

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 gandengan magnet berdasarkan prinsip induksi-elektromagnet. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaan transformator dalam sistem tenaga listrik memungkinkan dipilihnya tegangan yang sesuai, dan ekonomis untuk berbagai keperluan misalnya keperluan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya listrik jarak jauh.

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 melalukan atau mengalirkan arus bolak-balik antara rangkaian. Berdasarkan frekuensi, transformator dapat dikelompokkan sebagai berikut:

- (1) frekuensi daya, 50-60 c/s;
- (2) frekuensi pendengaran, 50 c/s-20 kc/s;
- (3) frekuensi radio, di atas 30 kc/s

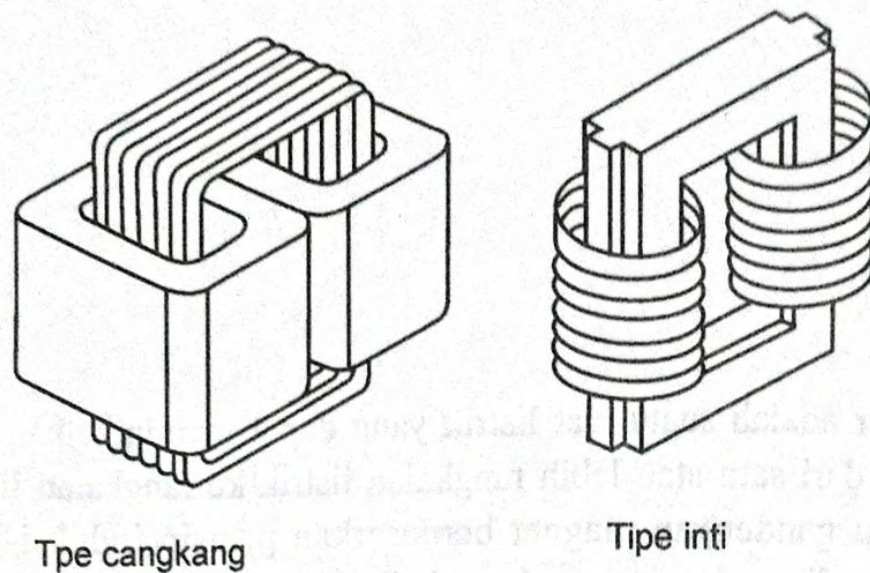
Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi:

- (1) transformator daya;
- (2) transformator distribusi;

- (3) transformator pengukuran; yang terdiri atas transformator arus dan transformator tegangan

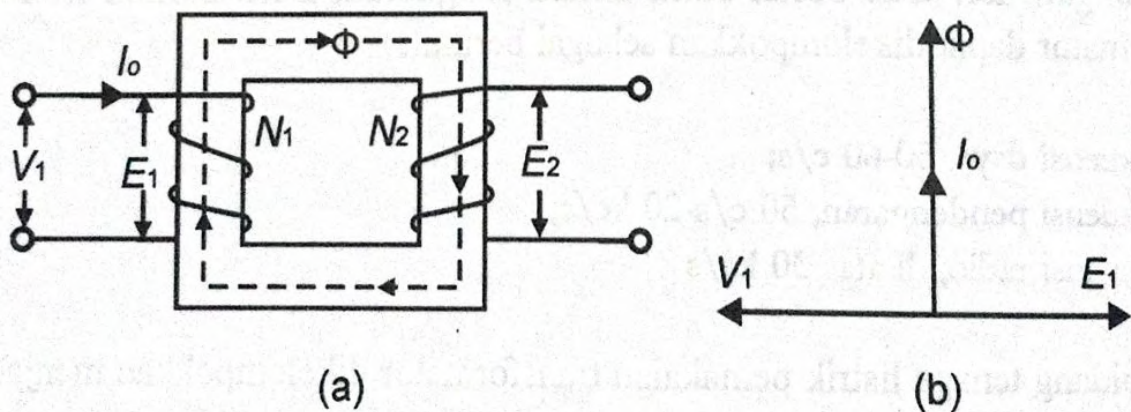
Kerja transformator yang berdasarkan induksi-elektromagnet, menghendaki adanya gandingan magnet antara rangkaian *primer* dan *sekunder*. Gandingan magnet ini berupa *inti besi* tempat melakukan fluks bersama.

Berdasarkan cara melilitkan kumparan pada inti, dikenal dua macam transformator, yaitu transformator *tipe inti* dan transformator *tipe cangkang*.



Gambar 24.1

KEADAAN TRANSFORMATOR TANPA BEBAN



Gambar 24.2

Bila kumparan primer suatu transformator dihubungkan dengan sumber tegangan V_1 sinusoidal, akan mengalirkan arus primer I_o yang juga sinusoidal dan dengan menganggap kumparan N_1 reaktif murni, I_o akan tertinggal 90° dari V_1 (gambar 24.2b). Arus primer I_o menimbulkan fluks (ϕ) yang sefasa dan juga sinusoidal.

$$\phi = \phi_{\text{maks}} \sin \omega t$$

Fluks sinusoidal ini akan menghasilkan tegangan induksi e_1 (hukum Farraday).

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

$$e_1 = -N_1 \frac{d(\phi_{\text{maks}} \sin \omega t)}{dt} = -N_1 \omega \phi_{\text{maks}} \cos \omega t$$

(tertinggal 90° dari ϕ)

Nilai efektifnya

$$E_1 = \frac{N_1 2\pi f \phi_{\text{maks}}}{\sqrt{2}} = 4,44 N_1 f \phi_{\text{maks}}$$

Pada rangkaian sekunder, fluks (ϕ) bersama tadi menimbulkan

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

$$e_2 = -N_2 \omega \phi_m \cos \omega t$$

$$E_2 = -4,44 N_2 f \phi_{\text{maks}}$$

sehingga

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Dengan mengabaikan rugi tahanan dan adanya fluks bocor.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

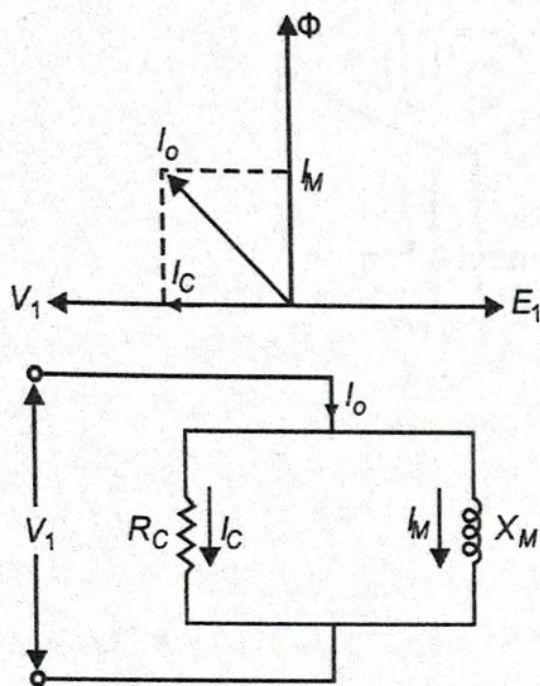
a = perbandingan transformasi

Dalam hal ini tegangan induksi E_1 besarnya sama, berlawanan arah dengan tegangan sumber V_1 .

