



---

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Transformator

##### 2.1.1 Pengertian Transformator

Transformator adalah suatu alat listrik statis yang digunakan untuk mengubah tegangan bolak-balik menjadi lebih tinggi atau lebih rendah dan digunakan untuk memindahkan energi dari suatu rangkaian listrik ke rangkaian lainnya tanpa merubah frekuensi. Transformator disebut peralatan statis karena tidak ada bagian yang bergerak atau berputar, tidak seperti motor atau generator.

Dalam bidang elektronika, transformator digunakan antara lain sebagai gandengan impedansi antara sumber dan beban; untuk memisahkan satu rangkaian dari rangkaian yang lain; dan untuk menghambat arus searah sambil tetap melakukan atau mengalirkan arus bolak-balik antara rangkaian. Berdasarkan frekuensi, transformator dapat dikelompokkan sebagai berikut :

1. Trafo daya dengan frekuensi kerja 50 Hz
2. Trafo pendengaran dengan frekuensi kerja 20Hz – 20 KHz
3. Trafo MF dengan frekuensi 455 KHz
4. Trafo RF dengan frekuensi > 455KHz

Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi:

1. Transformator Daya
2. Transformator Distribusi
3. Transformator Pengukuran

Dalam bentuknya yang paling sederhana, transformator terdiri atas dua kumparan dan satu induktansi mutual. Dua kumparan tersebut terdiri dari kumparan primer dan kumparan sekunder. Kumparan primer adalah kumparan yang menerima daya dan dinyatakan sebagai terminal masukan dan kumparan sekunder adalah kumparan yang melepas daya dan dinyatakan sebagai terminal



keluaran. Kedua kumparan dibelit pada suatu inti yang terdiri atas material magnetik berlaminasi.

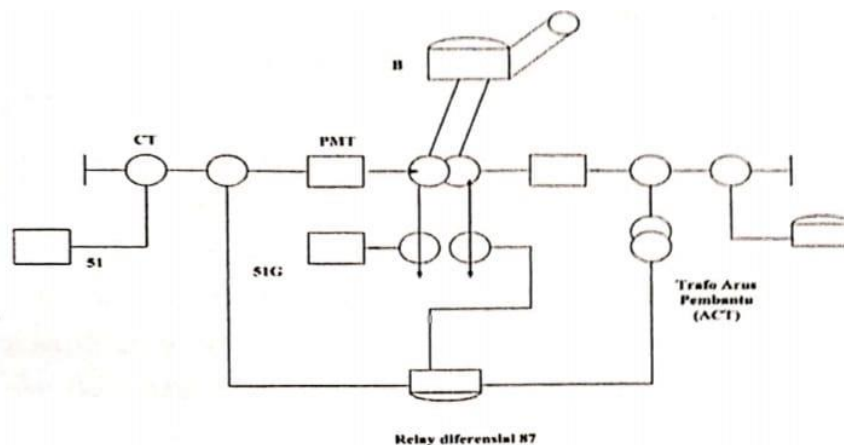
Secara sederhana transformator dapat dibagi menjadi tiga bagian, yaitu lilitan primer, lilitan sekunder, dan inti besi.

Lilitan primer merupakan bagian transformator yang terhubung dengan sumber energi (catu daya). Lilitan sekunder merupakan bagian transformator yang terhubung dengan rangkaian beban. Sedangkan inti besi merupakan bagian transformator yang bertujuan untuk mengarahkan keseluruhan fluks magnet yang dihasilkan oleh lilitan primer agar masuk ke lilitan sekunder.

### 2.1.2 Proteksi Transformator Daya

Rilay pengaman transformator daya harus dapat mendeteksi adanya sumber gangguan yang berada di dalam maupun di luar transformator yang berada di daerah pengaman nya disamping itu adanya gangguan di luar daerah pengaman bila rele yang terkait tidak bekerja salah satu rele pada transformator harus bekerja.

Pengaman transformator daya pada gambar 2.2 pada umumnya meliputi :



Gambar 2.1 Pengaman Transformator Daya<sup>5</sup>

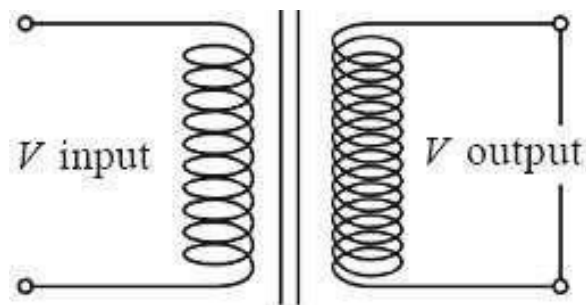
<sup>5</sup> Robert L. Shrader, "Konstruksi Transformator", Electronic communication, 1998, hal.80 dan 81.



