

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Transformator

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 elektromagnetik.

Dalam bidang elektronika, transformator digunakan antara lain sebagai gandingan impedansi (input Impedance) antara sumber dan beban, untuk menghambat arus searah (DC=Direct Current) dan melewatkan arus bolak-balik, dan untuk menaikkan dan menurunkan tegangan AC.

Pengelompokkan transformator di dalam bidang Tenaga Listrik, adalah sebagai berikut:

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

2.2 Bentuk dan Konstruksi Bagian – bagian Transformator

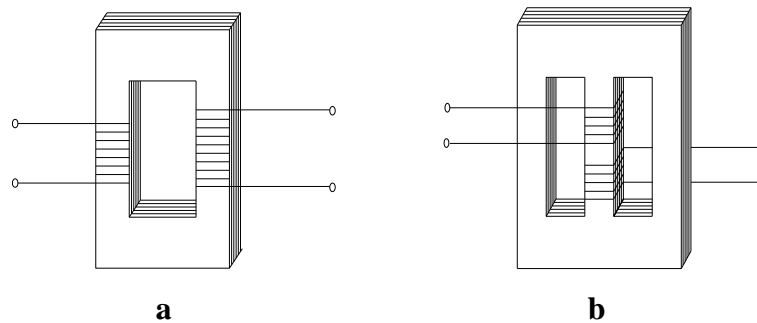
Pada prinsipnya konstruksi transformator dibedakan menjadi dua jenis yaitu sebagai berikut :

1. Konstruksi jenis inti (*core*), lilitan primer membelit salah satu kaki transformator dan lilitan sekunder membelit kaki transformator yanglain.
2. Konstruksi jenis cangkang (*shell*), lilitan primer dan lilitan sekunder membelit kaki yang sama (kaki tengah) pada transformator

Pada gambar 2.1 diperlihatkan konstruksi dari kedua inti, dimana kedua kumparan dililitkan saling tergabung secara magnetis, namun kumparan tersebut tidaktergabung secara elektrik.²

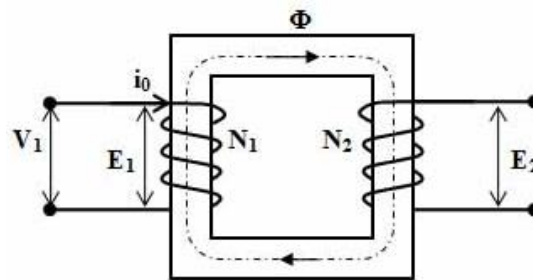
¹Rijono, Yon, Dasar Teknik Tenaga Listrik, Penerbit ANDI Yogyakarta, 1997, Hal 1

²Rijono, Yon, Dasar Teknik Tenaga Listrik, Penerbit ANDI Yogyakarta, 1997, Hal 2



Gambar 2.1 Gambar Konstruksi Tranformator

- (a) Tipe Inti (*coretype*)
- (b) Tipe Cangkang (*shelltype*)



Gambar 2.2 Gambar Diagram dasartransformator

2.3 Prinsip Kerja Transformator

Apabila kumparan primer dihubungkan dengan tegangan (sumber) maka akan mengalir arus bolak-balik I_1 pada kumparan tersebut. Oleh karena kumparan mempunyai inti, arus I_1 menimbulkan fluks magnet yang juga berubah-ubah pada intinya. Akibat adanya fluks magnet yang berubah-ubah, pada kumparan primer akan timbul GGL induksi e_p .

Besarnya GGL induksi pada kumparan primer adalah:

$$e_p = -N_p \frac{d\Phi}{dt} \text{ volt} \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana e_p : GGL induksi pada kumparan primer

N_p : Jumlah lilitan kumparan primer

$d\Phi$: perubahan garis-garis gaya magnet dalam satuan weber

(1 weber = 10^8 maxwell)

dt : perubahan waktu dalam satuan detik.

Fluks magnet yang menginduksikan GGL induksi e_p juga dialami oleh kumparan sekunder karena merupakan fluks bersama (mutual fluks). Dengan demikian fluks tersebut menginduksikan GGL induksi e_s pada kumparan sekunder.

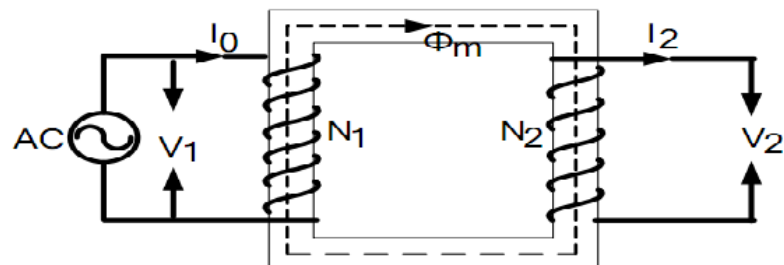
Besarnya GGL induksi pada kumparan sekunder adalah :

$$e_s = -N_s \frac{d\phi}{dt} \text{ volt} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana N_s : Jumlah lilitan kumparan primer.³

2.3.1 Transformator Tanpa Beban

Transformator disebut tanpa beban jika kumparan sekunder dalam keadaan terbuka (Open Circuit) perhatikan gambar 2.1.



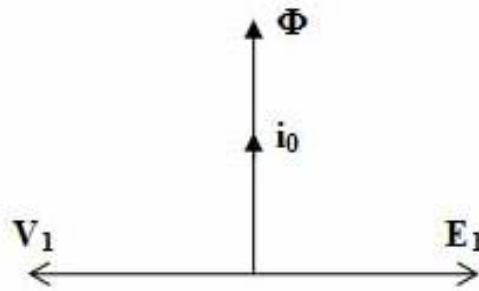
Gambar 2.3 Gambar Transformator Tanpa Beban

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

³ Sumanto, Teori Transformator, Penerbit ANDI OFFSET Yogyakarta, Cetakan Pertama, 1991, Hal 2

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 2.2.