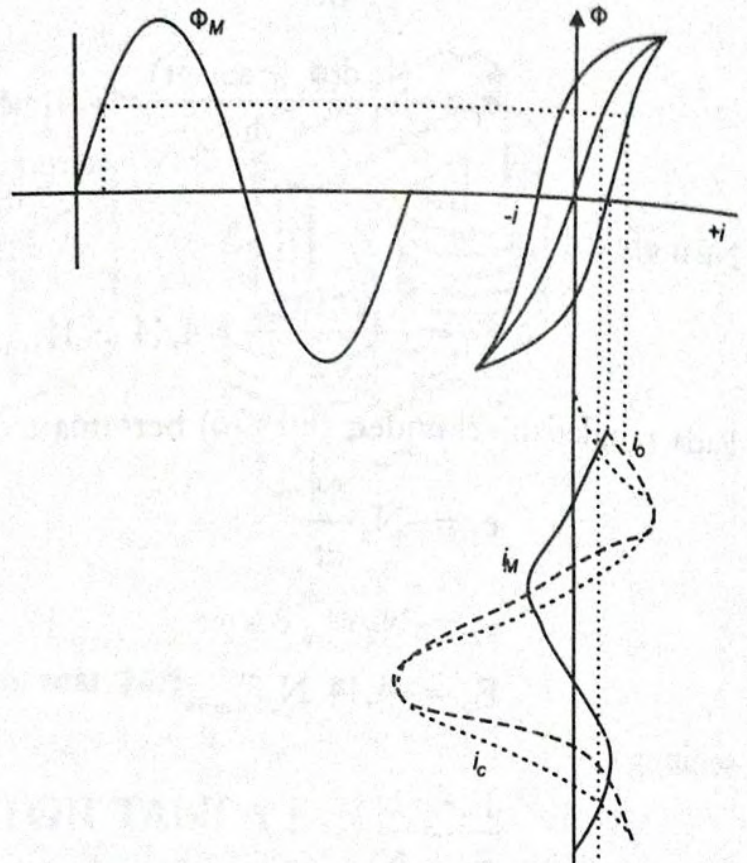
ARUS PENGUAT

Arus primer I_o yang mengalir pada saat kumparan sekunder tidak dibebani disebut arus penguat. Dalam kenyataannya arus primer I_o bukanlah merupakan arus induktif murni, hingga ia terdiri atas dua komponen (gambar 24.3):

- (1) Komponen arus pemagnetan I_M , yang menghasilkan fluks (ϕ). Karena sifat besi yang nonlinear (ingat kurva B-H), maka arus pemagnetan I_M dan juga fluks (ϕ) dalam kenyataannya tidak berbentuk sinusoid (gambar 24.4).
- (2) Komponen arus rugi tembaga I_C , menyatakan daya yang hilang akibat adanya rugi histeresis dan arus pusar (eddy current). I_c sefasa dengan V_1 , sehingga hasil perkaliannya ($I_c \times V_1$) merupakan daya (Watt) yang hilang.



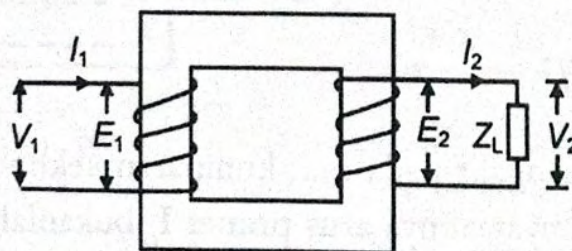
Gambar 24.3



Gambar 24.4

KEADAAN BERBEBAN

Apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban Z_L , I_2 mengalir pada kumparan sekunder, di mana $I_2 = V_2/Z_L$ dengan $\theta_2 =$ faktor daya beban.



Gambar 24.5

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 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:

$$I_1 = I_0 + I_2'$$

Bila rugi besi diabaikan (I_c diabaikan) maka $I_0 = I_M$

$$I_2 = I_M + I_2'$$

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

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

$$N_1 I_M = N_1 (I_M + I_2') - N_2 I_2$$

hingga

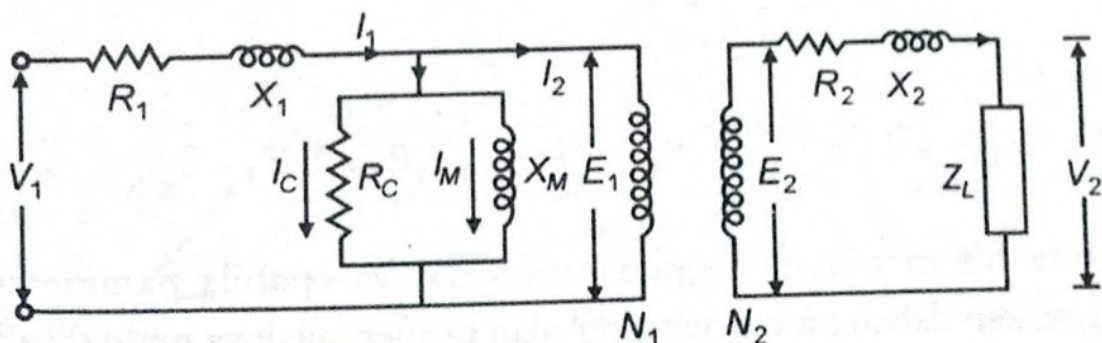
$$N_1 I_2' = I_2$$

Karena nilai I_M dianggap kecil maka $I_2 = I_1$

Jadi $N_1 I_1 = N_1 N_2$ atau $I_1 / I_2 = N_2 / N_1$

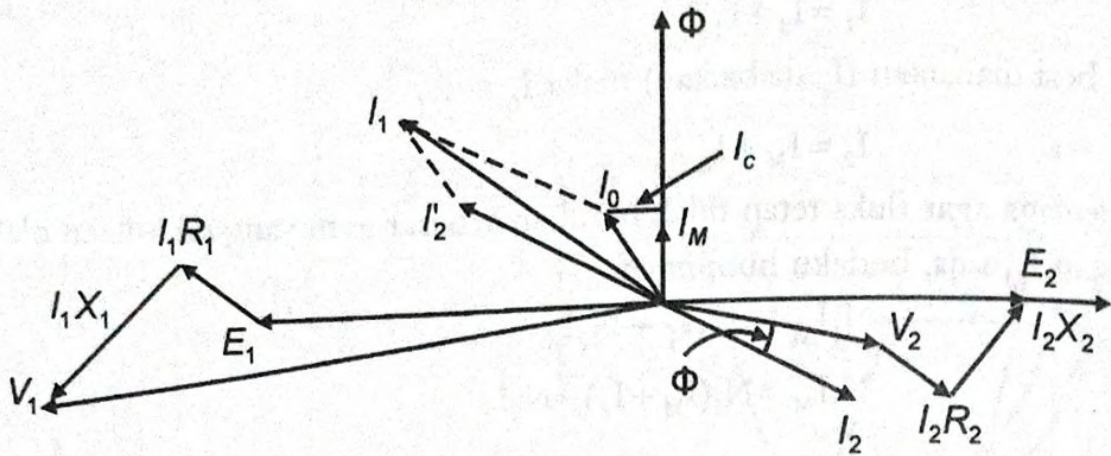
RANGKAIAN EKIVALEN

Dalam pembahasan terdahulu adanya tahanan dan fluks bocor diabaikan. Analisis selanjutnya akan memperhitungkan kedua hal tersebut. Tidak seluruh fluks (ϕ) yang dihasilkan oleh arus pemagnetan I_M merupakan fluks bersama (ϕ_M), sebagian darinya hanya mencakup kumparan primer (ϕ_1) atau kumparan sekunder (ϕ_2) saja. Dalam model rangkaian ekuivalen yang dipakai untuk menganalisis kerja suatu transformator, adanya fluks bocor ϕ_1 dan ϕ_2 ditunjukkan sebagai reaktansi X_1 dan X_2 . Sedang rugi tahanan ditunjukkan dengan R_1 dan R_2 . Dengan demikian 'model' rangkaian dapat dilukis seperti pada gambar 24.6.



Gambar 24.6

Dari rangkaian di atas dapat dibuat vektor diagramnya sebagai terlukis pada gambar 24.7.



