



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian 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. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika.

Dalam bidang elektronika, transformator digunakan antara lain untuk :

1. Gandengan impedansi antara sumber dan beban.
2. Untuk menghambat arus searah sambil tetap melakukan arus bolak balik antara rangkaian.
3. Menaikkan atau menurunkan tegangan AC

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

Berdasarkan frekuensi kerja, transformator dapat dikelompokkan menjadi :

1. Trafo frekuensi daya (50 – 60) Hz
2. Trafo frekuensi pendengaran (20 Hz – 20 KHz)
3. Trafo Middle Frekuensi (455 KHz)
4. Trafo Radio Frekuensi (>455 KHz)⁷

⁷ PT PLN (Persero). 2009. *Buku Petunjuk Batasan Operasi dan Pemeliharaan Peralatan Penyaluran Tenaga Listrik (Transformator Tenaga)*. Jakarta : PT PLN (Persero)

2.2 Jenis – Jenis Transformator

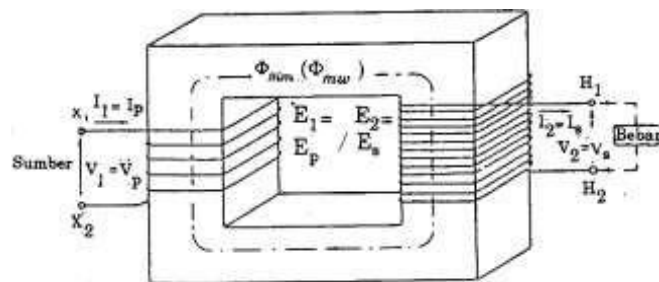
2.2.1 Transformator Berdasarkan Pasangan Kumparan

Transformator dapat dibedakan berdasarkan pasangan kumparan atau lilitannya menjadi:

- Transformator satu belitan
- Transformator dua belitan
- Transformator tiga belitan

Transformator satu belitan adalah lilitan primer merupakan bagian dari lilitan sekunder atau sebaliknya. Trafo satu belitan ini lebih dikenal sebagai “*auto trafo*” atau trafo hemat”. Trafo dua belitan adalah trafo yang mempunyai dua belitan yaitu sisi tegangan tinggi dan sisi tegangan rendah, dimana kumparan sekunder dan primer berdiri sendiri. Trafo tiga belitan adalah trafo yang mempunyai belitan primer, sekunder dan tersier, masing masing berdiri sendiri pada tegangan yang berbeda.⁵

Sebuah transformator, seperti terlihat pada Gambar 2.1 , pada dasarnya terdiri atas dua buah lilitan, masing – masing disebut sebagai lilitan primer dan sekunder terisolasi satu sama lainnya dililitkan pada inti yang sama umumnya terbuat dari baja atau besi.



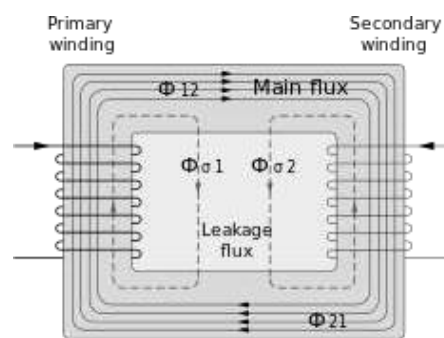
Gambar 2.1 Rangkaian Transformator

Sumber tegangan bolak-balik yang disuplaikan pada belitan primer akan menimbulkan aliran arus bolak – balik pada belitan primer ini. Aliran

⁵ Sulasno. 2009. “Teknik Konversi Energi Listrik dan Sistem Pengaturan”. Yogyakarta, Graha Ilmu.

arus bolak-balik ini akan menghasilkan fluks magnetik bolak-balik di sepanjang inti transformator.

Fluks magnetik ini akan menginduksi ggl pada belitan sekunder transformator sesuai dengan hukum Faraday mengatakan bahwa jika sebuah kawat penghantar dipotong oleh medan magnetik yang berubah terhadap waktu maka akan dibangkitkan ggl induksi pada kawat penghantar tersebut. Oleh karena kedua belitan dilingkupi oleh fluks magnetik yang sama maka besarnya ggl per satuan lilitan untuk kedua belitan adalah sama. Dengan demikian, ggl pada kedua belitan akan sebanding dengan jumlah dari masing-masing lilitannya.