Gambar 2.4 Hubungan antara $I_0\Phi$ dan E_1

Adanya arus $i_0 = I_M \cdot \sin \omega t$ yang mengalir melalui kumparan primer, pada kumparan primer timbul flux magnet yang sephase dengan i_0 dan secara matematis dituliskan :

$$\Phi = \Phi_M \cdot \sin \omega t \dots\dots\dots (2.3)$$

Menurut Faraday, suatu kumparan (X_M) yang mendapat pengaruh flux magnet yang berubah-ubah, maka di ujung-ujung kumparan tersebut akan timbul gaya gerak listrik (e) yang menentang terhadap tegangan sumber, yaitu sebesar :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \dots\dots\dots (2.4)$$

Dengan adanya arus i_0 yang mengalir melalui kumparan primer, pada kumparan primer akan timbul gaya gerak listrik sebesar :

$$\begin{aligned} e_1 &= -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \\ e_1 &= -N_1 \frac{d\Phi_M \cdot \sin \omega t}{dt} \\ &= -N_1 \cdot \Phi_M \cdot \omega \frac{d \cdot \sin \omega t}{d \omega t} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= -E_M \cdot \cos \omega t \\
 &= -E_M \cdot \sin (90^\circ + \omega t) \dots \dots \dots (2.5)
 \end{aligned}$$

Dimana : e_1 = GGL primer

$$\begin{aligned}
 E_1 &= E_{M1} = N_1 \cdot 2\pi \cdot f \cdot \Phi_M \\
 &= \text{GGL Primer maksimum}
 \end{aligned}$$

Besar tegangan efektif dari gaya gerak listrik Primer adalah :

$$\begin{aligned}
 (E_{eff})_1 &= \frac{N_1 \cdot 2\pi f \cdot \Phi_M}{\sqrt{2}} \\
 &= 4,44 \cdot N_1 \cdot f \cdot \Phi_M \dots \dots \dots (2.6)
 \end{aligned}$$

Dimana :

- E_{eff} = satuan dalam volt
- f = satuan dalam Hertz atau Cps
- Φ_M = satuan dalam Weber

Pada rangkaian sekunder, fluks (Φ) bersama tadi juga menimbulkan :

$$\begin{aligned}
 e_2 &= -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \text{ atau} \\
 e_2 &= -E_M \cdot \sin (90^\circ + \omega t) \dots \dots \dots (2.7)
 \end{aligned}$$

Harga efektifnya :

$$\begin{aligned}
 (E_{eff})_2 &= \frac{N_2 \cdot 2\pi f \cdot \Phi_M}{\sqrt{2}} \\
 &= 4,44 \cdot N_2 \cdot f \cdot \Phi_M \dots \dots \dots (2.8)
 \end{aligned}$$

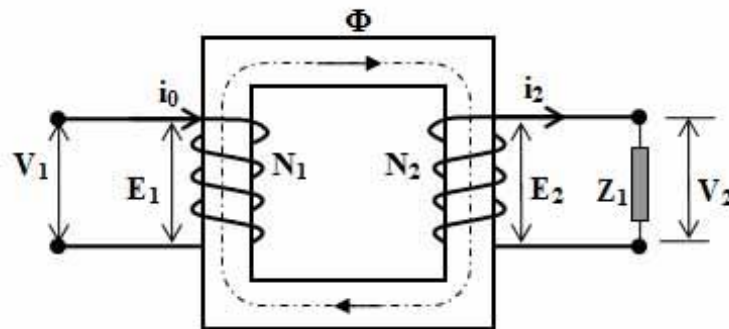
Dengan demikian perbandingan transformasi antara kumparan primer dan sekunder adalah :

$$a = \frac{(E_{eff})_1}{(E_{eff})_2} = \frac{N_1}{N_2} \dots \dots \dots (2.9)$$

Harga $a > 1$ disebut trafo step down, dan $a < 1$ disebut trafo step up.⁴

2.3.2 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 $\theta_2 =$ faktor kerja beban.



Gambar 2.5 Gambar Transformator Berbeban

Arus beban I_2 ini akan menimbulkan gaya gerak magnet (ggm) $N_2 I_2$ yang cenderung menentang fluks (Φ) 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 , hingga keseluruhan arus yang mengalir pada kumparan primer menjadi :

$$I_1 = I_0 + I'_2 \dots \dots \dots (2.10)$$

Bila rugi besi diabaikan I_C diabaikan maka $I_0 = I_M$

$$I_1 = I_M + I'_2 \dots \dots \dots (2.11)$$

Untuk menjaga agar fluks tetap tidak berubah sebesar ggm yang dihasilkan oleh arus pemagnetan I_M saja, berlaku hubungan :

$$N_1 I_M = N_1 I_1 - N_2 I_2$$

$$N_1 I_M = N_1 (I_M + I'_2) - N_2 I_2 \dots \dots \dots (2.12)$$

Hingga $N_1 I'_2 = N_2 I_2$

⁴ Rijono, Yon, Dasar Teknik Tenaga Listrik, Penerbit ANDI Yogyakarta, 1997, Hal 6-13

Karena nilai I_M dianggap kecil maka $I_2 = I_1$ ⁵

Jadi, $N_1 I_1 = N_2 I_2$ atau $I_1 / I_2 = N_2 / N_1$,.....(2.13)

2.4 Komponen Utama Transformator

Komponen utama transformator tenaga terdiri dari bagian-bagiandiantaranya:

inti besi, kumparan transformator, minyak transformator, bushing, tangki konservator, peralatan Bantu pendinginan transformator, tap changer dan alat pernapasan (*dehydrating breather*).