### 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.



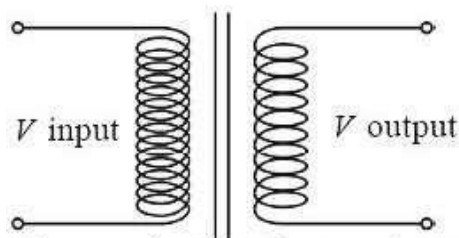
Skema sebuah trafo step up

$$N_s > N_p$$

Gambar 2.2 Transformator Step-Up

#### 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.



Skema sebuah trafo step down

$$N_s < N_p$$

Gambar 2.3 Transformator Step-Down



### 3. Autotransformator

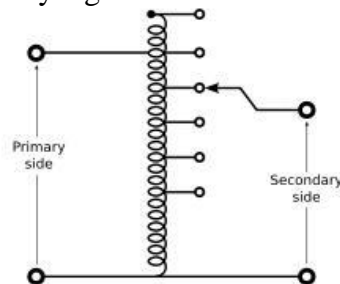
Transformator jenis ini hanya terdiri dari satu lilitan yang berlanjut secara listrik, dengan sadapan tengah. Dalam transformator ini, sebagian lilitan primer juga merupakan lilitan sekunder. Fasa arus dalam lilitan sekunder selalu berlawanan dengan arus primer, sehingga untuk tarif daya yang sama lilitan 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 2.4 Autotransformator

### 4. Autotransformator Variable

Auto transformator variable adalah autotransformator biasa yang sadapan tengahnya bias diubah- ubah, .memberikan perbandingan lilitan primer- sekunder yang berubah- ubah.

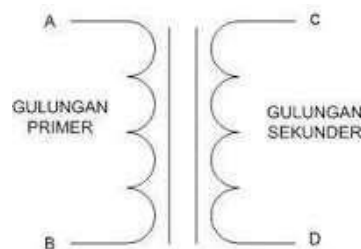


Gambar 2.5 Autotransformator Variabel



### 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 2.6 Transformator Isolasi

### 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 ( $\Delta$ ).



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

#### 2.1.4 Bagian-bagian Transformator

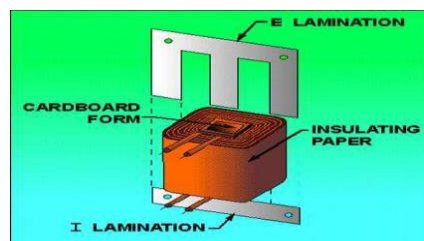
Bagian-bagian pada Transformator terdiri dari:

##### 1. Inti besi

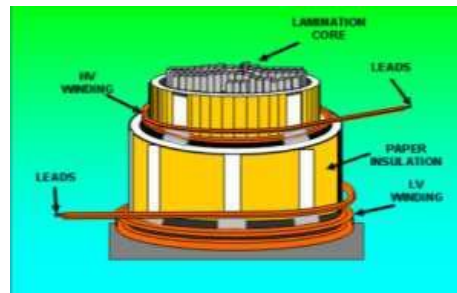
Inti besi tersebut berfungsi untuk membangkitkan fluks yang timbul karena arus listrik dalam belitan atau kumparan trafo, sedang bahan ini terbuat dari lempengan-lempengan baja tipis, hal ini dimaksudkan untuk mengurangi panas yang diakibatkan oleh arus eddy (*eddy current*).

##### 2. Kumparan primer dan kumparan sekunder

Kawat email yang berisolasi terbentuk kumparan serta terisolasi baik antar kumparan maupun antara kumparan dan inti besi. Terdapat dua kumparan pada inti tersebut yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder, bila salah satu kumparan tersebut diberikan tegangan maka pada kumparan akan membangkitkan fluks pada inti serta menginduksi kumparan lainnya sehingga pada kumparan sisi lain akan timbul tegangan.



