

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1. Umum

Transformator merupakan alat elektrik yang dapat memindahkan dan mengubah dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain, melalui suatu gandengan magnet dengan frekwensi yang sama berdasarkan prinsip induksi elektro magnet. Peralatan ini mampu menaikkan maupun menurunkan tegangan dan arus.

Cukup beralasan bahwa penggunaan transformator dalam suatu sistem tenaga elektrik akan merupakan hal yang mutlak harus ada. Baik untuk masa sekarang maupun untuk masa-masa yang akan datang. Ini terbukti dengan semakin banyaknya digunakan pada pengembangan sistem distribusi dan transmisi tenaga listrik sebagai suatu peralatan atau komponen utama dari suatu gardu induk, gardu hubung dan gardu distribusi. Dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan misalnya kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya listrik jarak jauh dan juga pada teknik arus lemah.

Didalam pemakaian transformator pada sistem tenaga terdiri dari trafo penaik tegangan (Step Up) atau disebut trafo daya guna untuk menaikkan tegangan pembangkitan menjadi tegangan transmisi, sedangkan untuk menurunkan tegangan transmisi menjadi tegangan distribusi disebut trafo penurun tegangan (Step down) dan trafo instrumen.

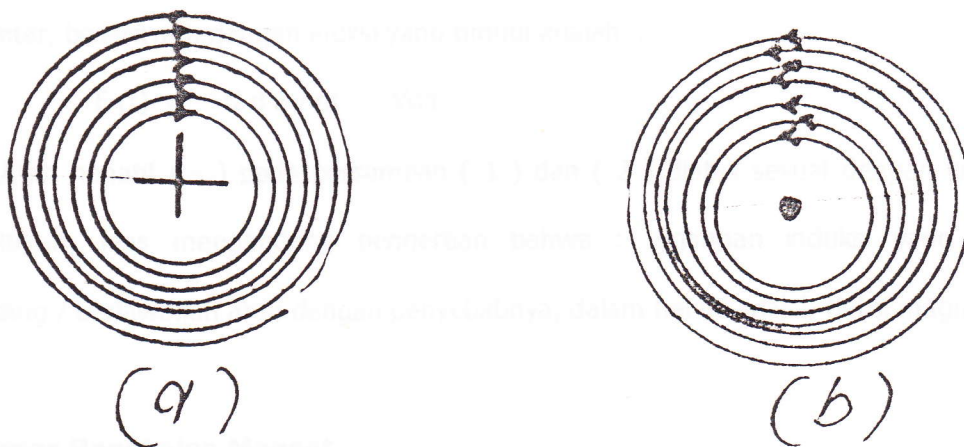
II.2. Medan Magnet

Dalam menentukan medan magnet, bila sebatang penghantar dialiri arus listrik, maka pada sekitar kawat hantaran tersebut akan ditimbulkan suatu medan magnet. Arah medan



magnet yang terbentuk dapat ditentukan dengan kaedah tangan kanan fleming. Kaedah tangan kanan fleming mengandung pengertian bahwa : jika sebatang penghantar berarus dipegang sedemikian rupa, maka jempol merupakan arah gerak (F) atau perputaran penghantar dan jari telunjuk menyatakan arah medan magnet dari kutub utara ke kutub selatan (arah B = arah kerapatan fluks) sedangkan jari tengah menyatakan arah arus dan tegangan.

Dengan menggunakan tangan kanan aturan fleming tersebut, maka untuk dua penghantar seperti gambar berikut ini dapat dengan mudah ditentukan arah medan magnet yang terbentuk.



Gambar II.1. Medan magnet pada sebatang penghantar berarus

a. Arah arus positif b. Arah arus negatif

Arah arus yang mengalir dapat ditentukan dengan suatu kesepakatan misalnya arah arus yang menjauhi dapat ditentukan dengan arah positif, sedangkan arah arus yang menuju ditetapkan sebagai arah negatif, seperti ditunjukkan pada gambar II.1. diatas.

II.3. Tegangan Induksi

Efek yang sangat penting dari medan magnet terhadap suatu penghantar adalah timbulnya tegangan induksi gaya gerak listrik (ggl). Tegangan induksi akan terbentuk pada suatu penghantar yang berada atau dilingkupi oleh medan magnet hanya dan jika terjadi perubahan gerakan sebagai fungsi waktu (f). Prinsip ini dikemukakan oleh Paraday yang mengandung pengertian bahwa : Apabila sebatang penghantar digerakkan dalam medan magnet serba sama dengan kecepatan tertentu, maka pada batang penghantar akan diinduksikan tegangan induksi listrik (F). Dalam bentuk persamaan dinyatakan sebagai :

$$E (f) = - N d \phi / dt \quad \text{Volt} \quad (1)$$

Persamaan (1) diatas adalah untuk 1 batang penghantar. Sedangkan untuk N jumlah penghantar, besarnya tegangan inuksi yang timbul adalah :

$$E (f) = - N d \phi / dt \quad \text{Volt} \quad (2)$$

Arah negatif (-) pada persamaan (1) dan (2) diatas sesuai dengan kaedah hukum lens. Hukum lens mengandung pengertian bahwa : tegangan induksi yang timbul akan menentang / berlawanan arah dengan penyebabnya, dalam hal ini adalah fluksi magnet.