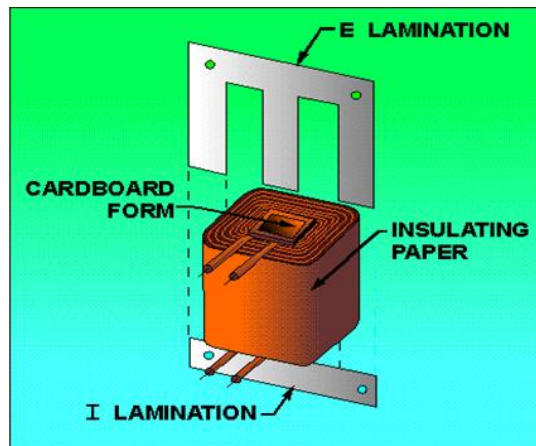
2.4.1 Inti Besi

Inti besi berfungsi untuk mempermudah jalan fluksi magnetik yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Dibuat dari lempengan-lempengan besi tipis yang berisolasi, untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh Eddy Current.

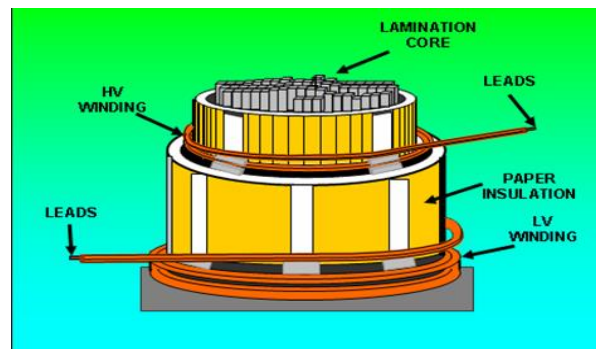
2.4.2 Kumparan Transformator

Kumparan transformator adalah beberapa lilitan kawat berisolasi yang membentuk suatu kumparan atau gulungan. Kumparan tersebut terdiri dari kumparan primer dan kumparan sekunder yang diisolasi baik terhadap inti besi maupun terhadap antar kumparan dengan isolasi padat seperti karton, pertinak dan lain-lain. Kumparan tersebut sebagai alat transformasi tegangan dan arus.

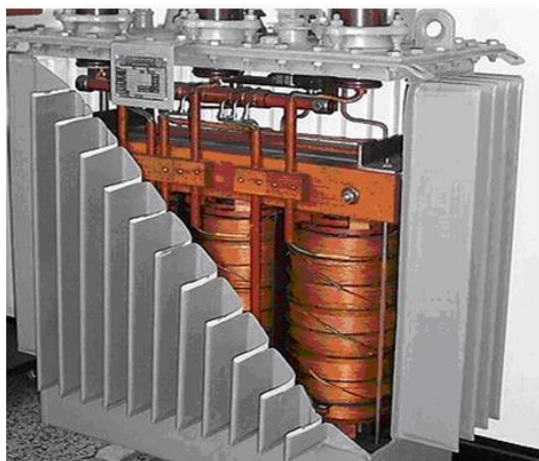
⁵ Zuhail, Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya, Penerbit PT. Gramedia Pustaka Utama, 1995, Hal 46-47



Gambar 2.6 Gambar Konstruksi belitan transformator



Gambar 2.7 Gambar fisik belitan transformator tenaga



Gambar 2.8 Gambar Komponen-komponen internal transformator

2.4.3 Minyak Transformator

Minyak Transformator merupakan salah satu bahan isolasi cair yang dipergunakan sebagai isolasi dan pendingin pada transformator. Sebagai bagian dari bahan isolasi, minyak harus memiliki kemampuan untuk menahan tegangan tembus, sedangkan sebagai pendingin minyak transformator harus mampu meredam panas yang ditimbulkan, sehingga dengan kedua kemampuan ini maka minyak diharapkan akan mampu melindungi transformator dari gangguan.

2.4.4 Bushing

Bushing yaitu sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator merupakan alat penghubung antara kumparan transformator dengan jaringan luar. Bushing sekaligus berfungsi sebagai penyekat/isolator antar konduktor tersebut dengan tangki transformator.



Gambar 2.9 Gambar Bushing Transformator

2.4.5 Tangki Konservator

Tangki konservator berfungsi untuk menampung minyak cadangan dan uap/udara akibat pemanasan trafo karena arus beban. Diantara tangki dan trafo dipasangkan relai buhulz 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.



Gambar 2.10 Gambar Tangki Konvensator

2.4.6 Peralatan Bantu Pendinginan Transformator

Peralatan bantu pendinginan transformator berfungsi untuk menjaga agar transformator bekerja pada suhu rendah. Pada inti besi dan kumparan-kumparan akan timbul panas akibat rugi-rugi tembaga. Maka panas tersebut mengakibatkan kenaikan suhu yang berlebihan, ini akan merusak isolasi, maka untuk mengurangi kenaikan suhu yang berlebihan tersebut transformator perlu dilengkapi dengan alat atau sistem pendingin untuk menyalurkan panas keluar transformator.

Secara alamiah media pendingin (minyak isolasi) mengalir karena perbedaan suhu tangki minyak dan sirip-sirip transformator (Radiator). Untuk mempercepat pendinginan transformator dilengkapi dengan kipas yang dipasang di radiator transformator dan pompa minyak agar sirkulasi minyak lebih cepat dan pendinginan lebih optimal.⁶

⁶ M. Solikhudin. 2010. Studi Gangguan. Penerbit Universitas Indonesia, Jakarta, 2010 Hal 4-6



Gambar 2.11 Gambar Pendingin Transformator

Tabel 2.1 Tabel Klasifikasi Pendinginan Transformator

CARA PENDINGINAN	JENIS	SINGKATAN
Pendinginan Alam	Air Natural Colling (Pendinginan dengan udara biasa)	AN
	Oil-immersed Natural Colling (Pendinginan dengan direndam kedalam minyak)	ON
	Oil natural Air natural (pendinginan dengan udara dan minyak)	ONAN
	Oil-immersed forced-oil circulation (pendinginan dengan direndam kedalam minyak yang dialirkan)	OFN