Gambar 24.7

Dari model rangkaian di atas dapat pula diketahui hubungan penjumlahan vektor:

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

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

$$E_1/E_2 = N_1/N_2 = a \text{ atau } E_1 = aE_2$$

Hingga

$$E_1 = a(I_2 Z_L + I_2 R_2 + I_2 X_2)$$

Karena

$$I_2'/I_2 = N_2/N_1 = 1/a \text{ atau } I_2 = aI_2'$$

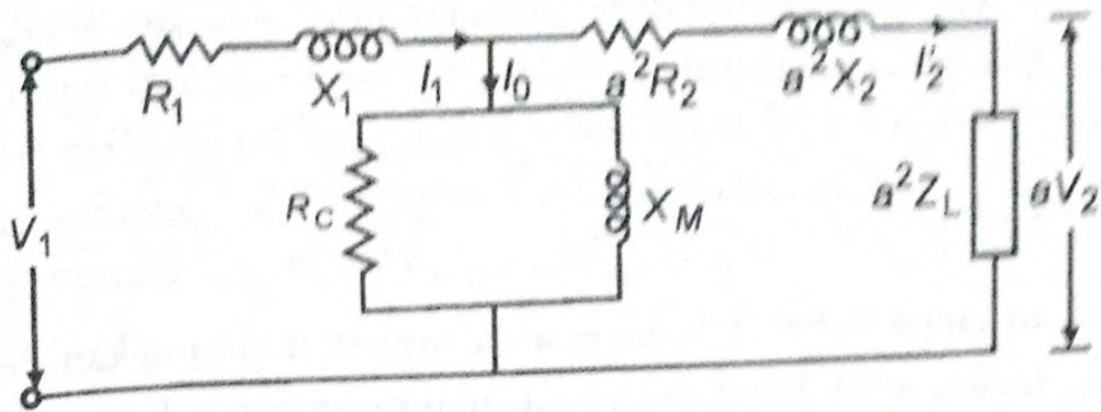
Maka

$$E_1 = a^2 I_2' Z_L + a^2 I_2' R_2 + a^2 I_2' X_2$$

Dan

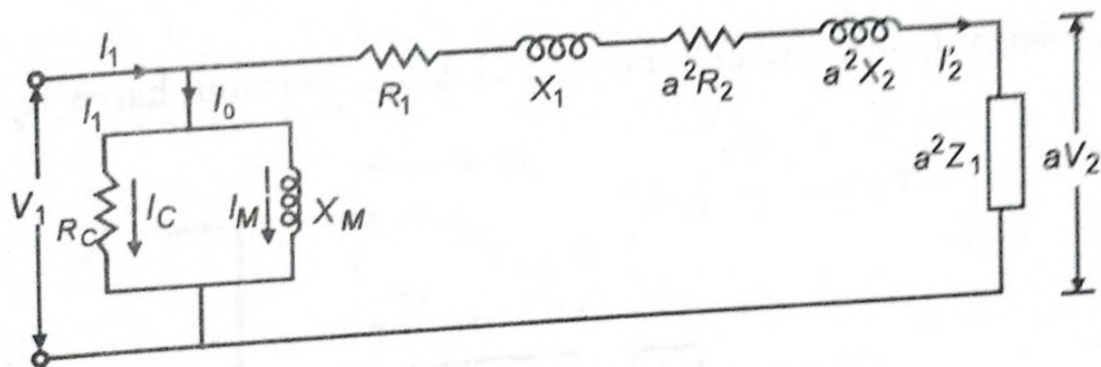
$$V_1 = a^2 I_2' Z_L + a^2 I_2' R_2 + a^2 I_2' X_2 + I_1 R_1 + I_1 X_1$$

Persamaan terakhir mengandung pengertian bahwa apabila parameter rangkaian sekunder dinyatakan dalam parameter rangkaian primer, nilainya perlu dikalikan dengan faktor a^2 . Sekarang model rangkaian menjadi seperti terlihat pada gambar 24.8.



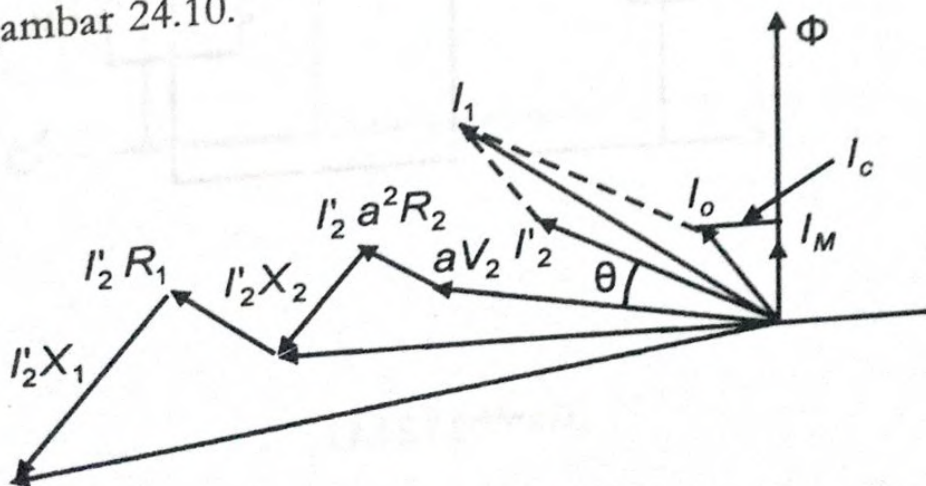
Gambar 24.8

Untuk memudahkan analisis (perhitungan), model rangkaian tersebut dapat diubah menjadi seperti terlihat pada gambar 24.9.



Gambar 24.9

Vektor diagram rangkaian di atas untuk beban dengan faktor daya terbelakang dapat dilukiskan pada gambar 24.10.



Gambar 24.10

MENENTUKAN PARAMETER

Parameter transformator yang terdapat pada model rangkaian ekuivalen R_c , X_m , R_{ek} dan X_{ck} , dapat ditentukan besarnya dengan dua macam pengujian yaitu pengujian beban nol dan pengujian hubung singkat.

Pengujian Beban Nol

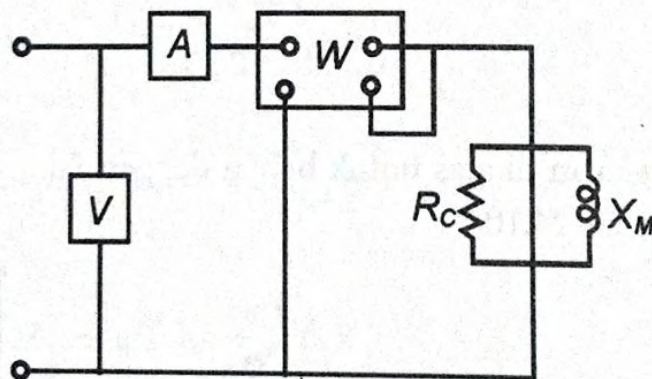
Dalam keadaan tanpa beban bila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan V_1 , seperti telah diterangkan terdahulu maka hanya I_0 yang mengalir.

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

$$R_c = \frac{V_1^2}{P_1}$$

$$Z_0 = \frac{V_1}{I_0} = \frac{jX_m R_c}{R_c + jX_m}$$

Dengan demikian dari pengukuran beban nol dapat diketahui harga R_c dan X_m .



Gambar 24.11

Pengukuran Hubungan Singkat

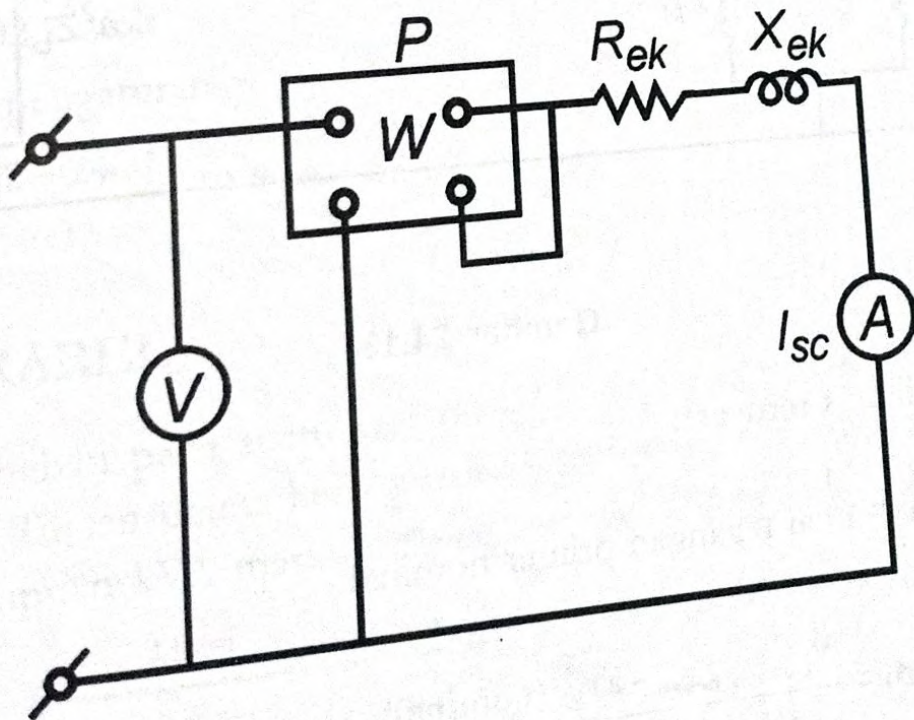
Hubung singkat berarti impedansi beban Z_L diperkecil menjadi nilai nol, sehingga hanya impedansi $Z_{ck} = R_{ek} + jX_{ek}$ yang membatasi arus. Karena nilai R_{ek} dan X_{ek} ini relatif kecil, harus dijaga agar tegangan yang masuk (V_{hs}) cukup kecil sehingga arus yang dihasilkan tidak melebihi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