II.4. Dasar Rangkaian Magnet

Arus listrik (i) yang dialirkan melalui penghantar yang dibelitkan pada inti besi yang berbentuk cincin toroidal, akan menghasilkan medan magnet yang sebanding dengan jumlah lilitan (N) dikalikan dengan besaran arus listrik (i). Amper turn Ni ini dikenal sebagai gaya gerak magnet (ggm) dan dinyatakan dengan rotasi F

$$F = Ni \quad \text{ampere - turn} \quad (3)$$

Gaya gerak magnet (ggm) adalah perbedaan potensial magnet yang cenderung menggerakkan fluks disekitar cincin torida. Gerak fluks disekitar cincin, selain ditentukan oleh

besaran ggm, juga merupakan fungsi dari tahanan inti besi yang membawa fluks tertentu.

Tahanan inti besi itu disebut reluktansi R dari rangkaian magnet

$$\phi = \frac{F \text{ Weber}}{R} \quad (4)$$

Seperti juga tahanan dalam rangkaian listrik, reluktansi berbanding lurus dengan panjang (L), berbanding terbalik dengan penampang luas bidang (A), dan bergantung pada bahan magnetik rangkaian magnet tersebut, dimana besaran L dalam meter dan A dalam meter persegi.

II.5. Prinsip Kerja Transformator

Apabila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan AC V1, maka akan mengalir arus bolak-balik I_1 pada kumparan dan inti dan juga I_m , 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 $E_1 = ep$

Besarnya GGL induksi pada kumparan primer adalah :

$$E_p = - N_p \frac{d\phi}{dt} \text{ Volt} \quad (6)$$

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 max weil)

dt : Perubahan waktu dalam satuan detik



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

Besarnya GGL induksi pada kumparan sekunder adalah :

$$E_s = - N_s \frac{d\phi}{dt} \text{ Volt} \quad (7)$$

Dimana

N_s = Jumlah lilitan kumparan sekunder

Dari persamaan (6) dan (7) didapatkan perbandingan lilitan berdasarkan perbandingan GGL induksi yaitu :

$$D = e_p / e_s = N_p / N_s \quad (8)$$

Fluks pada saat t dinyatakan dengan pernyataan $\phi(t) = \phi_m \sin 10t$ sehingga GGL induksi pada kumparan primer adalah :

$$E_p = -N_p \frac{d\phi}{dt}$$

$$E_p = -N_p \frac{d\phi_m \sin \omega t}{dt} \quad (9)$$

$$e_p = -N_p \omega \phi_m \cos \omega t \text{ (tertinggal } 90^\circ \text{ dari fluks)}$$

$$e_p = -N_p \omega \phi_m \sin(\omega t - \pi/2)$$

GGL induksi kumparan primer maksimum adalah :

$(E_p)_{maks} = N_p \omega \phi_m$ dan besarnya tegangan efektif (e_p) dapat dihitung dengan persamaan

$$e_p = \frac{(E_p)_{maks}}{\sqrt{2}}$$

$$e_p = \frac{N_p \omega \phi_m}{\sqrt{2}}$$



$$e_p = \frac{2 \pi f \cdot N_p \phi_m \cdot \sqrt{2}}{2} \quad (10)$$

$$e_p = 3,14 \cdot 1 \cdot 41 f N_p \phi_m$$

$$e_p = 4,44 \cdot f \cdot N_p \phi_m$$

Dengan cara yang sama didapatkan :

$$E_s = 4,44 \cdot f \cdot N_s \phi_m \quad (11)$$

Apabila transformator dikatakan ideal, sehingga dianggap tidak terdapat kerugian-kerugian daya, maka daya input P_i dapat dianggap sama dengan daya output (P_o) maka :

$$\begin{aligned} V_1 I_1 &= V_2 I_2 \\ \frac{I_1}{I_2} &= \frac{V_2}{V_1} \end{aligned} \quad (12)$$