Gambar 2.2 Fluks pada Transformator^[3]

2.2.2 Transformator Berdasarkan Fungsi

Menurut fungsinya transformator dibagi atas:

a) Transformator Daya

Transformator daya adalah trafo yang digunakan untuk pemasok daya. Transformator daya mempunyai dua fungsi yaitu menaikkan tegangan listrik (*step-up*) dan menurunkan tegangan listrik (*step-down*). Trafo daya tidak dapat digunakan langsung untuk menyuplai beban, karena sisi tegangan rendahnya masih lebih tinggi dari tegangan beban, sedangkan sisi tegangan tingginya merupakan tegangan transmisi. Trafo berfungsi sebagai *step-up* pada sistem dimana tegangan keluaran lebih tinggi dari pada tegangan masukan (misalnya pada pengiriman/penyaluran daya) dan sebaliknya trafo berfungsi sebagai *step-down* jika tegangan keluaran lebih rendah daripada tegangan masukan (misalnya menerima/mengeluarkan daya).

b) Transformator Distribusi

Transformator distribusi pada dasarnya sama dengan transformator daya, bedanya adalah tegangan rendah pada tafo daya bila dibandingkan dengan tegangan tinggi trafo distribusi masih lebih tinggi. Kedua tegangan pada transformator distribusi merupakan tegangan distribusi yaitu untuk distribusi tegangan menengah (TM) dan distribusi tegangan rendah (TR). Trafo distribusi digunakan mendistribusikan energi listrik langsung ke pelanggan.

Trafo Distribusi yang umum digunakan adalah trafo *step down* 20/0,4 kV, tegangan fasa-fasa sistem JTR adalah 380 Volt, karena terjadi *drop* tegangan maka tegangan rak TR dibuat diatas 380 Volt agar tegangan pada ujung beban menjadi 380 Volt.

c) Transformator Ukur

Pada umumnya trafo ini di gunakan untuk mengukur arus (I) dan tegangan (V). Trafo ini trafo ini dibuat khusus untuk mengukur arus dan tegangan yang tidak mungkin bisa diukur langsung oleh *amperemeter* atau *voltmeter*.

d) Transformator Elektronik

Tranformator ini prinsipnya sama seperti transformator daya, tapi kapasitas daya reaktif sangat kecil, yaitu kurang 300 VA yang digunakan untuk keperluan pada rangkaian elektronik.⁵

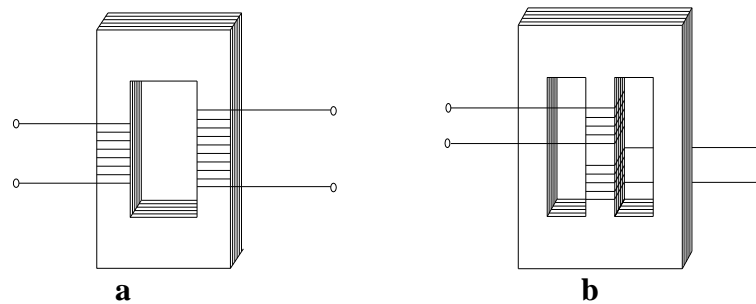
2.3 Bentuk dan Konstruksi Bagian – Bagian Transformator Daya

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

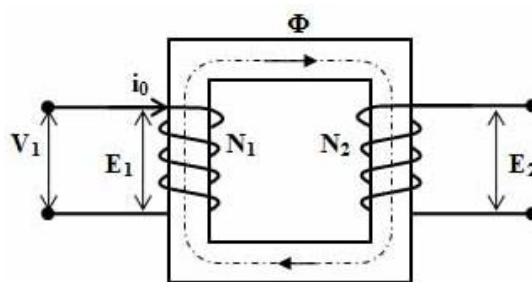
1. Konstruksi jenis inti (*core*), lilitan primer membelit salah satu kaki transformator dan lilitan sekunder membelit kaki transformator yang lain.
2. Konstruksi jenis cangkang (*shell*), lilitan primer dan lilitan sekunder membelit kaki yang sama (kaki tengah) pada transformator

⁵ Sulasno, 2009, "Teknik Konversi Energi Listrik dan Sistem Pengaturan", Yogyakarta, Graha Ilmu.