Pendinginan Buatan (Udara)	Oil-immersed Forced-Oil Corculation with Air- Blast Colling (Pendinginan dengan direndam kedalam minyak yang dialirkan dengan semburanudara)	OFB
	Oil-immersed Air-blast Colling/Oil Naturan Air Force (Pendinginan dengan direndam kedalam minyak dan dihembuskanudara)	OB/ONAF
	Air-blast Colling (Pendinginan dengan udara yang dihembuskan)	AB
Pendinginan buatan(Air)	Oil-immersed Water Colling (Pendingin dengan direndam minyak dan juga dibantu denganair) Oil-immersed Forced-oil Circulation with Water Colling (Pendingin dengan direndam kedalam minyak yang dialirkan dan juga dibantu dengan pendinginan air)	OFW

2.4.7 Tap Changer

Tap changer berfungsi untuk menjaga tegangan keluaran yang diinginkan dengan input tegangan yang berubah-ubah. Kualitas operasi tenaga listrik jika tegangan nominalnya sesuai ketentuan, tapi pada saat operasi dapat saja terjadi penurunan tegangan sehingga kualitasnya menurun, untuk itu perlu alat pengatur tegangan agar tegangan selalu pada kondisi terbaik, konstan dan berkelanjutan.

Ditinjau dari cara pengoperasiannya, tap changer terdiri dari dua tipe yaitu on-load yang bekerja secara otomatis jika merasakan tegangan kurang/lebih dan off-load yang dapat dipindahkannya jika tidak berbeban/bertegangan.

2.4.8 Alat Pernapasan (*Dehydrating Breather*)

Alat pernapasan (*Dehydrating Breather*) Sebagai tempat penampungan pemuaian minyak isolasi akibat panas yang timbul, maka minyak ditampung pada tangki yang sering disebut sebagai konservator. Pada konservator ini permukaan

minyak diusahakan tidak boleh bersinggungan dengan udara, karena kelembaban udara yang mengandung uap air akan mengkontaminasi minyak walaupun proses pengkontaminasinya berlangsung cukup lama. Untuk mengatasi hal tersebut, udara

yang masuk ke dalam tangki konservator pada saat minyak menjadi dingin memerlukan suatu media penghisap kelembaban, yang digunakan biasanya adalah silica gel.

Kebalikan jika trafo panas maka pada saat menyusut maka akan menghisap udara dari luar masuk ke dalam tangki dan untuk menghindari terkontaminasi oleh kelembaban udara maka diperlukan suatu media penghisap kelembaban yang digunakan biasanya adalah silicagel, yang secara khusus dirancang untuk maksud tersebut diatas.⁷

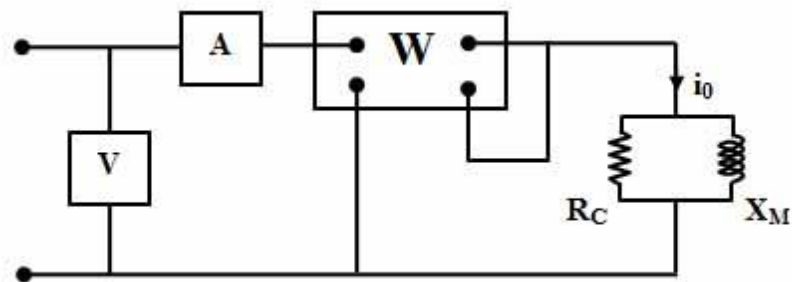
2.5 Menentukan Parameter Transformator

Parameter transformator yang terdapat pada model rangkaian (rangkaiannya ekuivalen) R_c , X_M , R_{ek} , dan X_{ek} , dapat ditentukan besarnya dengan dua macam pengukuran (test) yaitu pengukuran beban nol dan pengukuran hubungan singkat.

2.5.1 Pengukuran Beban Nol

Dalam keadaan tanpa beban bila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan V_1 , seperti telah diterangkan terdahulu maka hanya I_0 yang mengalir.

⁷ M. Solikhudin. 2010. Studi Gangguan. Penerbit Universitas Indonesia, Jakarta, 2010 Hal 7



Gambar 2.12 Gambar Parameter pengukuran beban nol

Dari pengukuran daya yang masuk (P_1), arus I_0 dan tegangan V_1 akan diperoleh harga :

$$R_c = V_1^2 / P_1$$

$$Z_0 = V_1 / I_0 = (jX_M R_c) / (R_c + jX_M) \dots\dots\dots(2.14)$$

Dimana :

Z_0 = impedansi inti

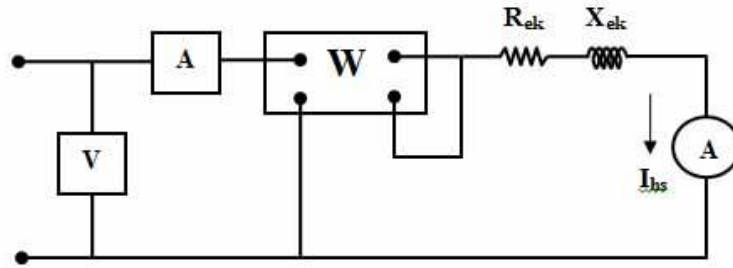
X_M = reaktansi pemagnet

I_0 = Arus tanpa beban,

R_c = hambatan inti

2.5.2 Pengukuran Hubungan Singkat

Hubungan singkat berarti impedansi beban Z_L diperkecil menjadi nol, sehingga hanya impedansi $Z_{ek} = R_{ek} + jX_{ek}$ yang membatasi arus. Karena harga R_{ek} dan X_{ek} ini relative kecil, harus dijaga agar tegangan yang masuk (V_{hs}) cukup kecil sehingga arus yang dihasilkan tidak melebihi arus nominal. Harga I_0 akan relative kecil bila dibandingkan dengan arus nominal, sehingga pada pengukuran ini dapat diabaikan.