V_1

Dari persamaan (8) dan (12) didapatkan, untuk trafo ideal berlaku :

$$a = \frac{N_p}{N_s} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (13)$$

II.6. Rugi-Rugi Daya dan Efisiensi

Pada transformator tidak ideal besarnya daya masukan (P_{in}) tidak lagi sama besar dengan daya keluaran (P_{out}) dimana

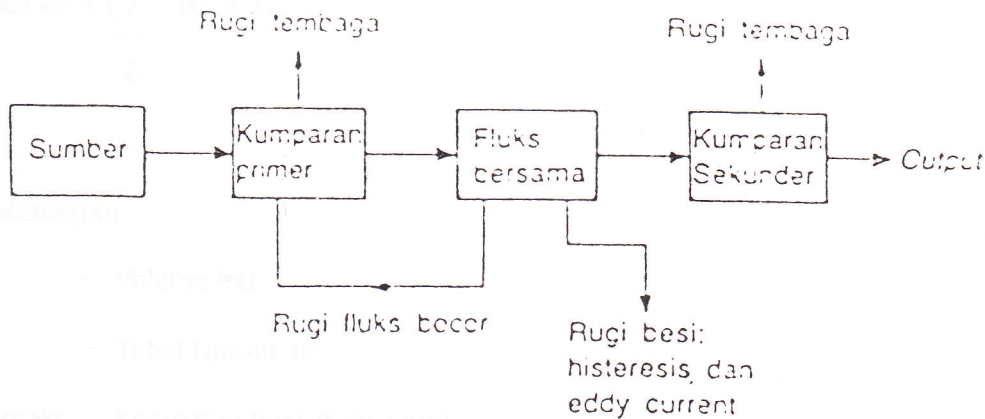
$$P_{in} = V_1 \cdot I_1 \cos \phi_1 \quad (14)$$

Dan

$$P_{out} = V_2 \cdot I_2 \cos \phi_2 \quad (15)$$



Jika transformator dihubungkan dengan sumber tegangan Ac, maka akan timbul kerugian-kerugian. Kerugian-kerugian tersebut jelas akan mempengaruhi rendemen (efisiensi) dari transformator.



Gambar II.2. Blok diagram aliran daya elektrik transformator

1. Rugi Tembaga (P_{cu})

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

$$P_{cu} = I^2 \cdot R \quad (16)$$

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

2. Rugi Besi P

Rugi besi terdiri atas :

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

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B \text{ maks Watt} \quad (17)$$

$$\text{Nilai } K_h = \nu \cdot 10^{-7}$$

b. Rugi arus eddy yaitu rugi yang disebabkan arus pusar pada inti besi. Dirumuskan sebagai :

$$P_e = K_e f^2 B^2 d^3 \quad (18)$$

$$\text{Nilai } k_e = \frac{(2 \cdot 10^6) \cdot V^2 \cdot t^2}{6}$$

Gambar II.3 Transformator ring

II.7. Keterangan :

V = Volume inti

T = Tebal lapisan inti

B maks = Kerapatan fluks maksimum

f = Frekuensi

D = Konstanta jenis dari teras transformator antara 1,5 sampai 1,7

Jadi rugi besi (rugi inti) adalah

$$P = P_n + P_e \quad (19)$$

3. Efisiensi

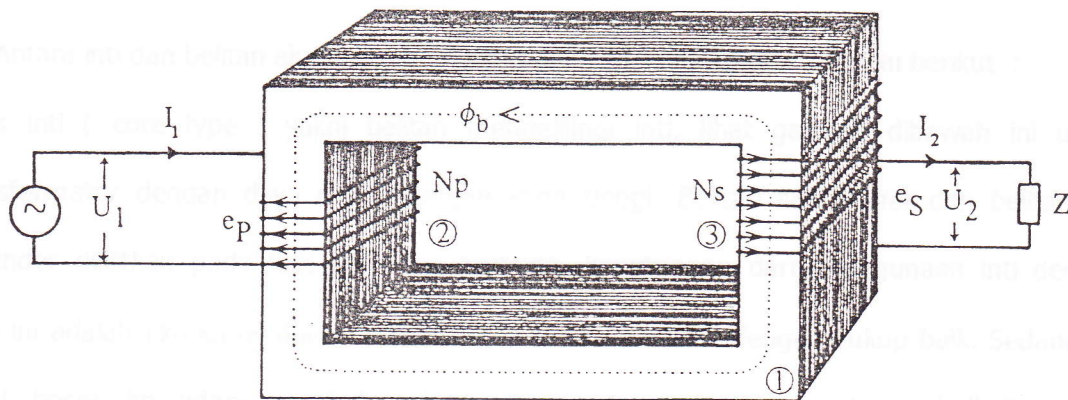
Efisiensi dinyatakan sebagai :

$$\eta = \frac{\text{Daya keluar}}{\text{Daya masuk}} = \frac{\text{Daya keluar}}{\text{Daya keluar} + \sum \text{rugi}} = I \cdot \frac{\sum \text{rugi}}{\text{daya masuk}} \quad (20)$$

dimana $\sum \text{rugi} = P_{ca} + P$

a = perbandingan transformasi

Untuk lebih jelasnya lihat gambar II.3



Gambar II.3. Transformator ideal

II.7. Konstruksi Transformator

Seperti dijelaskan pada bagian terdahulu bahwa secara fisik transformator satu fasa hanya terdiri dari belitan / kumparan dan teras magnetik atau inti besi.