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

$$R_{ek} = \frac{P_{hs}}{(I_{hs})^2}$$

$$Z_{ek} = \frac{V_{hs}}{(I_{hs})^2} = R_{ek} + jX_{ek}$$

$$X_{ek} = \sqrt{Z_{ek}^2 - R_{ek}^2}$$



Gambar 24.12

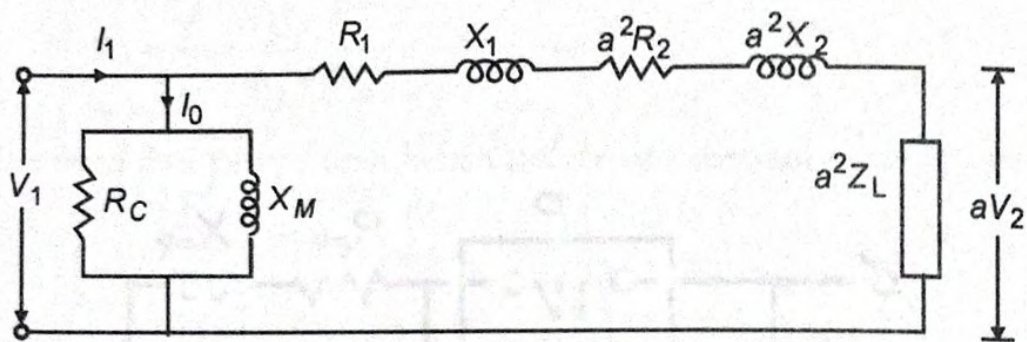
PENGATURAN TEGANGAN

Pengaturan tegangan suatu transformator ialah perubahan tegangan sekunder antara beban nol dan beban penuh pada suatu faktor daya tertentu, dengan tegangan primer konstan.

$$\text{Pengaturan} = \frac{V_2 \text{ tanpa beban} - V_2 \text{ beban penuh}}{V_2 \text{ beban penuh}}$$

Dengan mengingat model rangkaian yang telah ada dengan parameter sekunder ditransformasikan ke parameter.

$$\text{Pengaturan} = \frac{aV_2 \text{ tanpa beban} - aV_2 \text{ beban penuh}}{aV_2 \text{ beban penuh}}$$



Gambar 24.13

Dari rangkaian di atas ternyata:

$$aV_2 \text{ tanpa beban} = V_1$$

$$aV_2 \text{ beban penuh} = \text{nilai tegangan primer nominal}$$

$$\text{Pengaturan} = \frac{V_1 \text{ tanpa beban} - aV_2 \text{ (nominal)}}{aV_2 \text{ beban penuh (nominal)}}$$

Contoh 24.1:

Pengujian hubung singkat transformator fasa tunggal 15 kVA yang mempunyai perbandingan tegangan 2400 V/240 V, $f = 50$ Hertz menghasilkan data sebagai berikut:

$$\text{Arus hubung singkat } I_{hs} = 6,25 \text{ A}$$

Tegangan yang diterapkan $V_{hs} = 131 \text{ V}$

Daya masuk $P_{hs} = 214 \text{ W}$

Hitunglah prosentase pengaturan untuk beban dengan $\cos \phi = 0,8$ tertinggal.

Solusi:

Faktor daya pada keadaan hubung singkat

$$= \frac{P_{hs}}{V_{hs} \times I_{hs}}$$

$$= \frac{214}{131 \times 6,25} = 0,261 \text{ tertinggal} = 74^\circ 52'$$

$$Z_{ek} = \frac{V_{hs}}{I_{hs}} = \frac{131 \angle 0^\circ}{6,25 \angle -74^\circ 52'} = 20,96 \angle 74^\circ 52' \text{ Ohm}$$

$$R_{ek} = 20,90 \text{ Ohm} \times \cos 74^\circ 52' = 5,49 \text{ Ohm}$$

$$X_{ek} = 20,90 \text{ Ohm} \times \sin 74^\circ 52' = 19,97 \text{ Ohm}$$

sehingga:

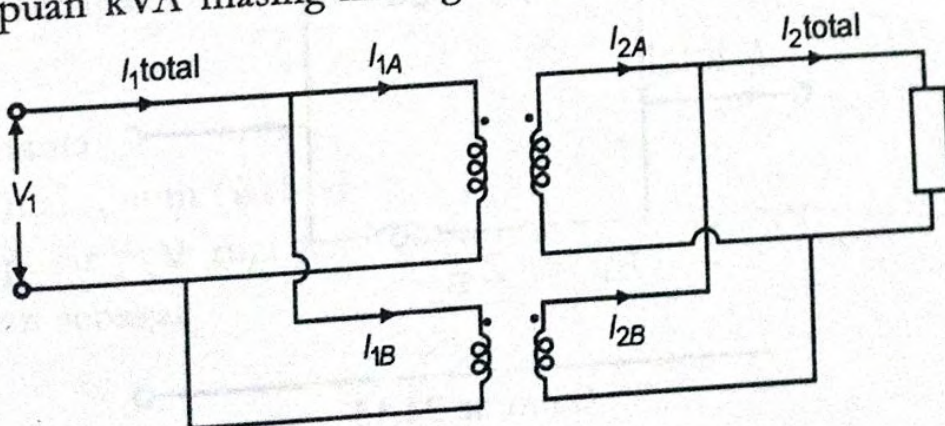
$$\begin{aligned} V_1 &= 2400(0,8 + j0,6) + 6,25(5,49 + j19,97) \\ &= 1920 + j1440 + 34,3 + j124,8 = 1954,3 + j1564,8 \\ &= 2502,2 \text{ Volt} \end{aligned}$$

Jadi prosentase pengaturan

$$= \frac{2502,2 - 2400}{2400} \times 100\% = 4,26\%$$

KERJA PARAREL

Pertambahan beban pada suatu saat menghendaki adanya kerja pararel di antara transformator. Tujuan utama kerja pararel ialah agar beban yang dipikul sebanding dengan kemampuan kVA masing-masing transformator, hingga tidak terjadi pem-



Gambar 24.14

bebanan lebih dan pemanasan lebih.

Untuk maksud di atas diperlukan beberapa syarat yaitu:

(1) *Perbandingan tegangan harus sama*

Jika perbandingan tegangan tidak sama, maka tegangan induksi pada kumparan sekunder masing-masing transformator tidak sama. Perbedaan ini menyebabkan terjadinya arus pusar pada kumparan sekunder ketika transformator dibebani. Arus ini menimbulkan panas pada kumparan sekunder tersebut.

(2) *Polarisasi trnsformator harus sama*

(3) *Tegangan impedansi pada keadaan beban penuh harus sama*

Dari persamaan rangkaian ekivalen yang lalu diketahui:

$$V_1 = I_1 Z_{ek} + V_2'$$

Dua transformator yang dipararelkan dapat digambarkan sebagai berikut:

$$I_1 \text{ total} = I_{1A} + I_{1B}$$

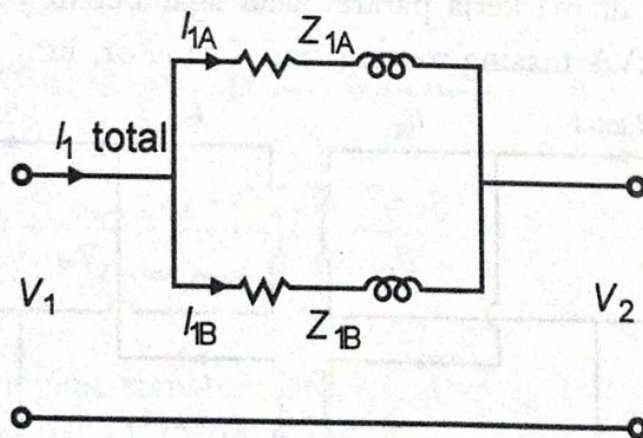
karena

$$V_1 = I_1 Z_{ek} + V_2'$$

maka untuk keadaan beban penuh

$$V_1 - V_2' = I_{1A} Z_{1A} = I_{1B} Z_{1B}$$

Persamaan di atas mengandung arti, agar kedua trnsformator membagi beban sesuai dengan kemampuan kVa-nya, sehingga tegangan impedansi pada keadaan beban penuh kedua transformator tersebut sama ($I_{1A} \times Z_{1A} = I_{1B} \times Z_{1B}$). dengan demikian dapat juga diartikan bahwa kedua transformator tersebut mempunyai impedansi per unit (pu) yang sama.