Pada gambar 2.3 diperlihatkan konstruksi dari kedua inti, dimana kedua kumparan dililitkan saling tergabung secara magnetis, namun kumparan tersebut tidak tergabung secara elektrik.⁶



Gambar 2.3 Konstruksi Tranformator (a) Tipe Inti (*core type*) dan (b)Tipe Cangkang (*shell type*)



Gambar 2.4 Diagram Dasar Transformator

2.4 Komponen Utama Transformator Daya⁷

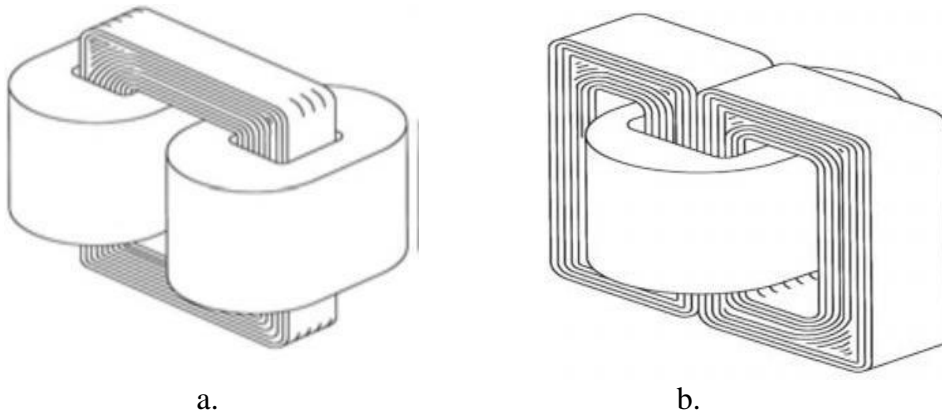
Komponen utama transformator tenaga terdiri dari bagian-bagian diantaranya: inti besi, kumparan transformator, minyak transformator, *bushing*, tangki konservator, peralatana Bantu pendinginan transformator, *tap changer* dan alat pernapasan (*dehydrating breather*).

⁶ PT.PLN (persero) P3B. 2003. Panduan pemeliharaan trafo. Jakarta : PT. PLN (Persero)

⁷ PT PLN (Persero). 2009. Buku Petunjuk Batasan Operasi dan Pemeliharaan Peralatan Penyaluran Tenaga Listrik (Transformator Tenaga), PT PLN: Jakarta.

2.4.1 Inti Besi

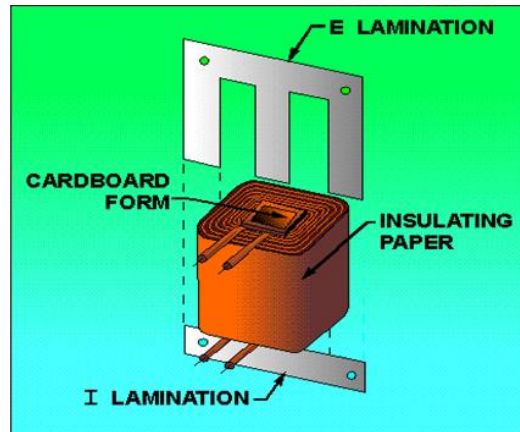
Inti besi berfungsi untuk mempermudah jalan fluksi,magnetik yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Dibuat dari lempengan-lempengan besi tipis yang berisolasi, untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh *Eddy Current*.



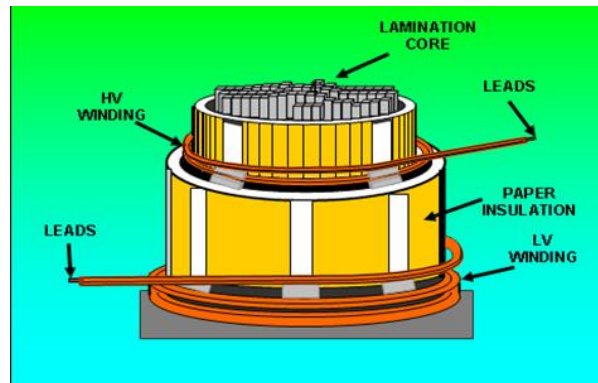
Gambar 2.5 Bentuk Inti Transformator (a) Tipe Inti dan (b) Tipe Cangkang

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.



Gambar 2.6 Konstruksi Belitan Transformator



Gambar 2.7 Gambaran Fisik Belitan Transformator Tenaga



Gambar 2.8 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 antara konduktor tersebut dengan tangki transformator.