a. Inti besi

Inti besi (teras) suatu transformator merupakan rangkaian magnet yang diakibatkan oleh kumparan-kumparan. Inti besi berguna untuk mempermudah jalannya fluksi yang ditimbulkan oleh arus listrik melalui kumparan.

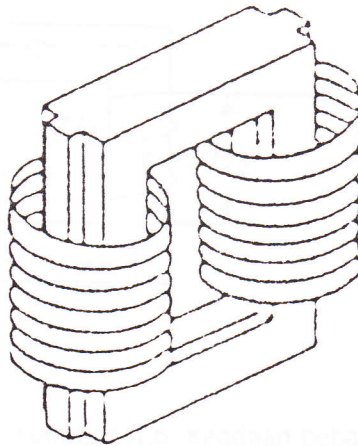
Suatu inti transformator biasanya terbuat dari lapisan / lembaran-lembaran plat besi lunak atau baja silikon yang diklem jadi satu dengan tebal berkisar antara 0,35 mm – 0,5 mm. Pada setiap lapisan diberi isolasi sebagai pembatas yang berfungsi untuk mengurangi panas yang ditimbulkan arus pusar (Eddy Current).

b. Kumparan

Kumparan transformator, yakni lilitan konduktor yang dihubungkan dengan tegangan arus bolak balik maupun yang dihubungkan dengan beban yang nantinya menyebabkan timbulnya fluksi pada sekitar kumparan itu. Kumparan tersebut diisolasi baik terhadap inti besi maupun terhadap kumparan lain dengan isolasi padat seperti karton, pertinak dan lain sebagainya.

Antara inti dan belitan akan memberikan dua jenis transformator sebagai berikut :

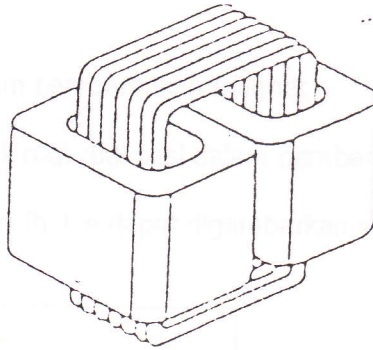
- a. Jenis inti (core type) yakni belitan mengelilingi inti, lihat gambar dibawah ini untuk transformator dengan daya dan tegangan yang tinggi. Belitan sisi primer dan belitan sisi sekunder dililitkan pada kaki inti yang berbeda, keuntungan dari penggunaan inti dengan type ini adalah ekonomis dalam pemakaian inti dan ventilasi dengan cukup baik. Sedangkan fluksi bocor ke udara menjadi cukup besar dibanding dengan type shell itu suatu kelemahannya.



Gambar II.4. Transformator jenis inti

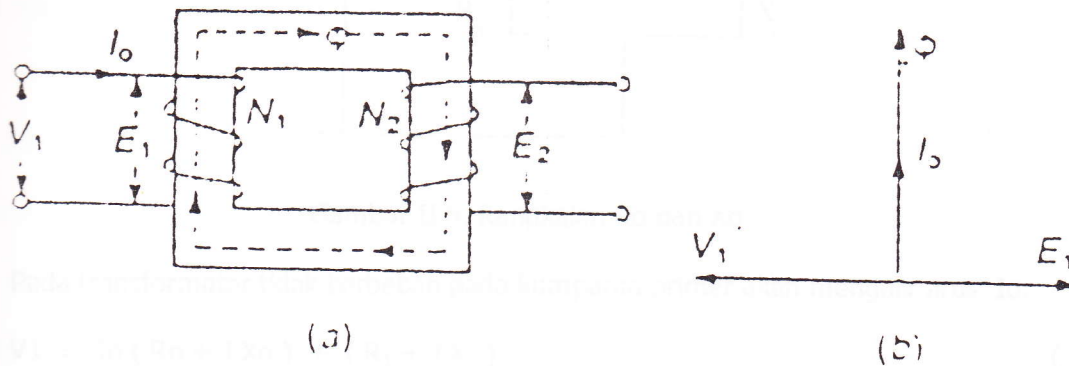
- b. Jenis congkang (shell type)

Yakni inti mengelilingi belitan, lihat gambar dibawah ini untuk trufo yang mempunyai daya dan tegangan rendah. Pada type shell, belitan primer dan sekunder terletak pada satu kaki. Keuntungan penggunaan type ini adalah mudah pembuatannya dan besarnya fluksi bocor akan menjadi berkurang. Sedangkan kelemahannya adalah pemakaian inti kurang ekonomis, karena memerlukan inti yang relatif besar.