Gambar 2.13 Gambar Pengukuran Trafo Hubung Singkat

Dengan mengukur tegangan V_{hs} , arus H_{hs} , dan daya Ph_s , akan dapat dihitung parameter:

$$R_{ek} = P_{hs}/(H_{hs})^2$$

$$Z_{ek} = V_{hs}/H_{hs} = R_{ek} + jX_{ek}$$

$$X_{ek} = \sqrt{(Z_{ek}^2 - R_{ek}^2)} \dots\dots\dots(2.15)$$

Dimana :

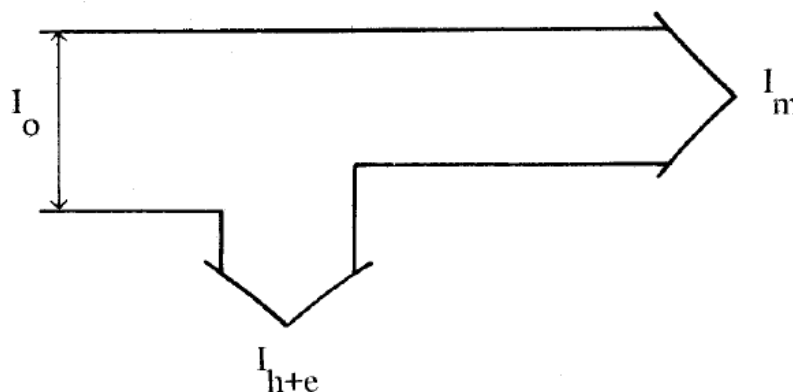
R_{ek} = hambatan ekivalen

Z_{ek} = impedansi ekivalen

X_{ek} = reaktansi ekivalen.⁸

2.6 Rangkaian Pengganti Transformator

Pada tes hubungan terbuka, telah dijelaskan bahwa dengan adanya tegangan primer U_1 , maka akan terjadi I_0 yang dapat diuraikan menjadi I_m dan I_{h+e}



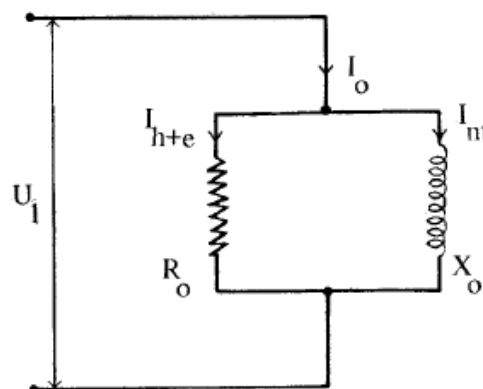
Gambar 2.14 Gambar Bagian I_m dan I_{h+e}

⁸ Zuhail, Dasar Teknik Tenaga Listrik, Penerbit ITB, 1991, Hal 26-27

I_m : harga arus yang efektif dalam pembentukan magnet.

I_{h+e} : harga arus yang membentuk rugi-rugi besi dalam pembentukan magnet.

Dari gambar 2.6 di atas, I_m dan I_{h+e} dapat digambarkan sebagai berikut :

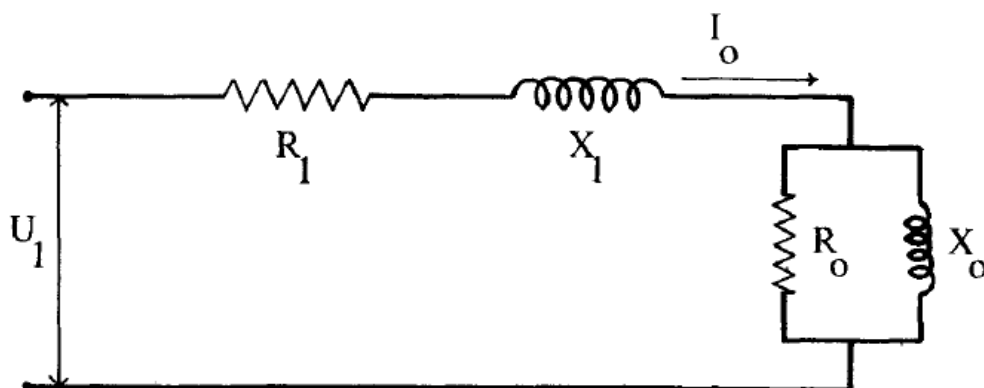


Gambar 2.15 Gambar Rangkaian R_0 dan X_0

Pada transformator tidak berbeban pada kumparan primer akan mengalir arus sebesar I_0 .

$$U_1 = I_0 (R_0 + jX_0) + I_0 (R_1 + jX_1) \dots\dots\dots(2.16)$$

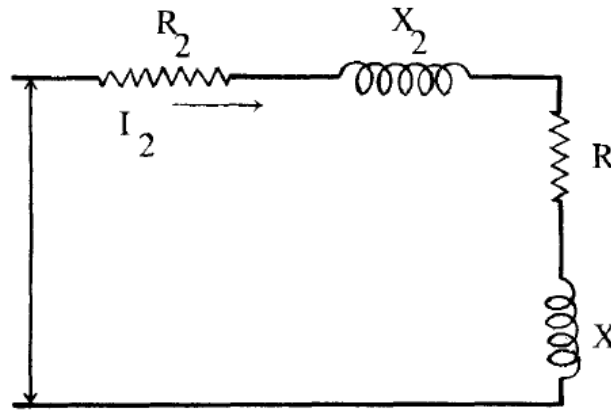
Rangkaian primer dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 2.16 Gambar Rangkaian Pengganti Primer

Jika kumparan sekunder dihubungkan dengan beban Z, dengan $Z = (R + jX)$, maka pada kumparan sekunder mengalir arus I_2 yang sumbernya adalah E_s

$$E_s = I_2 [(R_2 + R) + j(X_2 + X)] \dots\dots\dots(2.17)$$



Gambar 2.17 Gambar Rangkaian Pengganti Sekunder

Rangkaian ekivalen sekunder di atas dapat disambungkan dengan rangkaian primer bila harga $E_s = E_p$

Untuk menjadikan $E_s = E_p$, maka harga E_s dikalikan a atau E_p dibagi dengan a tergantung dari harga tersebut dibawa ke primer atau ke sekunder.