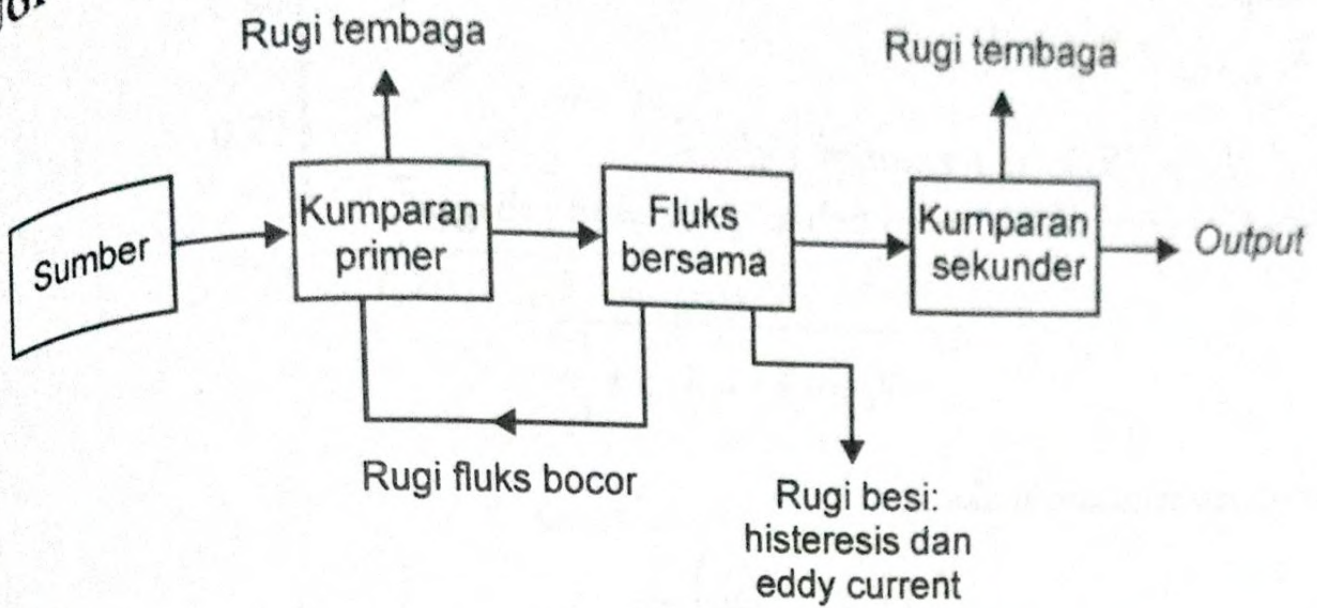


Gambar 24.15

(4) *Perbandingan reaktansi terhadap tahanan sebaiknya sama*

Apabila perbandingan R/X sama, maka kedua transformator tersebut akan bekerja pada faktor daya yang sama.

RUGI DAN EFISIENSI



Gambar 24.16

Rugi Tembaga (P_{cu})

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

$$P_{cu} = I^2 R$$

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

Rugi Besi (P_i)

Rugi besi di inti terdiri atas:

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

$$P_h = K_h f B_{maks}^{1,6} \text{ (Watt)}$$

K_h = konstanta

B = fluks maksimum (Weber).

- (2) Rugi arus pusar yaitu rugi yang disebabkan pusaran arus pada inti besi.

Dirumuskan sebagai:

$$P_e = K_e f^2 B_{maks}^2$$

Jadi, rugi besi di inti adalah:

$$P_i = P_h + P_e$$

Efisiensi

Efisiensi dinyatakan sebagai:

$$\eta = \frac{\text{daya keluar}}{\text{daya masuk}} = \frac{\text{daya keluar}}{\text{daya keluar} + \Sigma \text{ rugi daya total}} = 1 - \frac{\Sigma \text{ rugi daya total}}{\text{daya masuk}}$$

di mana

$$P_{\text{rugi total}} = P_{\text{cu}} + P_i$$

Perubahan Efisiensi terhadap Beban

Perubahan efisiensi terhadap beban dinyatakan sebagai:

$$\eta = \frac{V_2 \cos \phi}{V_2 \cos \phi + I_2 R_{2ek} + \frac{P_i}{I_2}}$$

agar η maksimum, maka

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

$$R_{ek} = P_i / I_2^2$$

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

jadi:

Artinya:

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

Perubahan Efisiensi terhadap Faktor Daya Beban

Perubahan efisiensi terhadap faktor beban dapat dinyatakan sebagai:

$$\eta = 1 - \frac{X \text{ rugi daya total}}{V_2 I_2 \cos \phi + \text{rugi daya total}}$$

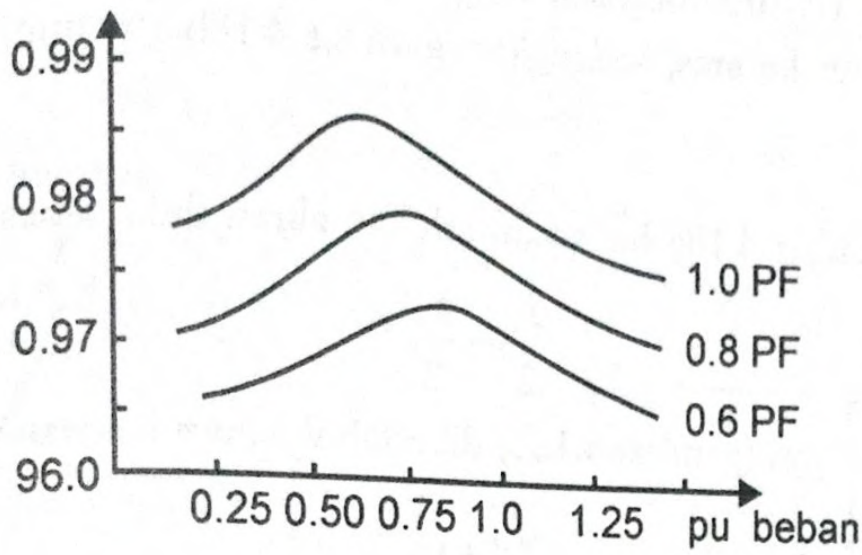
$$\eta = 1 - \frac{\text{rugi daya total } V_2 I_2}{\cos \phi + \text{rugi daya total } V_2 I_2}$$

bila rugi daya total $V_2 I_2 = X = \text{konstan}$.