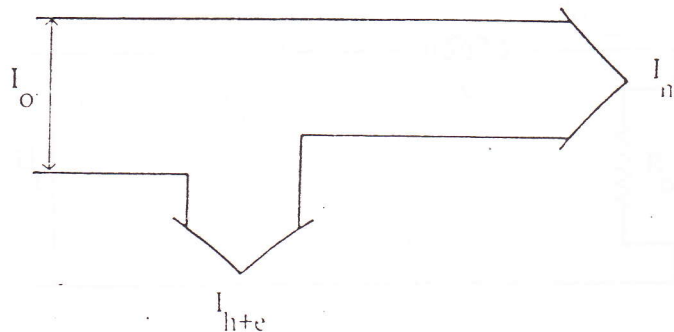
Gambar II.5. Transformator jenis congkang

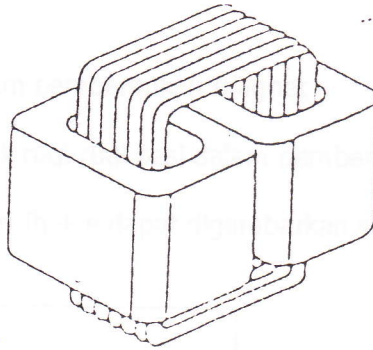
II.8. Keadaan Beban Nol



Gambar II.6. Keadaan beban nol

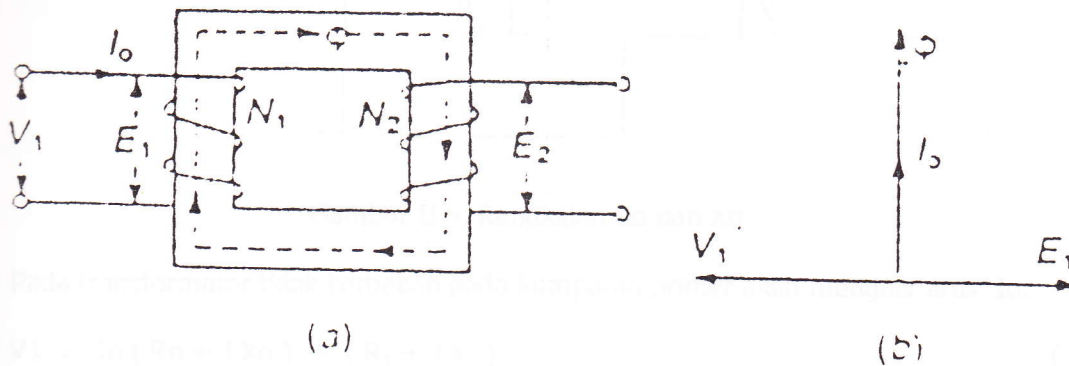
Arus primer tanpa beban (I_0) sebagaimana pada gambar II.6 b sefasa dengan fluks magnet (ϕ), sehingga arusnya mendahului sebesar 90° sehingga arus primer tanpa beban (I_0) tersebut dapat diuraikan atas 2 komponen yakni : $I_0 = I_m + I_{h+e}$

Gambar II.7. Bagan I_m dan I_{h+e}



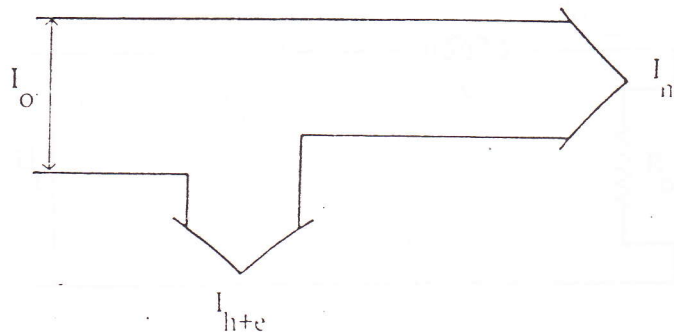
Gambar II.5. Transformator jenis congkang