Apabila harga-harga GGL induksi dibawa ke sekunder E_p' menjadi E_p/a . Akibatnya seluru harga kumparan primer berubah, dan berlaku rumus-rumus :

$$E_p' = E_s = E_p/a \dots\dots\dots(2.18)$$

$$I_1' = a \cdot I_1 \dots\dots\dots(2.19)$$

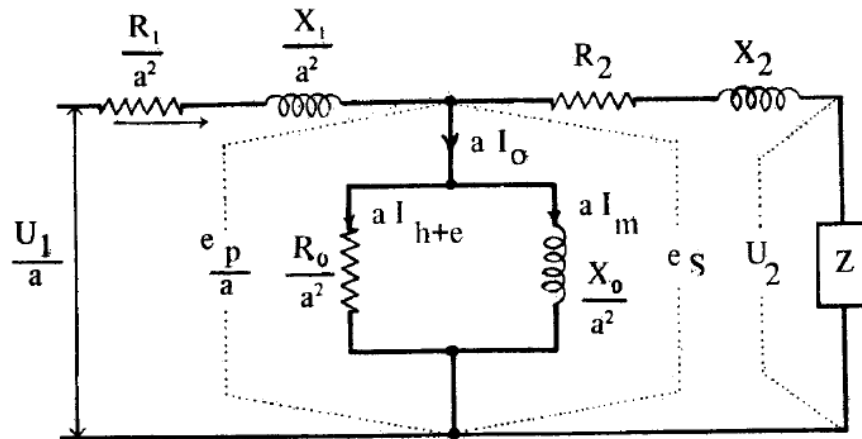
$$U_1' = U_1/a \dots\dots\dots(2.20)$$

$$R_1' = R_1/a \dots\dots\dots(2.21)$$

$$X_1' = X_1/a \dots\dots\dots(2.22)$$

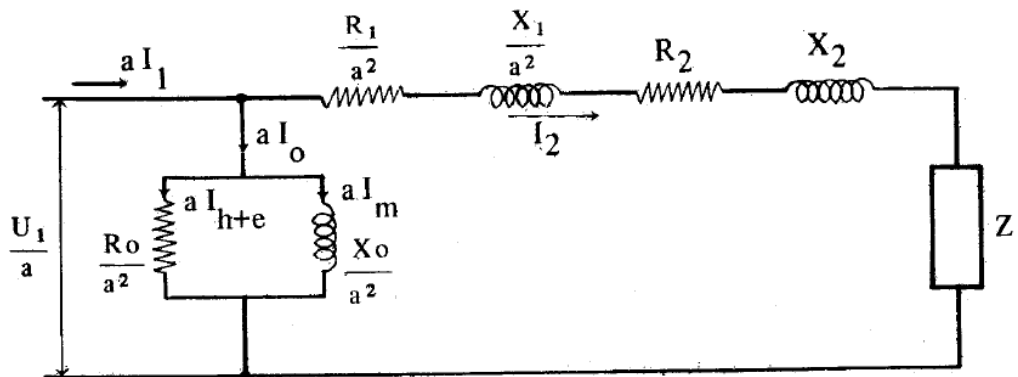
$$R_0' = R_0/a^2 \dots\dots\dots(2.23)$$

$$X_0' = X_0/a^2 \dots\dots\dots(2.24)$$



Gambar 2.18 Gambar Rangkaian pengganti primer dibawa ke sekunder

Oleh karena besarnya arus tanpa beban sedikit sekali pengaruhnya terhadap drop tegangan maka digambarkan sebagai berikut :



Gambar 2.19 Gambar Rangkaian pengganti pendekatan primer ke sekunder

Apabila harga sekunder dipindahkan ke primer, berlaku rumus-rumus

$$E'_s = aE_s \dots \dots \dots (2.25)$$

$$I'_1 = I_2/a \dots \dots \dots (2.26)$$

$$U'_2 = aU_2 \dots \dots \dots (2.27)$$

$$R'_2 = a^2R_2 \dots \dots \dots (2.28)$$

$$X'_2 = a^2X_2 \dots \dots \dots (2.29)$$

$$Z' = a^2Z \dots \dots \dots (2.30)$$

Dari data-data pemindahan diatas, kita bisa menggambarkan rangkaian pengganti dan rangkaian pendekatan sekunder dibawa ke primer.⁹

2.7 Daya Aktif, Daya Semu, dan Daya Reaktif

2.7.1 Daya Aktif

Daya aktif atau daya nyata dirumuskan dengan $VI \cos \theta$ dengan simbol P dalam satuan watt (W), kilo watt (KW), mega watt (MW). Jadi,

$$P = \sqrt{3} \cdot VI \cos \theta \dots \dots \dots (2.31)$$

$$P_1 = P_2 \rightarrow V_1 \times I_1 = V_2 \times I_2 \dots \dots \dots (2.32)$$

2.7.2 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,

$$S = \sqrt{3} \cdot VI \dots \dots \dots (2.33)$$

2.7.3 Daya Reaktif

Daya reaktif atau daya khayal dirumuskan dengan $S \sin \theta$ atau $VI \sin \theta$ dengan simbol Q , dalam satuan volt ampere reaktif (VAR), kilo volt ampere reaktif (KVAR), mega volt ampere reaktif (MVAR). Jadi,

$$Q = \sqrt{3} \cdot S \sin \theta = \sqrt{3} \cdot VI \sin \theta \dots \dots \dots (2.34)^{10}$$

2.8 Rugi-rugi Transformator

Rugi – rugi transformator terbagi menjadi dua antara lain sebagai berikut:

2.8.1 Rugi Variabel

Rugi yang disebabkan arus beban mengalir pada kawat tembaga $P_{CU} = I^2R$.