Gambar 2.9 *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 *bucholzt* yang akan meyerap 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 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.⁴

⁴ M. Solikhudin. 2010. Studi Gangguan. Penerbit Universitas Indonesia. Jakarta. 2010



Gambar 2.11 Pendingin Transformator

Tabel 2.1 Klasifikasi Pendinginan Transformator

CARA PENDINGINAN	JENIS	SINGKATAN
Pendinginan Alam	<i>Air Natural Colling</i> (Pendinginan dengan udara biasa)	AN
	<i>Oil-immersed Natural Colling</i> (Pendinginan dengan direndam kedalam minyak)	ON
	<i>Oil natural Air natural</i> (pendinginan dengan udara dan minyak)	ONAN
	<i>Oil-immersed forced-oil circulation</i> (pendinginan dengan direndam kedalam minyak yang dialirkan)	OFN
Pendinginan Buatan (Udara)	<i>Oil-immersed Forced-Oil Corculation with Air-Blast Colling</i> (Pendinginan dengan direndam kedalam minyak yang dialirkan dengan semburan)	OFB
	<i>Oil-immersed Air-blast Colling/Oil Naturan Air Force</i> (Pendinginan dengan direndam kedalam minyak dan dihembuskan udara)	OB/ONAF
	<i>Air-blast Colling</i> (Pendinginan dengan udara yang dihembuskan)	AB
Pendinginan buatan (Air)	<i>Oil-immersed Water Colling</i> (Pendingin dengan direndam minyak dan juga dibantu dengan 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 dipindah tap hanya jika trafo tidak berbeban/bertegangan.

2.4.8 Alat Pernapasan (*Dehydrating Breather*)⁴

Alat pernapasan (*Dehydrating Breather*) Sebagai tempat penampungan pemuaiian 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 kedalam 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 kedalam tangki dan untuk menghindari terkontaminasi oleh kelembaban udara maka diperlukan suatu media penghisap kelembaban yang digunakan biasanya adalah *silica gel*, yang secara khusus dirancang untuk maksud tersebut diatas.

⁴ M. Solikhudin. 2010. Studi Gangguan. Penerbit Universitas Indonesia. Jakarta. 2010

2.5 Prinsip Kerja Transformator Daya⁵

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 :

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

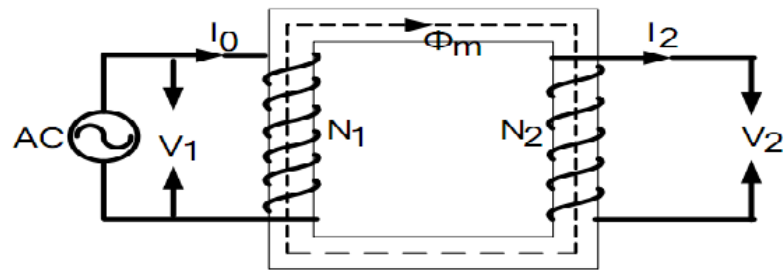
Dimana N_s : Jumlah lilitan kumparan primer.

2.5.1 Transformator Tanpa Beban⁸

Transformator disebut tanpa beban jika kumparan sekunder dalam keadaan terbuka (*Open Circuit*) perhatikan gambar 2.12.

⁵ Sulasno. 2009. "Teknik Konversi Energi Listrik dan Sistem Pengaturan". Yogyakarta. Graha Ilmu.

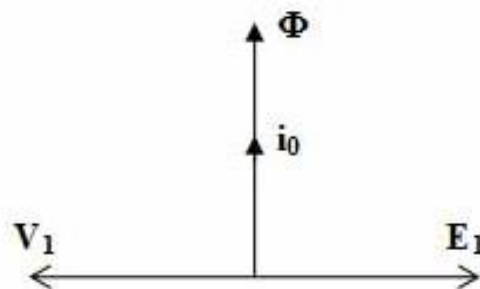
⁸ Zuhail. Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya. Penerbit PT. Gramedia Pustaka Utama.



Gambar 2.12 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 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 2.13.