Gambar 2.7 Konstruksi Belitan Transformator



Gambar 2.8 Gambaran Fisik Belitan Transformator Tenaga



Gambar 2.9 Komponen-komponen Internal Transformator

### 3. Minyak trafo

Belitan primer dan sekunder pada inti besi pada trafo terendam minyak trafo, hal ini dimaksudkan agar panas yang terjadi pada kedua kumparan dan inti trafo oleh minyak trafo dan selain itu minyak tersebut juga sebagai isolasi pada kumparan dan inti besi.

### 4. Isolator bushing

Pada ujung kedua kumparan trafo baik primer ataupun sekunder keluar menjadi terminal melalui isolator yang juga sebagai penyekat antar kumparan dengan body badan trafo.



Gambar 2.10 Bushing Transformator



#### 5. Tangki dan konservator

Bagian-bagian trafo yang terendam minyak trafo berada dalam tangki, sedangkan untuk pemuaian minyak tangki dilengkapi dengan konservator yang berfungsi untuk menampung pemuaian minyak akibat perubahan temperatur.



Gambar 2.11 Tangki Konservator

#### 6. Katub pembuangan dan pengisian

Katub pembuangan pada trafo berfungsi untuk menguras pada penggantian minyak trafo, hal ini terdapat pada trafo diatas 100 kVA, sedangkan katup pengisian berfungsi untuk menambahkan atau mengambil sample minyak pada trafo.

#### 7. Oil level

Fungsi dari oil level tersebut adalah untuk mengetahui minyak pada tangki trafo, oil level ini pun hanya terdapat pada trafo diatas 100 kVA.

#### 8. Pernapasan trafo

Karena naik turunnya beban trafo maupun suhu udara luar, maka suhu minyaknya akan berubah-ubah mengikuti keadaan tersebut. Bila suhu minyak tinggi, minyak akan memuai dan mendesak udara diatas permukaan minyak keluar dari tangki, sebaliknya bila suhu turun, minyak akan menyusut maka udara luar akan masuk kedalam tangki. Kedua proses tersebut diatas disebut pernapasan trafo, akibatnya permukaan minyak akan bersinggungan dengan udara luar, udara luar tersebut lembab. Oleh sebab itu pada ujung





pernapasan diberikan alat dengan bahan yang mampu menyerap kelembaban udara luar yang disebut kristal zat Hygrokopsis (*Cilicagel*).

#### 9. Pendingin trafo

Perubahan temperatur akibat perubahan beban maka seluruh komponen trafo akan menjadi panas, guna mengurangi panas pada trafo dilakukan pendingin pada trafo. Sedangkan cara pendinginan trafo terdapat dua macam yaitu : alamiah/natural (*Onan*) dan paksa/tekanan (*Onaf*). Pada pendinginan alamiah (*natural*) melalui sirip-sirip radiator yang bersirkulasi dengan udara luar dan untuk trafo yang besar minyak pada trafo disirkulasikan dengan pompa. Sedangkan pada pendinginan paksa pada sirip-sirip trafo terdapat fan yang bekerjanya sesuai setting temperaturnya.



Gambar 2.12 Pendingin Transformator

#### 10. Tap changer trafo (perubahan tap)

Tap changer adalah alat perubah pembanding transformasi untuk mendapatkan tegangan operasi sekunder yang sesuai dengan tegangan sekunder yang diinginkan dari tegangan primer yang berubah-ubah. Tap changer hanya dapat dioperasikan pada keadaan trafo tidak bertegangan atau disebut dengan “*Off Load Tap Changer*” serta dilakukan secara manual.

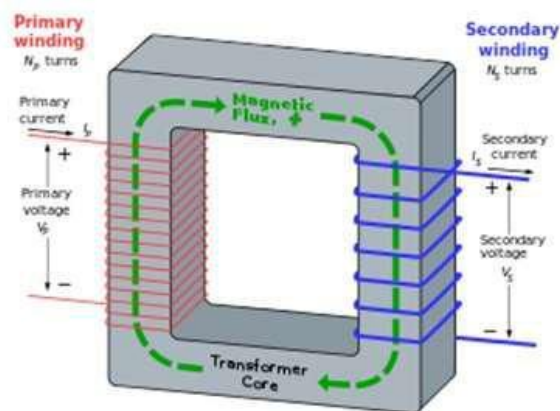


### 2.1.5 Prinsip Kerja Transformator

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.