II.8. Keadaan Beban Nol



Gambar II.6. Keadaan beban nol

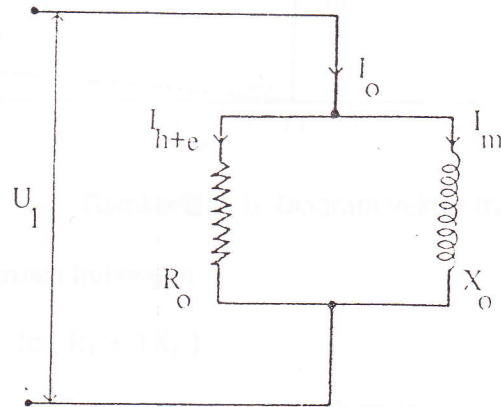
Arus primer tanpa beban (I_0) sebagaimana pada gambar II.6 b sefasa dengan fluks magnet (ϕ), sehingga arusnya mendahului sebesar 90° sehingga arus primer tanpa beban (I_0) tersebut dapat diuraikan atas 2 komponen yakni : $I_0 = I_m + I_{h+e}$

Gambar II.7. Bagan I_m dan I_{h+e}

I_m = harga arus yang efektif dalam pembentukan magnet

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

Dari gambar II.7 diatas, I_m dan I_{h+e} dapat digambarkan sebagai berikut :

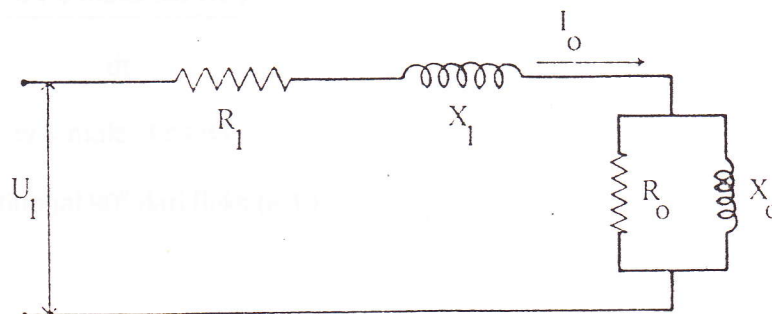


Gambar II.8. Rangkaian R_o dan X_o

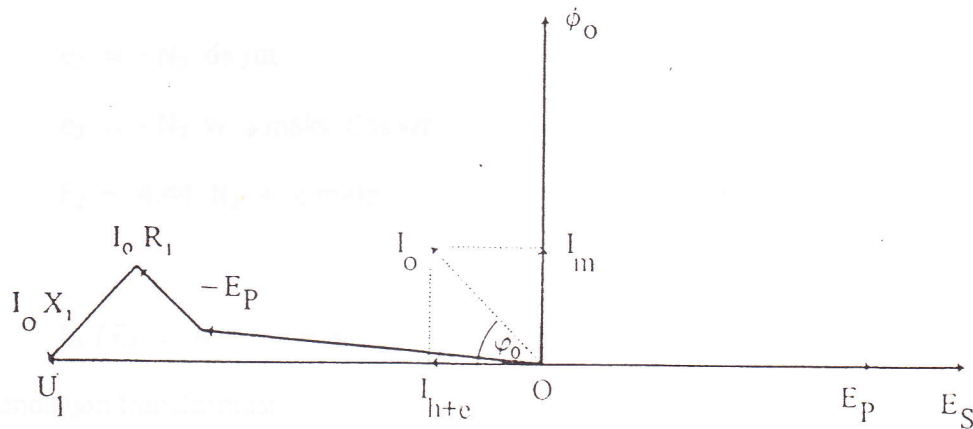
Pada transformator tidak berbeban pada kumparan primer akan mengalir arus I_o .

$$V_1 = I_o (R_o + j X_o) + (R_1 + j X_1) \quad (21)$$

Rangkaian primer dapat digambarkan sebagai berikut



Gambar II.9. a. Rangkaian pengganti primer



Gambar II.9. b. Diagram vektor transformator tanpa beban

Dari gambar II.9. b, dapat diperoleh hubungan :

$$V_1 = (-E_P) + I_0 (R_1 + jX_1)$$

Bila kumparan primer suatu transformator dihubungkan dengan sumber tegangan V_1 yang sinusoida, akan mengalirkan arus primer I_0 yang juga sinusoida dan dengan mengagab belitan N_1 reaktif murni, I_0 akan tertinggal 90° dari V_1 (Gambar II.6 b). Arus primer I_0 menimbulkan fluks (ϕ) yang sefasa dan juga berbentuk sinusoid.

$$\phi = \phi \text{ maks Sin } \omega t \quad (23)$$

Fluks yang sinusoid ini akan menghasilkan tegangan induksi e_1 (Hukum Faraday).