⁹Sumanto, Teori Transformator, Penerbit ANDI OFFSET Yogyakarta, Cetakan Pertama, 1991, Hal 9-12

¹⁰Cekmas Cekdin dan Taufik Barlian, Rangkaian Listrik, Penerbit ANDI YOGYAKARTA, 2013, Hal 74

Karena arus beban berubah-ubah, rugi tembaga juga tidak tetap tergantung pada beban.

$$P_{cu} = I_1^2 R_1 \dots\dots\dots (2.35)$$

$$P_{cu} = I_2^2 R_2 \dots\dots\dots (2.36)$$

Dengan demikian rugi tembaga total :

$$\begin{aligned} P_{cu} &= P_{cu1} + P_{cu2} \\ &= I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \dots\dots\dots (2.37) \end{aligned}$$

Karena $I_2 = a I_1$, maka persamaan dapat juga ditulis dengan

$$\begin{aligned} P_{cu} &= I_1^2 R_1 + (a I_1)^2 R_2 \\ &= I_1^2 (R_1 + a^2 R_2) \\ &= I_1^2 R_{ek1} \end{aligned}$$

atau dapat ditulis

$$P_{cu} = I_2^2 R_{ek2} \dots\dots\dots (2.38)$$

Jumlah total rugi-rugi pada transformator adalah:

$$P_{rugi\ total} = \text{Rugi-rugi Cu} + \text{Rugi inti} \dots\dots\dots (2.39)$$

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

$$P_{t2} = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2 \times P_{t1} \dots\dots\dots (2.40)$$

Keterangan:

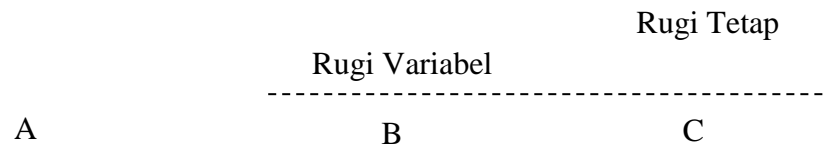
P_{t2} = Rugi-rugi tembaga pada saat pembebanan tertentu.

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

S_2 = Beban yang dioperasikan

S_1 = Nilai pengenal





Gambar 2.20 Gambar Rugi-rugi Transformator

$$\eta_{listrik} = \frac{C}{B} \times 100\% \dots\dots\dots (2.41)$$

$$\eta_{mekanik} = \frac{B}{A} \times 100\% \dots\dots\dots (2.42)$$

$$\eta_{Trafo} = \eta_{listrik} \times \eta_{mekanik} = \frac{C}{B} \times \frac{B}{A} = \frac{C}{A} = \frac{P_o}{P_{in}} \dots\dots\dots (2.43)$$

2.8.2 Rugi Tetap

Rugi tetap terdiri atas :

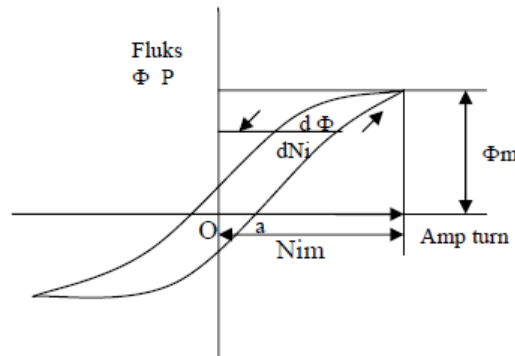
a. Rugi histerisis, yaitu rugi yang disebabkan fluks bolak-balik pada inti besi.

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{maks} \text{ watt} \dots\dots\dots (2.44)$$

Dimana :

K_h = konstanta

B_{maks} = fluks maksimum (weber)



Gambar 2.21 Gambar Lingkaran Histerisis

b. Rugi ‘Arus Eddy’, yaitu rugi yang disebabkan arus pusar pada besi inti.¹¹

$$P_e = K_e^2 \cdot f^2 \cdot B_{maks} \dots\dots\dots (2.45)$$

$$\text{Jadi, rugi besi (rugi inti) } P_i = P_h + P_e \dots\dots\dots (2.46)$$

¹¹ Zuhail, Dasar Tenaga Listrik, Penerbit ITB, 1991, Hal 34

2.9 Faktor Umur Transformator

Berikut faktor yang mempengaruhi umur transformator adalah :¹²

2.9.1 Faktor Beban

Menentukan faktor pembebanan dengan cara sebagai berikut :

$$K = \frac{Pr}{Pp} \dots\dots\dots (2.47)$$

Keterangan: Pp = Puncakbeban

Pr = Beban Rata-rata

K = Faktor Beban

2.9.2 Faktor Zbasedan Zreal

Karena nilai resistansi transformator masih dinyatakan dalam satuan persen, untuk mencari rugi-rugi tembaga maka dicari nilai resistansi sesungguhnya, dengan nilai resistansi transformator ditentukan dengan %. Berdasarkan penentuan nilai restitansi sebagai berikut :

$$Z_{\text{dasar}} = \frac{(kv)^2}{MVA} \dots\dots\dots (2.48)$$

$$Z_{\text{sesungguhnya}} = Z_{\text{pu}} \times Z_{\text{dasar}} \dots\dots\dots (2.49)$$

2.10 Menghitung Perbandingan Rugi

Untuk Menghitung Perbandingan Rugi diperlukan Rumus sebagai berikut, dan untuk Rugi Beban Nol (No Load Losses) terdapat di Nameplate Trafo.

$$d = \frac{\text{Rugi tembaga daya pengenalan}}{\text{Rugi beban nol}} \dots\dots\dots (2.50)$$

2.11 Faktor Ultimate Top Oil

Untuk menentukan Faktor Ultimate Top Oil dapat ditentukan dengan rumus sebagai berikut :¹³