maka:

$$\eta = 1 - \frac{X}{\cos \phi + X}$$

$$\eta = 1 - \frac{X / \cos \phi}{1 + X / \cos \phi}$$

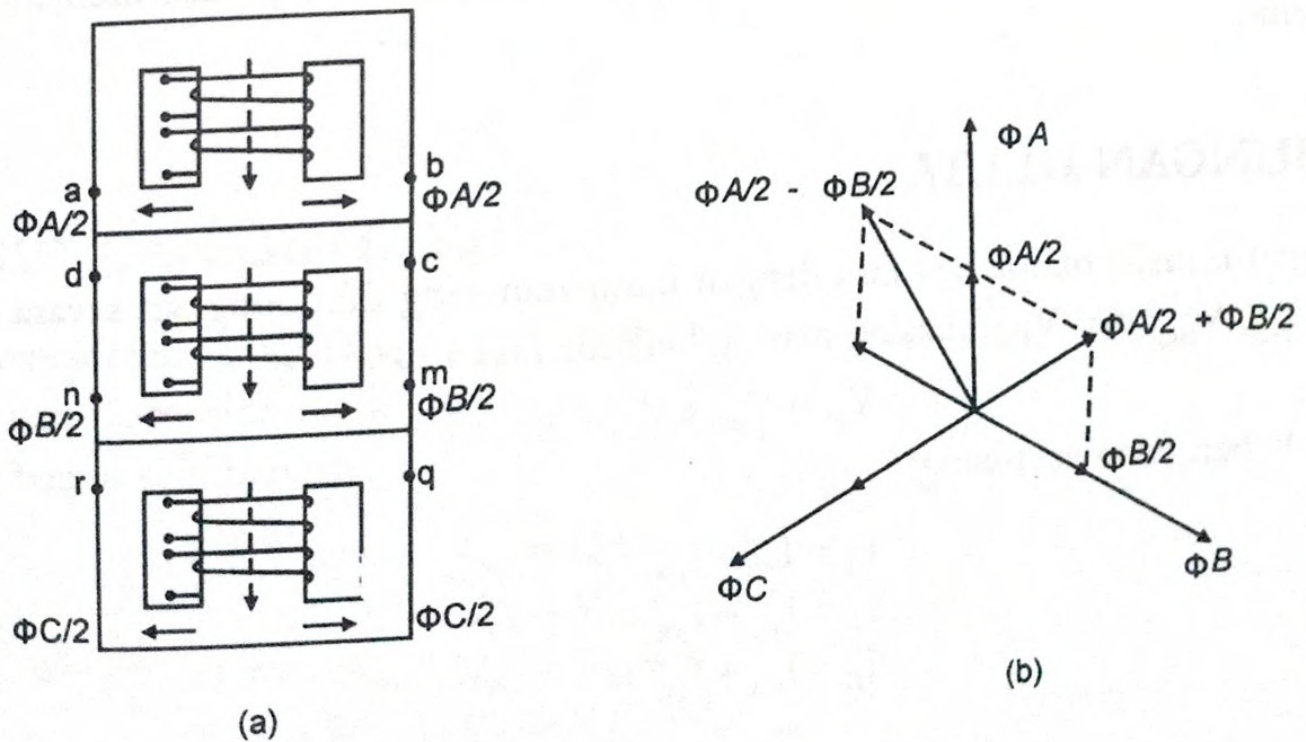


Gambar 24.17

Hubungan antara efisiensi dengan beban pada $\cos \phi$ yang berbeda-beda dapat dilihat pada gambar 24.17.

TRANSFORMATOR TIGA FASA

Transformator tiga fasa digunakan karena pertimbangan ekonomi. Dari pembahasan berikut ini akan terlihat bahwa pemakaian bahan inti besi pada transformator tiga fasa



Gambar 24.18

akan jauh lebih sedikit dibandingkan dengan pemakaian tiga buah transformator fasa tunggal. Gambar 24.18a menunjukkan tiga buah transformator fasa tunggal tipe cangkang yang disusun ke atas, sedangkan gambar 4.18b menunjukkan hubungan vektornya.

Pada bidang abcd gambar 4.18a hanya diperlukan aliran fluks sebesar:

$$\frac{\phi_A}{2} - \frac{\phi_B}{2}$$

dan dari gambar vektornya (gambar 4.18b) diketahui bahwa besaran vektornya adalah:

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \phi_A$$

Apabila digunakan transformator fasa tunggal pada bagian tersebut akan mengalir fluks sebesar $\frac{1}{2}\phi_A$ dan $\frac{1}{2}\phi_B$, atau sebesar ϕ_A . Demikian juga halnya untuk bidang nmqr. Jadi pemakaian bahan inti besi jelas menunjukkan penghematan pada transformator tiga fasa. Penghematan tersebut akan lebih terasa lagi bila polaritas transformator diubah sedemikian rupa sehingga arah ϕ_B ke atas, sehingga fluks yang mengalir pada bidang abcd menjadi:

$$\frac{\phi_A}{2} + \frac{\phi_B}{2}$$

dan besaran vektornya menjadi hanya:

$$\frac{1}{2} \times \phi_A \quad (\text{gambar 24.18})$$

Ditambah dengan sistem pendingin yang baik, transformator tiga fasa menjadi lebih ekonomis.

HUBUNGAN DELTA

Tegangan transformator tiga fasa dengan kumparan yang dihubungkan secara delta, yaitu V_{AB} , V_{BC} , dan V_{CA} , masing-masing berbeda fasa 120° .

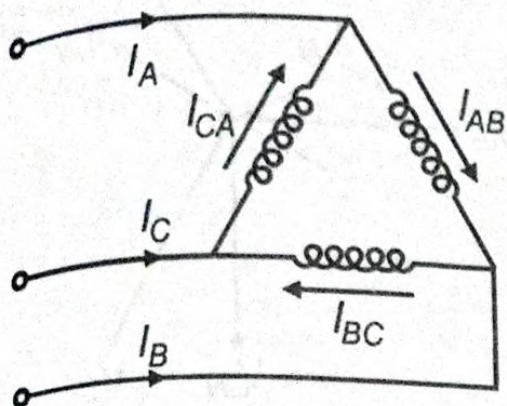
$$V_{AB} + V_{BC} + V_{CA} = 0$$

Untuk beban yang seimbang:

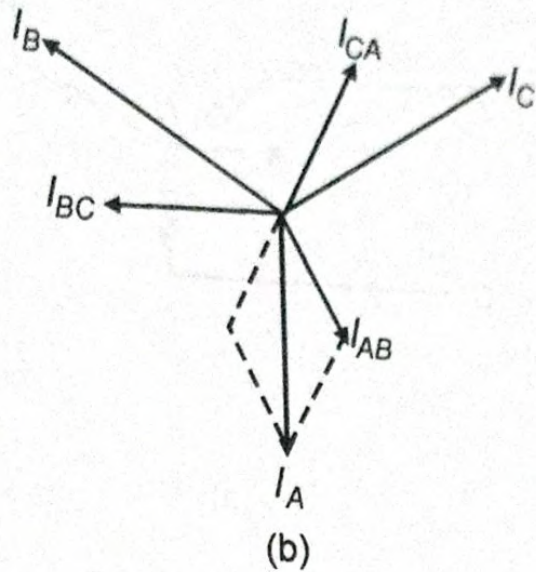
$$I_A = I_{AB} - I_{CA}$$

$$I_B = I_{BC} - I_{AB}$$

$$I_C = I_{CA} - I_{BC}$$



(a)



(b)

Gambar 24.19

Dari vektor diagram (gambar 4.19b) diketahui bahwa arus (jala-jala) I_A adalah $\sqrt{3} \times$ arus fasa I_{AB} . Tegangan jala-jala pada hubungan delta sama dengan tegangan fasanya.

VA hubungan delta

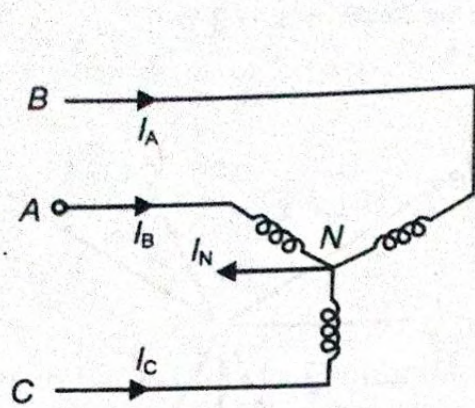
$$\begin{aligned}
 &= 3V_P I_P \\
 &= 3V_L \left(\frac{I_L}{\sqrt{3}} \right) \\
 &= \sqrt{3} V_L I_L
 \end{aligned}$$

HUBUNGAN BINTANG

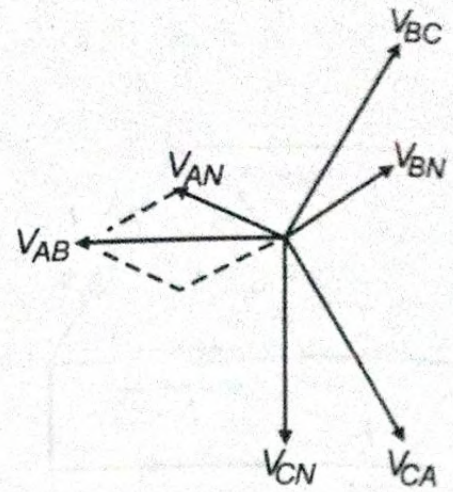
Arus transformator tiga fasa dengan kumparan yang dihubungkan secara bintang yaitu, I_A , I_B , dan I_C , masing-masing berbeda fasa 120°