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt}$$

$$e_1 = -N_1 \frac{d(\phi \text{ maks Sin } \omega t)}{dt}$$

$$= -N_1 \omega \phi \text{ maks Cos } \omega t \quad (24)$$

(tertinggal 90° dari fluks (ϕ))

Harga efektifnya

$$E_1 = \frac{N_1 \omega \phi \text{ maks}}{\sqrt{2}} = 4.44 N_1 \omega \phi \text{ maks} \quad (25)$$

Pada rangkaian sekunder fluks (ϕ) bersama tadi menimbulkan

$$e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

$$e_2 = -N_2 \omega \phi_{\text{maks}} \cos \omega t$$

$$E_2 = 4.44 N_2 \omega \phi_{\text{maks}} \quad (26)$$

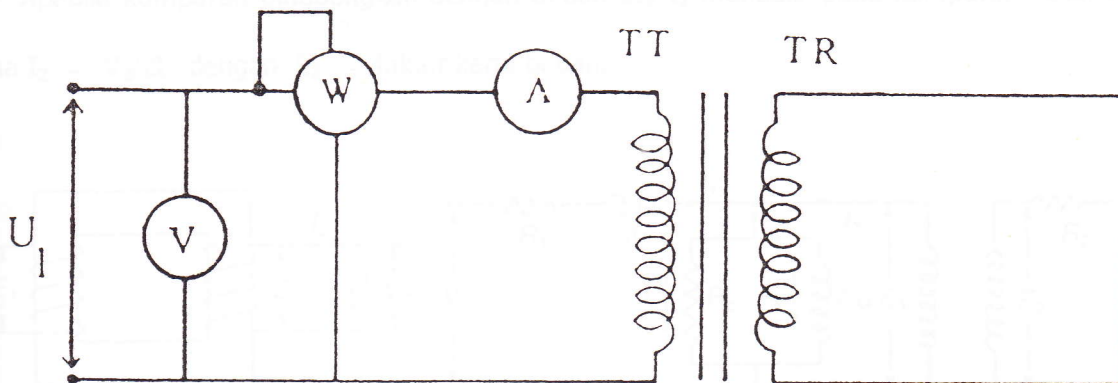
Sehingga

$$E_1 / E_2 = N_1 / N_2 = a$$

a = perbandingan transformasi

II.9. Keadaan Hubung Singkat

Kondisi hubung singkat terjadi bila rangkaian sisi tegangan rendah atau sisi yang tersambung pada beban terhubung singkat. Hubungan singkat pada sisi beban dapat terjadi karena hubung singkat antar fasa – netral atau hubung singkat antara fasa dengan ground (bodi transformator) seperti ditunjukkan pada gambar II.10 berikut ini



Gambar II.10. Transformator dalam keadaan hubung singkat

Dalam kondisi ini, impedansi beban Z_L sama dengan nol. Akibatnya jika transformator bekerja dengan tegangan nominal, maka arus sekunder akan menjadi sangat besar. Kondisi ini jelas akan mengakibatkan transformator menjadi panas, dalam waktu tidak terlalu lama dapat

mengakibatkan transformator terbakar. Praktisnya melalui pengujian hubung singkat dapat diketahui bahwa tegangan nominal transformator dapat diterima, bila transformator bekerja ada tegangan nominal. Jelas akan mengakibatkan arus sekunder yang sangat besar. Tegangan hubung singkat trato)vc) biasanya dinyatakan dalam persen (%) tegangan nominal dengan rumus :

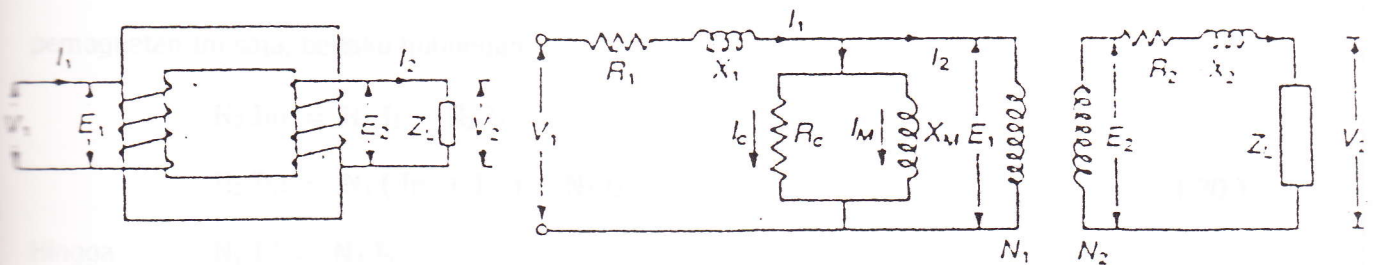
$$V_s = \frac{I_n \times Z \times 100 \%}{V_1} \tag{27}$$