Berdasarkan hukum Faraday yang menyatakan magnitude dari *electromotive force (emf)* proporsional terhadap perubahan fluks terhubung dan hukum Lenz yang menyatakan arah dari emf berlawanan dengan arah fluks sebagai reaksi perlawanan dari perubahan fluks tersebut didapatkan persamaan:



Gambar 2.13 Prinsip Kerja Transformat



Dikarenakan pada transformator ideal seluruh mutual flux yang dihasilkan salah satu kumparan akan diterima seutuhnya oleh kumparan yang lainnya tanpa adanya *leakage flux* maupun loss lain misalnya berubah menjadi panas.

### 2.1.6 Rasio

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

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \dots\dots\dots(2.1)^1$$

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

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

Keterangan:

$\alpha$  = Rasio tegangan

$V_1$  = Tegangan primer

$V_2$  = Tegangan sekunder

$I_1$  = Arus primer

$I_2$  = Arus sekunder

$N_1$  = Jumlah lilitan primer

$N_2$  = Jumlah lilitan sekunder

### 2.1.7 Daya Aktif

Daya aktif atau daya nyata dirumuskan dengan  $VI \cos \theta$  dengan simbol P dalam

$$P = S \times \cos \theta = V \times I \times \cos \theta \dots\dots\dots(2.4)^3$$

Keterangan:

P = Daya aktif

S = Daya semu

$\cos \theta$  = Faktor daya

V = Tegangan

I = Arus

<sup>1</sup>B. L. Theraja, *A Textbook Electrical Technology Volume II*: Hal 1123

<sup>3</sup>Eugene C. Lister, *Mesin dan Rangkaian Listrik*, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1993



### 2.1.8 Daya Semu

Perkalian tegangan  $V$  dengan arus  $I$  dalam kedua besaran ini dalam bentuk bilangan kompleks adalah  $VI$  yang dinamakan daya semu dengan simbol  $S$  dalam satuan volt ampere (VA), kilo volt ampere (KVA), mega volt ampere (MVA). Arus  $I$  adalah arus konjugate dari  $I$ . Jadi,

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

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \dots\dots\dots(2.6)$$

Keterangan:

$S$  = Daya semu (VA)

$P$  = Daya aktif (W)

$Q$  = Daya reaktif (MVAR)

$V$  = Tegangan

$I$  = Arus

### 2.1.9 Daya Reaktif

Daya reaktif adalah daya yang dibutuhkan untuk pembentukan medan magnet atau daya yang ditimbulkan oleh beban yang bersifat induktif dengan simbol  $Q$ . Satuan daya reaktif adalah volt ampere reaktif (VAR), kilo volt ampere reaktif (KVAR), dan

$$Q = V \times I \times \sin \theta \dots\dots\dots(2.7)^2$$

Keterangan:

$Q$  = Daya reaktif

$V$  = Tegangan

$I$  = Arus

$\sin \theta$  = Faktor reaktif

---

<sup>2</sup>Cekmas Cekdin dan Taufik Barlian, *Rangkaian Listrik*, Penerbit ANDI YOGYAKARTA, 2013, Hal 74



### 2.1.10 Faktor Daya

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

$$\cos \theta = \frac{P}{S} \dots \dots \dots (2.8)^3$$

Keterangan:

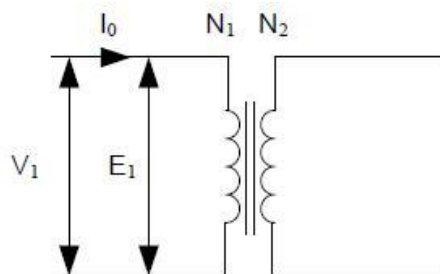
$\cos \theta$  = Faktor daya

P = Daya aktif (W)

S = Daya Semu (VA)

### 2.1.11 Transformator Tanpa Beban

Transformator disebut tanpa beban jika kumparan sekunder dalam keadaan terbuka (*open circuit*)



Gambar 2.14 Transformator Tanpa Beban<sup>4</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.