¹²Pujiono, P., Pambudi. P., & Mujiman, M. 2019. ANALISIS PEMBEBANAN TERHADAP USIA PAKAI TRANSFORMATOR TENAGA DI GARDU INDUK 150 KV. *jurnal elektrikal*, 3(1), 11-20. Retrieved from <https://ejournal.akprind.ac.id/index.php/elektrikal/article/view/2477>

¹³ IEEE Std C57.91-2011 IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators Hal 15

$$\Delta\theta_{ou} = \Delta\theta_{oi} \left[\frac{1+dK^2}{1+d} \right] \dots\dots\dots (2.51)$$

Keterangan $\Delta\theta_{ou}$ = *Ultimate top oil*

$\Delta\theta_{oi}$ = ON = °C & OF = °C

K = ONAF & ONAN = 0,9

= OFAF & OFWF

d = Perbandingan rugi transformator

2.12 Kenaikan *Top Oil Temperature*

Suhu minyak bagian atas (*top oil temperature*) adalah suhu yang ada pada bagian atas kumparan. Suhu minyak bagian atas pada keadaan beban penuh harus ditentukan oleh pabrik. Jika kekurangan data nilai suhu minyak bagian atas maka nilainya harus diasumsikan, pada keadaan beban penuh, suhu *hotspot* tertinggi untuk *gradient* suhu minyak bagian atas adalah 110°C, dimana ini adalah suhu minyak maksimum yang diizinkan untuk perkiraan masa operasional normal. Persamaan untuk suhu minyak bagian atas (*top oil temperature*) adalah :¹⁴

$$\Delta\theta_{on} = \Delta\theta_{(n-1)} + (\Delta\theta_{ou} - \Delta\theta_{(n-1)}) \left(1 + e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \dots\dots\dots (2.52)$$

Keterangan $\Delta\theta_{on}$ = Temperatur *top oil* °C

$\Delta\theta_{(n-1)}$ = Temperatur kenaikan awal minyak °C

t = Waktu dalam jam

τ = Waktu minyak dalam jam

2.13 Kenaikan *Hotspot Temperature*

Hotspot temperature dengan sirkulasi minyak alami. Persamaan untuk temperature hotspot dengan sirkulasi alami sebagai berikut :¹⁵

$$\Delta\theta_{cr}(\text{alami}) = \Delta\theta_{br} + 1,1\Delta\theta_{wo} \dots\dots\dots (2.53)$$

¹⁴INTERNATIONAL STANDARD IEC 60354 Loading guide for oil-immersed power transformers Second edition 1991-09

¹⁵INTERNATIONAL STANDARD IEC 60354 Loading guide for oil-immersed power transformers Second edition 1991-09 Hal 33

Temperatur *hotspot* dengan sirkulasi minyak paksaan bisa diketahui standart IEC 76 kenaikan temperatur *hotspot* sirkulasi minyak paksaan $\Delta\theta_b$ berkurang menjadi °C.

$$\Delta\theta_{cr}(\text{paksaan}) = \Delta\theta_b + (\theta_{cr}(\text{alami}) - \theta_b) \dots\dots\dots (2.54)$$

Suhu sekitar sangat berpengaruh untuk menentukan nilai dari temperatur *hotspot*.

Penulis mengasumsikan suhu sekitar standard IEC °C, standard IEEE °C dan suhu sebenarnya di indonesia memiliki suhu rata-rata siang hari °C dan malam hari °C.

$$\theta_{hn} = \theta_a + \Delta\theta_{on} + \Delta\theta_{td} \dots\dots\dots (2.55)$$

Keterangan: θ_{hn} = temperatur *hotspot*

θ_a = suhu sekitar

$\Delta\theta_{on}$ = temperatur *topoil*

$\Delta\theta_{td}$ = Selisih antara temperature *hot spot* dan *topoil*

2.14 Hotspot Temperature dan Top Oil

Untuk menentukan *Hotspot Temperature* dan *Top Oil* dapat ditentukan dengan

rumus sebagai berikut:¹⁶

$$\Delta\theta_{td} = (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_b) K^{2y} \dots\dots\dots (2.56)$$

Keterangan: $\Delta\theta_{td}$ = Selisih antara temperature *hot spot* dan *topoil*

$\Delta\theta_{cr}$ = Temperatur *hotspot* dengan sirkulasi minyak paksaan

$\Delta\theta_b$ = Standart IEC 76 (°C) kenaikan temperatur *top oil*

K = Faktor beban

y = kontanta (ONAN dan ONAF)

(OFAF dan OFWF)

2.15 Perhitungan Laju Penuaan Thermal Relatif

Perhitungan Laju Penuaan Thermal Relatif dapat menggunakan rumus sebagai berikut¹⁷

$$V = 2^{(\theta_c - \theta_{cr})/6} \dots\dots\dots (2.57)$$

¹⁶INTERNATIONAL STANDARD IEC 60354 Loading guide for oil-immersed power transformers Second edition 1991-09 Hal 35

¹⁷INTERNATIONAL STANDARD IEC 60354 Loading guide for oil-immersed power transformers Second edition 1991-09 Hal 40

Dimana

V = laju penuaan thermal relatif

θ_{cr} = standard IEC (98 °C)

2.16 Perhitungan Pengurangan Umur Transformator

Perhitungan Pengurangan Umur Transformator dapat menggunakan rumus sebagai berikut

$$L = \frac{h}{3T} \{V + \sum 4V + \sum 2V + V\} \dots \dots \dots (2.58)$$

2.17 Perhitungan Sisa Umur Transformator

Perhitungan Sisa Umur Transformator Daya dapat menggunakan rumus sebagai berikut¹⁸

$$n = \frac{\text{umur dasar (tahun)} - \text{lama transformator sudah dipakai (tahun)}}{\text{susut umur transformator (p.u)}} \dots \dots \dots (2.59)$$

¹⁸INTERNATIONAL STANDARD IEC 60354 Loading guide for oil-immersed power transformers Second edition 1991-09 Hal 41