Dimana

- V_s = Tegangan hubung singkat %
- V_1 = Tegangan primer trafo Volt
- I_n = Arus nominal trafo A
- Z = Impedansi trafo ohm

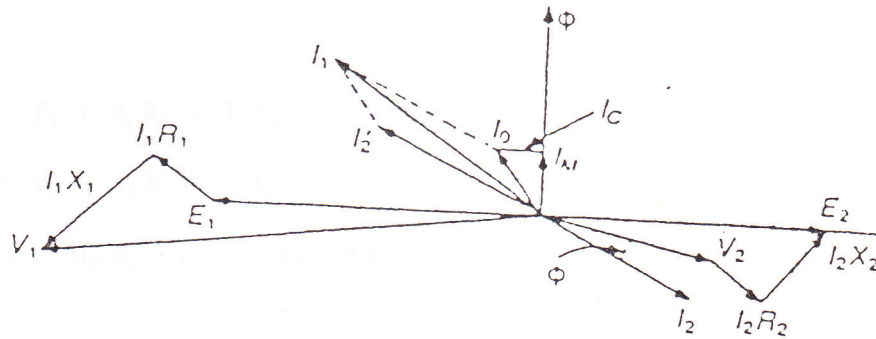
II.10. Keadaan Berbeban

Apabila kumparan dihubungkan dengan beban Z_L , I_2 mengalir pada kumparan sekunder, dimana $I_2 = V_2/Z_L$ dengan $E_2 =$ faktor kerja beban.



Gambar II.11. a. Transformator keadaan berbeban
 b. Rangkaian pengganti transformator keadaan berbeban

Dari gambar II.11 b diatas, dapat dibuat vektor diagramnya seperti pada gambar III.11.



Gambar II.12. Vektor diagram

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 pemagnetan I_m . Agar fluks bersama ini 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 :

$$I_1 = I_0 + I_2' \quad (28)$$

Bila rugi besi diabaikan ($I_h + e$ diabaikan) $I_0 = I_m$

$$I_1 = I_m + I_2' \quad (29)$$

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

$$\begin{aligned} N_2 I_m &= N_1 I_1 - N_2 I_2 \\ N_2 I_m - N_1 (I_m + I_2') &= N_2 I_2 \end{aligned} \quad (30)$$

Hingga $N_1 I_2' = N_2 I_2$

Karena nilai I_m dianggap kecil maka $I_2' = I_1$

Jadi

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \text{ atau } I_1/I_2 = N_2/N_1 \quad (31)$$

Dari model rangkaian vektor diagram diatas dapat pula diketahui hubungan penjumlahan

vektor :

$$V_1 = E_1 + I_1 R_1 + I_1 X_1$$

$$E_2 = V_2 + I_2 R_2 + I_2 X_2$$

$$E_1/E_2 = N_1/N_2 = a \text{ atau } E_2 = a E_1 \quad (32)$$

Hingga

$$E_1 = a (I_2 Z_L + I_2 R_2 + I_2 X_2) \quad (33)$$

Karena

$$I_2' / I_2 = N_2 / N_1 = 1/a \text{ atau } I_2 = a I_2' \quad (34)$$

Maka

$$E_1 = a^2 I_2' Z_L + a^2 I_2' R_2 + a^2 I_2' X_2 \quad (35)$$

Dan

$$V_1 = a^2 I_2' Z_L + a^2 I_2' R_2 + a^2 I_2' X_2 + I_1 R_1 + I_1 X_1 \quad (36)$$



Dari model rangkaian vektor diagram diatas dapat pula diketahui hubungan penjumlahan

vektor :

$$V_1 = E_1 + I_1 R_1 + I_1 X_1$$

$$E_2 = V_2 + I_2 R_2 + I_2 X_2$$

$$E_1/E_2 = N_1/N_2 = a \text{ atau } E_2 = a E_1 \quad (32)$$

Hingga

$$E_1 = a (I_2 Z_L + I_2 R_2 + I_2 X_2) \quad (33)$$

Karena

$$I_2' / I_2 = N_2 / N_1 = 1/a \text{ atau } I_2 = a I_2' \quad (34)$$

Maka

$$E_1 = a^2 I_2' Z_L + a^2 I_2' R_2 + a^2 I_2' X_2 \quad (35)$$

Dan

$$V_1 = a^2 I_2' Z_L + a^2 I_2' R_2 + a^2 I_2' X_2 + I_1 R_1 + I_1 X_1 \quad (36)$$