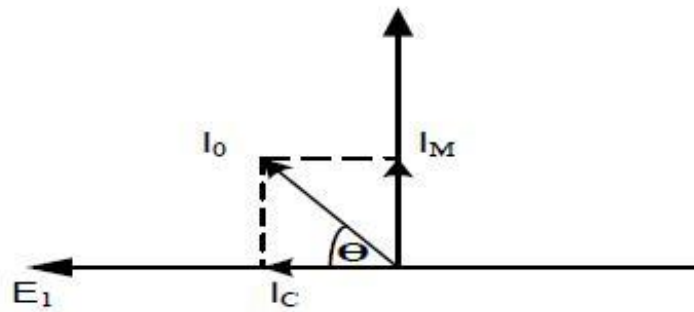
Arus  $I_0$  adalah terdiri dari arus pemagnet ( $I_M$ ) arus tembaga ( $I_C$ ). Arus  $I_M$  inilah yang menimbulkan fluks magnet bersama yang dapat mengakibatkan timbulnya rugi histerisis dan rugi eddy *curent* (arus pusar). Rugi histerisis dan rugi eddy *curent* inilah

<sup>3</sup> Ibit

<sup>4</sup>Yon Rijono, *Dasar Teknik Listrik*, Penerbit Andi, Yogyakarta: 1997.

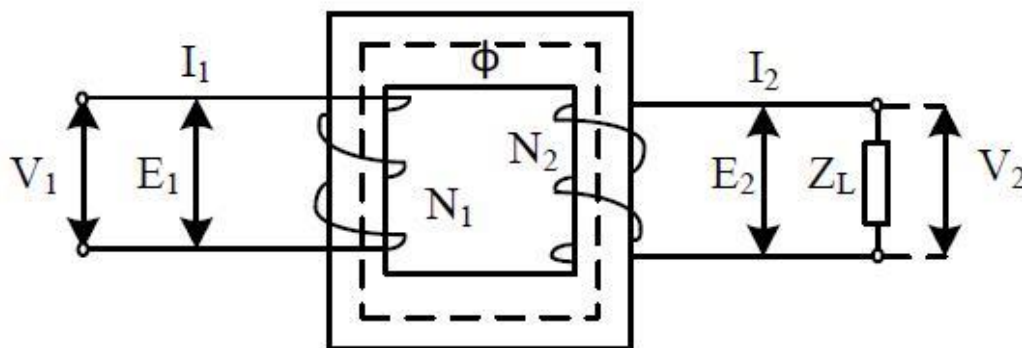


yang menimbulkan rugi inti sedangkan adanya arus tembaga akan menimbulkan rugi tembaga. Secara vektoris hubungan antara arus penguat, fluks magnet bersama dan gaya gerak listrik primer.



Gambar 2.15 Hubungan Antara  $I_o$   $\phi$  dan  $E_1$ <sup>4</sup>

### 2.1.12 Transformator Berbeban



Gambar 2.16 Transformator Berbeban<sup>6</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 pemagnetan  $I_M$ . Agar fluks bersama itu tidak berubah nilainya, pada kumparan primer harus mengalir  $I_2$ , yang menentang fluks yang dibangkitkan oleh arus beban  $I_2$ , hingga keseluruhan arus yang mengalir pada kumparan primer menjadi :

<sup>4</sup> Ibid

<sup>6</sup>Zuhal, *Dasar Tenaga Listrik*, Penerbit ITB, Bandung: 1991. Hal 17.