Gambar 2.13 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 :

$$\begin{aligned} e_1 &= -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \\ e_1 &= -N_1 \frac{d\Phi_M \cdot \sin \omega t}{dt} \\ &= -N_1 \cdot \Phi_M \cdot \omega \frac{d \sin \omega t}{d \omega t} \\ &= -E_M \cdot \cos \omega t \\ &= -E_M \cdot \sin (90^\circ + \omega t) \dots\dots\dots(2.5) \end{aligned}$$

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 :

$$(E_{eff})_2 = \frac{N_2 \cdot 2\pi f \cdot \Phi_M}{\sqrt{2}}$$

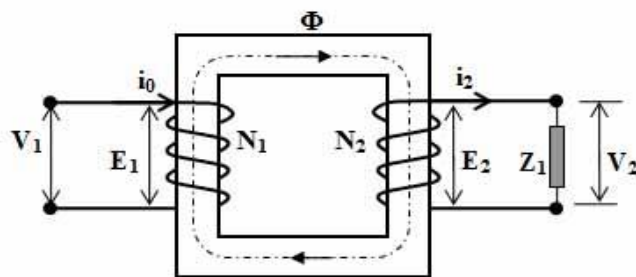
$$= 4,44 \cdot N_2 \cdot f \cdot \Phi_M \dots \dots \dots (2.8)$$

Dengan demikian perbandingan tranformasi 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*.

2.5.2 Transformator Berbeban



Gambar 2.14 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.

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 $N_1 I'_2 = N_2 I_2$

Karena nilai I_M dianggap kecil maka $I'_2 = I_1$

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

2.6 Daya Aktif, Daya Semu, dan Daya Reaktif⁸

2.6.1 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,

$$P = \sqrt{3} \cdot VI \cos \theta \dots\dots\dots(2.14)$$

$$P_1 = P_2 \rightarrow V_1 \times I_1 = V_2 \times I_2 \dots\dots\dots(2.15)$$

2.6.2 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,

$$S = \sqrt{3} \cdot VI \dots\dots\dots(2.16)$$

2.6.3 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,

$$Q = \sqrt{3} \cdot S \sin \theta = \sqrt{3} \cdot VI \sin \theta \dots\dots\dots(2.17)^1$$

2.7 Rugi-rugi Transformator

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

⁸ Zuhail. Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya. Penerbit PT. Gramedia Pustaka Utama.

¹ Cekmas Cekdin dan Taufik Barlian, Rangkaian Listrik. Penerbit ANDI YOGYAKARTA. 2013.

2.7.1 Rugi Variabel

Rugi yang disebabkan arus beban mengalir pada kawat tembaga $P_{CU} = I^2R$. Karena arus beban berubah-ubah, rugi tembaga juga tidak tetap tergantung pada beban.

$$P_{cu} = I_1^2 R_1 \dots\dots\dots(2.18)$$

$$P_{cu} = I_2^2 R_2 \dots\dots\dots(2.19)$$

Dengan demikian rugi tembaga total :

$$\begin{aligned} P_{cu} &= P_{cu\ 1} + P_{cu\ 2} \\ &= I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \dots\dots\dots(2.20) \end{aligned}$$

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

$$P_{cu} = I_2^2 R_{ek\ 2} \dots\dots\dots(2.21)$$

Jumlah total rugi-rugi pada transformator adalah :

$$P_{rugi\ total} = \text{Rugi-rugi Cu} + \text{Rugi inti} \dots\dots\dots(2.22)$$

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

$$P_{t2} = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2 \times P_{t1} \dots\dots\dots(2.23)$$

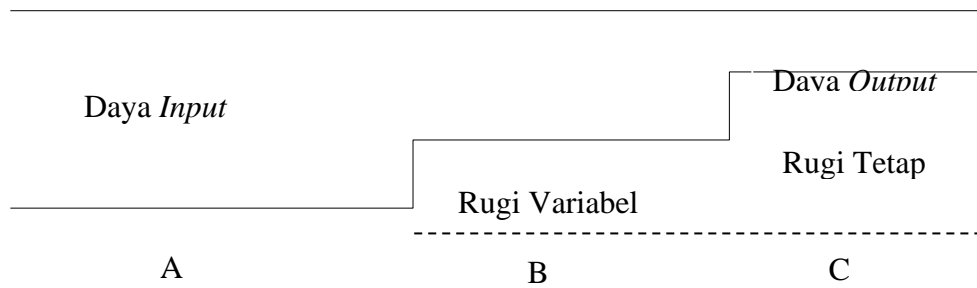
Keterangan :

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



Gambar 2.15 Rugi-rugi Transformator

$$\eta_{listrik} = \frac{C}{B} \times 100\% \dots\dots\dots(2.24)$$

$$\eta_{mekanik} = \frac{B}{A} \times 100\% \dots\dots\dots(2.25)$$

$$\eta_{Trafo} = \eta_{listrik} \times \eta_{mekanik} = \frac{C}{B} \times \frac{B}{A} = \frac{C}{A} = \frac{P_o}{P_{in}} \dots\dots\dots(2.26)$$

