text{daya keluaran}}{\text{daya masukan}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.16)$$

Atau

$$\eta = \frac{\text{daya keluaran}}{\text{daya keluaran} + \Sigma_{rugi}} \dots \dots \dots (2.17)$$

$$\eta = \frac{\Sigma_{rugi}}{\text{daya masukan}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.18)$$

Dari persamaan di atas, jelas bahwa efisiensi transformator dapat ditentukan untuk setiap beban dengan pengukuran langsung daya masukannya dan daya keluarannya

<sup>[4]</sup> Rijono Yon, Dasar Teknik Tenaga Listrik, Penerbit ANDI, 1997, Hal52