Untuk beban seimbang:

$$\begin{aligned}
 I_N &= I_A + I_B + I_C \\
 V_{AB} &= V_{AN} + V_{BN} = V_{AN} - V_{BN} \\
 V_{BC} &= V_{BN} - V_{CN} \\
 V_{CA} &= V_{CN} - V_{AN}
 \end{aligned}$$



(a)



(b)

Gambar 24.20

Dari gambar 4.20a dan gambar 4.20b diketahui bahwa untuk hubungan bintang berlaku hubungan:

$$V_{AB} = \sqrt{3}V_{AN}$$

Atau

$$V_p = \sqrt{3}V_L$$

Lalu

$$I_p = I_L$$

Jadi,

VA hubungan bintang

$$\begin{aligned} &= 3V_p I_p \\ &= 3 \left(\frac{V_L}{\sqrt{3}} \right) I_L = \sqrt{3} V_L I_L \end{aligned}$$

TRANSFORMATOR OTO

Suatu transformator fasa tunggal dengan perbandingan lilitan 3.1 (ab:cd) pada gambar 4.21a akan menjadi suatu transformator oto apabila sebagian kumparan primer merupakan bagian dari kumparan sekundernya (gambar 24.21b). Dengan mengabaikan rugi impedansi, berlaku hubungan:

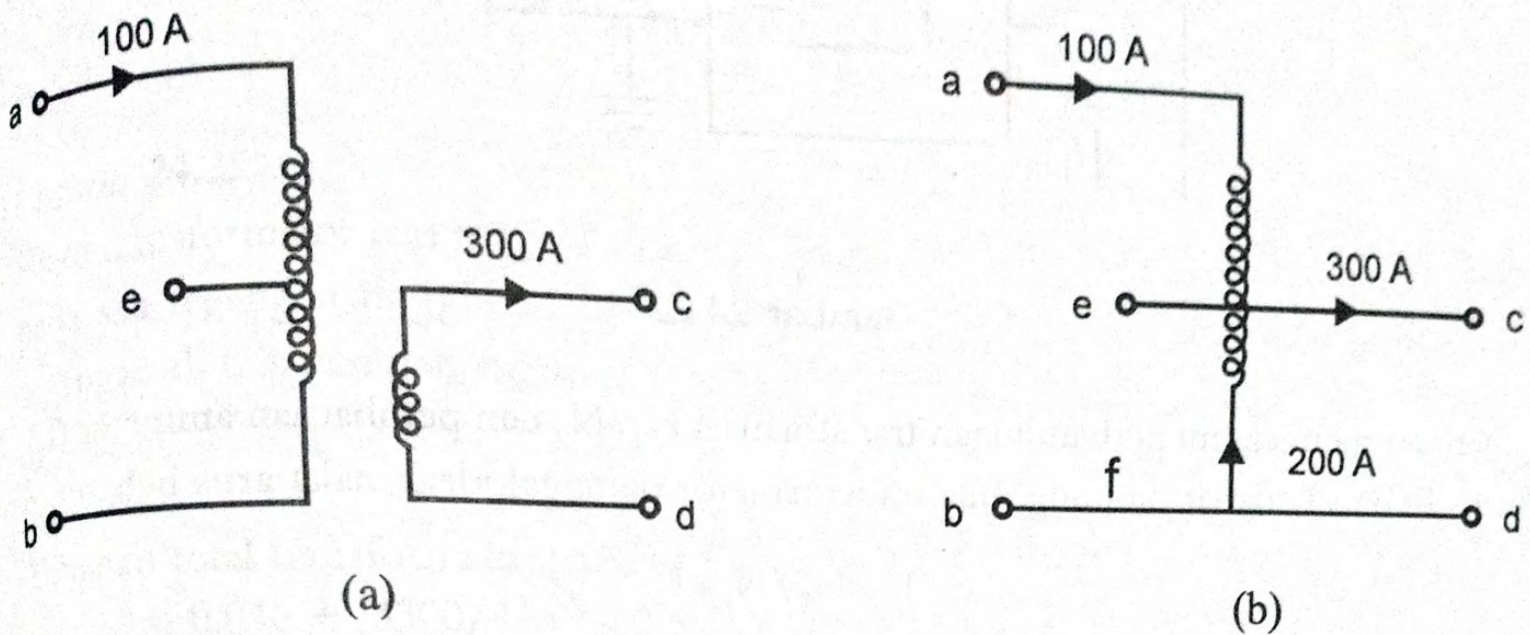
$$V_{ab} = 3V_{cd}$$

$$I_{dc} = 3I_{ab}$$

$$I_{ab} = 100 \text{ A dan } I_{dc} = 300 \text{ a}$$

Untuk transformator oto diperoleh

$$I_{ef} = I_{dc} - I_{ab} = 300 \text{ A} - 100 \text{ A} = 200 \text{ A.}$$

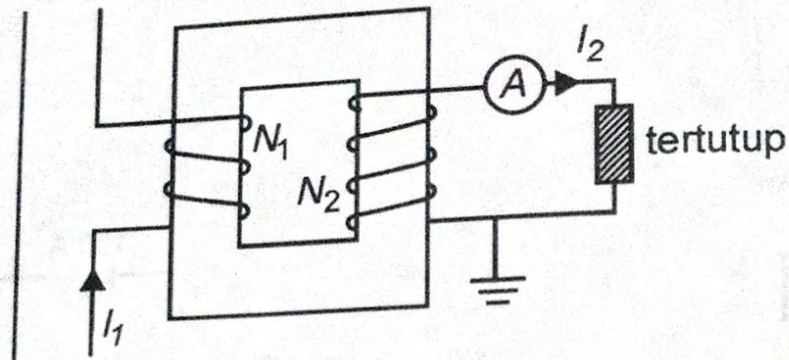


Gambar 24.21

Pada transformator oto terlihat bahwa arus di bagian kumparan ef yaitu $I_{ef} = 300 \text{ A} - 100 \text{ A}$, sedangkan pada transformator fasa tunggal biasa keseluruhan arus yang mengalir pada bagian tersebut (kumparan primer dan sekunder) adalah $100 \text{ A} + 300 \text{ A} = 400 \text{ A}$. Dengan demikian terdapat penghematan tembaga pada transformator oto karena berkurangnya arus yang mengalir pada bagian kumparan ef dari 400 A menjadi 200 A saja. Meskipun demikian transformator oto mempunyai juga kelemahan karena adanya hubungan konduktif antara kumparan tegangan tinggi dan tegangan rendah, sehingga suatu kesalahan peletakan tegangan tinggi menjadi tegangan rendah dapat mengakibatkan kerusakan.

TRANSFORMATOR ARUS

Transformator arus digunakan untuk mengukur arus beban suatu rangkaian. Dengan menggunakan transformator arus maka arus beban yang besar dapat diukur dengan hanya menggunakan pengukur arus (ammeter) yang kecil.



Gambar 24.22

Dengan mengetahui perbandingan transformasi N_1/N_2 dan pembacaan ammeter (I_2), arus beban I_1 dapat dihitung. Bila transformator dianggap ideal maka arus beban:

$$I_1 = N_2/N_1 \times I_2$$

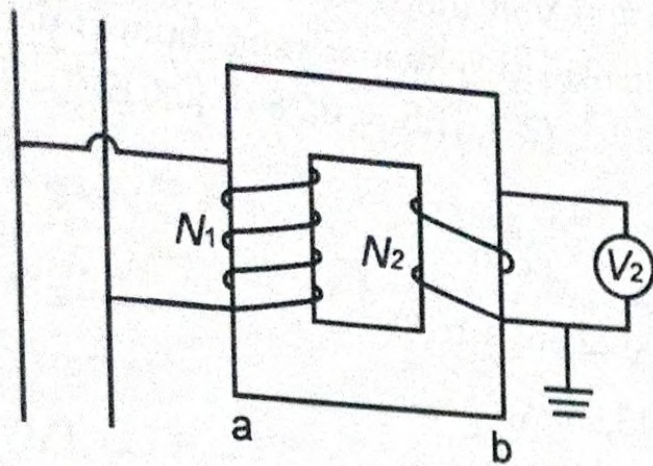
Untuk menjaga agar fluks (ϕ) tidak berubah, maka perlu diperhatikan agar rangkaian sekunder selalu tertutup. Dalam keadaan rangkaian sekunder terbuka, ggm N_2I_2 akan sama dengan nol (karena $I_2 = 0$) sedangkan ggm N_1I_1 tetap ada, sehingga fluks normal (ϕ) akan terganggu.