2.7.2 Rugi Tetap

Rugi tetap terdiri atas :

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

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{maks} \text{ watt} \dots\dots\dots(2.27)$$

Dimana :

K_h = konstanta

B_{maks} = fluks maksimum (weber)

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

$$P_e = K_e \cdot f^2 \cdot B_{maks} \dots\dots\dots(2.28)$$

$$\text{Jadi, rugi besi (rugi inti) } P_i = P_h + P_e \dots\dots\dots(2.29)$$

2.8 Efisiensi Transformator⁸

Efisiensi transformator adalah perbandingan antara keluaran daya yang berguna dan masuk daya total. Karena masukan ke transformator sama dengan

⁸ Zuhail. Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya. Penerbit PT. Gramedia Pustaka Utama.

keluaran daya yang berguna ditambah kerugiannya, maka persamaan efisiensi dapat ditulis dalam bentuk sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Daya keluaran} &= \text{daya input} - \text{kerugian} \\ \text{Persen efisiensi} &= \frac{\text{daya keluaran}}{\text{daya masukan}} \times 100\% \\ &= \frac{\text{daya masukan} - \text{kerugian}}{\text{daya masukan}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.30) \end{aligned}$$

Dari persamaan di atas, jelaslah bahwa efisiensi transformator dapat ditentukan untuk estiap beban dengan pengukuran langsung daya masukannya dan daya keluarannya.

2.8.1 Efisiensi Terhadap Perubahan Beban

$$\eta = \frac{V_2 \cos \varphi}{V_2 \cos \varphi + I_2 R_{2ek} + \frac{P_i}{I_2}} \dots\dots\dots(2.31)$$

Agar efisiensi maksimum

$$\frac{d}{dI_2} \left(I_2 R_{2ek} + \frac{P_i}{I_2} \right) = 0 \dots\dots\dots(2.32)$$

Jadi, $R_{2ek} = \frac{P_i}{I_2}$

$P_i = I_2^2 R_{2ek} = P_{Cu}$

Artinya, untuk beban tertentu efisiensi maksimum terjadi ketika rugi tembaga = rugi inti.

Untuk menentukan besarnya beban yang dioperasikan pada saat efisiensi maksimum , berlaku :

$$W_{ef \text{ maks}} = \sqrt{\frac{\text{Rugi-rugi besi}}{\text{Rugi-rugi tembaga beban penuh}}} \times \text{Beban penuh} \dots\dots\dots(2.33)$$

2.8.2 Perubahan Efisiensi Terhadap Paktor Kerja (cosΦ) Beban

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma r_{ugi}}{V_2 I_2 \cos \phi + \Sigma r_{ugi}} \dots\dots\dots(2.34)$$

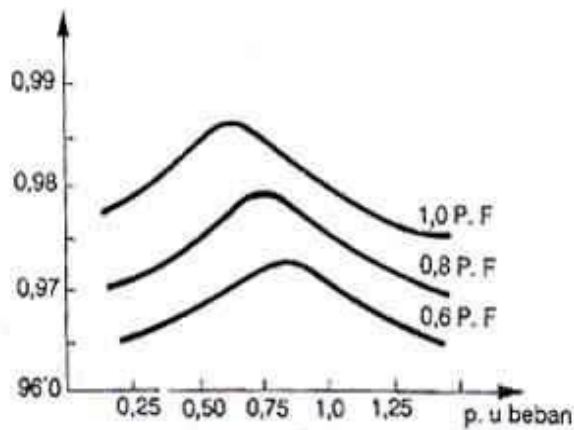
$$\eta = 1 - \Sigma r_{ugi} / V_2 I_2^2 \dots\dots\dots(2.35)$$

Bila $\Sigma r_{ugi} / V_2 I_2 = x = \text{konstanta}$

$$\text{Maka } \eta = 1 - \frac{x}{\cos \phi + x} \dots\dots\dots(2.36)$$

$$\eta = 1 - \frac{x / \cos \phi}{1 + x \cos \phi} \dots\dots\dots(2.37)$$

Hubungan antara efisiensi dengan beban pada cos Φ yang berbeda-beda dapat dilihat pada gambar berikut ini :



Gambar 2.16 Hubungan antara efisiensi dengan beban pada cos Φ yang berbeda-beda