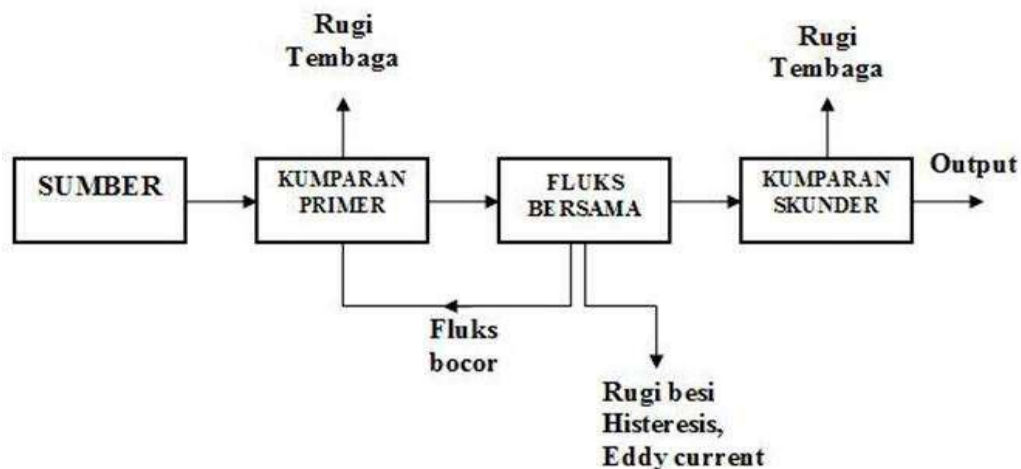


### 2.1.13 Rugi-rugi Transformator

Menurut Drs. Yon Rijono rugi-rugi daya transformator 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 mudah mengalir di dalamnya. Untuk memperkecil rugi tembaga, harus diambil kawat tembaga yang penampangnya cukup besar untuk mengalirkan arus listrik yang diperlukan. Rugi inti terdiri dari rugi arus eddy dan rugi histerisis. Rugi arus eddy timbul akibat adanya arus pusar pada inti yang menghasilkan panas. Adapun arus pusar inti ditentukan oleh tegangan induksi pada inti yang menghasilkan perubahan-perubahan fluks magnet.

Rugi histerisis merupakan rugi tenaga yang disebabkan oleh fluks magnet bolak-balik pada inti.

Gambar di bawah ini adalah diagram rugi-rugi pada transformator:



Gambar 2.17 Diagram Rugi-rugi Transformator



### 1. Rugi Tembaga (PCu)

Rugi yang disebabkan arus beban mengalir pada kawat tembaga dapat sebagai:

$$P_{Cu} = I^2 R \dots\dots\dots(2.9)^9$$

Karena arus beban berubah-ubah, rugi tembaga juga tidak konstan bergantung pada beban.

### 2. Rugi Besi (Pi)

Rugi besi terdiri atas:

1) Rugi Histerisis, yaitu rugi yang disebabkan fluks bolak-balik pada inti besi yang dinyatakan sebagai:

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{maks}^{1.6} \text{ watt} \dots\dots\dots(2.10)^4$$

Keterangan

$p_h$  = rugi histeris

$K_e$  = konstanta arus eddy

F = frekuensi jala-jala

$K_h$  = konstanta histeris

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

2) Rugi arus eddy, yaitu rugi yang disebabkan arus pusar pada inti besi. Dirumuskan sebagai :

$$P_e = k_e \cdot f^2 \cdot B_{maks}^2 \dots\dots\dots(2.11)^4$$

Keterangan:

$P_e$  = rugi arus eddy

$K_e$  = konstanta arus eddy

$K_h$  = konstanta histeris

F = frekuensi jala-jala

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

$$B_M = \frac{\phi_M}{A} \dots\dots\dots(2.12)^4$$

Dimana,

$$\phi_M = \frac{108 \cdot (E f f)^2}{4,44 \cdot f \cdot N^2} \dots\dots\dots(2.13)^4$$

Dan

<sup>4</sup>Ibid





$$(E_{ff})_2 = 4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot \phi_M \cdot 10^8 \text{ Volt} \dots\dots\dots(2.14)^4$$

Jadi, rugi besi (rugi inti) adalah:

### 3. Rugi Total

Rugi yang disebabkan oleh rugi tembaga dan rugi besi maka didapatkan rugi total yang dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Rugi Total} = P_{\text{input}} - P_{\text{output}} \dots\dots\dots(2.16)^1$$

Keterangan:

$P_{\text{input}}$  = daya masuk (watt)  $P_{\text{output}}$  = daya keluar (watt)

$$\text{Rugi Total} = \text{Rugi Variable} + \text{Rugi Tetap} \dots\dots\dots(2.17)_1$$

#### 2.1.14 Efisiensi Transformator

Efisiensi dinyatakan sebagai:

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}} + \sum \text{rugi}} = 1 - \frac{\sum \text{rugi}}{P_{\text{in}}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.18)$$

Keterangan:

$\eta$  = efisiensi (%)  $P_{\text{out}}$  = daya keluar (watt) (watt)

$P_{\text{in}}$  = daya masuk

$$\sum \text{rugi} = P_{Cu} + P_i \dots\dots\dots(2.19)^4$$

## 2.2 Rugi Akibat Adanya Arus Pada Penghantar Netral Transformator

Sebagai akibat dari beban yang tidak seimbang tiap-tiap fasa pada sisi sekunder transformator (fasa R, S, dan T) mengalir arus di penghantar netral transformator. Arus yang mengalir pada penghantar netral transformator ini menyebabkan rugi-rugi.

<sup>1</sup> Ibid

<sup>4</sup> Ibid