TRANSFORMATOR TEGANGAN

Transformator tegangan digunakan untuk mengukur tegangan. Dengan mengetahui N_1 dan N_2 , membaca tegangan V_2 , serta menganggap transformator ideal maka tegangan V_1 adalah:

$$V_1 = N_1/N_2 \times V_2$$

Pentanahan rangkaian sekunder diperlukan untuk mencegah adanya beda potensial yang besar antara kumparan primer dan sekunder (antara titik a dan b) pada saat isolasi kumparan primer rusak.



Gambar 24.23

Contoh 24.2:

Suatu transformator fasa tunggal 20 kVA 3300 V/440 V mempunyai tahanan 2,5 Ohm pada sisi tegangan tinggi dan 0,046 Ohm pada sisi tegangan rendah. Hitung jatuh tegangan di tahanan dan rugi-rugi tembaga pada beban penuh.

Solusi:

$$\begin{aligned} \text{Tahanan total transformator pada sisi 440 volt} \\ &= 0.046 + (3300/440)^2 \times 2.5 \text{ ohm} \\ &= 0.091 \text{ ohm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Arus beban penuh pada sisi 440 volt} \\ &= \frac{20 \times 1000}{440} = 45.5 \text{ ampere} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Jadi, jatuh tegangan di tahanan} \\ &= 45.5 \times 0.091 \\ &= 4.15 \text{ volt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Rugi-rugi tegangan pada beban penuh} \\ &= (45.5)^2 \times 0.091 = 189 \text{ watt} \end{aligned}$$

Contoh 24.3:

Suatu transformator fasa tunggal 400 V/120 V dengan frekuensi 50 Hz mensuplai beban dengan impedansi $2 + j1$ ohm. Impedansi kumparan sisi tegangan tinggi $0.55 + j0.22$ ohm dan kumparan sisi tegangan rendah mempunyai impedansi $0.028 + j0.012$ ohm. Hitung arus pada sisi primer dan sekunder, tegangan beban dan daya yang diserap beban?

Solusi:

$$\begin{aligned} & \text{Impedansi total pada sisi 400 Volt transformator} \\ &= (0,55 + j0,22) + \text{Impedansi sisi sekunder yang ditinjau dari sisi primer.} \\ &= 0,55 + j0,22 + (400/120)^2 (2 + j1,5 + 0,28 + j0,012) \\ &= 22,86 + j16,85 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Arus primer:} &= \frac{400}{\sqrt{22,86^2 + 16,85^2}} \\ &= 13,96 \text{ Ampere} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Arus pada sisi tegangan 120 Volt} \\ &= (400/120) \times 13,96 = 46,53 \text{ Ampere} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tegangan terminal sisi sekunder} \\ &= \text{Arus sisi sekunder} \times \text{Impedansi beban pada sisi sekunder} \\ &= 46,53 \times \sqrt{2^2 + 1,5^2} \text{ Ohm} \\ &= 116,3 \text{ Volt} \end{aligned}$$

Faktor daya pada beban adalah

$$\cos \phi = \frac{R}{Z} = \frac{2}{\sqrt{2^2 + 1,5^2}} = 0,8 \text{ tertinggal}$$

Daya yang diserap beban

$$\begin{aligned} &= VI \cos \phi \\ &= 116,32 \times 46,53 \times 0,8 \\ &= 4332 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Contoh 24.4:

Pengujian rangkaian terbuka dan hubung singkat dari suatu transformator 400 V/200 V menunjukkan:

Pengujian rangkaian terbuka (sisi tegangan rendah)

$$V = 200; I = 0,7; W = 95 \text{ Watt}$$

Pengujian hubung singkat (tegangan tinggi)

$$V = 15; I = 20 \text{ A}; W = 130 \text{ Watt}$$

Hitung tahanan dan reaktansi total ditinjau dari sisi tegangan rendah dan hitung parameter-parameter magnetisasi (R_C , X_m).

Solusi:

Parameter-parameter magnetisasi R_C dan X_m ditentukan dengan menggunakan data pengujian dan pengujian rangkaian terbuka.

Dalam keadaan tanpa beban

$$95 = 200 \times I_0 \cos \phi_0$$

$$I_0 \cos \phi_0 = \frac{95}{200} = 0,475 \text{ Ampere}$$

$$I_0 \sin \phi_0 = \sqrt{I^2 - (I_0 \cos \phi_0)^2}$$

$$I_0 \sin \phi_0 = \sqrt{0,7^2 - 0,475^2}$$

$$= 0,514 \text{ Ampere}$$

$$R_C = 200 / I_0 \cos \phi_0 = 200 / 0,475 = 422 \text{ Ohm}$$

$$X_m = 200 / 0,514 = 390 \text{ Ohm}$$

Dengan memakai data pengujian hubung singkat, dapat dicari parameter-parameter R_t . Apabila pengukuran dibuat pada sisi 400 Volt. Parameter-parameter juga dihitung dengan peninjauan pada sisi 400 Volt.

$$I_t^2 R_t^1 = 130 \text{ Watt}$$

$$R_t^1 = \frac{130 \text{ Watt}}{20 \times 20 \text{ Ampere}} = 0,325 \text{ Ohm}$$

$$Z_t = \frac{15 \text{ Volt}}{20 \text{ Ampere}} = 0,75 \text{ Ohm}$$

$$X_t^1 = \sqrt{0,75^2 - 0,325^2} \text{ Ohm} = 0,677 \text{ Ohm}$$

$$R_t = R_t^1 \times \left(\frac{200}{400} \right)^2 \text{ Ohm}$$
$$= 0,169 \text{ Ohm}$$

Jadi

$$\eta = \frac{12500 \text{ Watt}}{13140 \text{ Watt}} \times 100\% = 97,5\%$$

Contoh 24.5:

Pengujian rangkaian terbuka dan hubung singkat dari transformator fasa tunggal 5 kVA, 250 V/125 V, 50 Hz memberikan hasil sebagai berikut. Pengujian rangkaian terbuka (sisi tegangan tinggi):

$$V = 250; I = 0,7 \text{ A}; W = 90 \text{ Watt}$$

Pengujian hubung singkat (sisi tegangan rendah):

$$V = 12; I = 30 \text{ A}; W = 90 \text{ Watt}$$

Hitung

- (a) Efisiensi beban penuh dengan faktor daya 0,8 tertinggal
(b) Tegangan jatuh pada sisi tegangan rendah, jika pada beban penuh faktor dayanya 0,8 tertinggal.

Solusi:

Rugi-rugi tembaga = 90 Watt

$Z_{ek} =$ Impedansi ekuivalen yang ditinjau dari sisi 125 Volt = $12/30 = 0,4$ Ohm

Misal

$R_{ek} =$ Tahanan ekuivalen total yang ditinjau dari sisi 125 Volt

sehingga $30^2 R_{ek} = 90$ Watt

$R_{ek} = 90/900 \text{ A} = 0,1$ Ohm

Jadi $X_{ek} = \sqrt{0,4^2 - 0,1^2} = 0,386$ Ohm

Tegangan jatuh pada beban penuh dengan faktor daya 0,8 tertinggal

$$= I_{FL} (R_{ek} \cos \phi + X_{ek} \sin \phi)$$

$$I_{FL} = \frac{5 \times 1000}{125} = 40 \text{ Ampere}$$

Jatuh tegangan = $40(0,1 \times 0,8 + 0,386 \times 0,6)$ Volt

$$= 12,46 \text{ Volt}$$

Efisiensi pada beban penuh dengan faktor daya 0,8 tertinggal

$$\begin{aligned} &= \frac{5000 \times 0,8}{5000 \times 0,8 + 90 + 90 \times \left(\frac{40}{30}\right)^2} \\ &= \frac{4000}{4250} \times 100\% \\ &= 94,2\% \end{aligned}$$