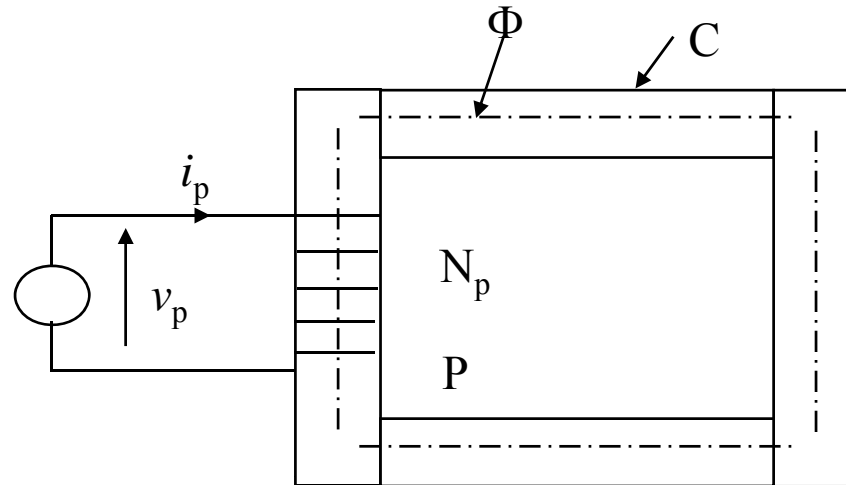





TRANSFORMATOR



Transformator terdiri dari sebuah inti terbuat dari laminasi-laminasi besi yang terisolasi dan kumparan dengan N_p lilitan yang membungkus inti. Kumparan ini disuplay tegangan ac v_p yang menghasilkan arus i_p . Akibat arus ini, fluks Φ dihasilkan sesuai persamaan berikut.

$$\Phi = N_p i_p / \mathfrak{R} \quad \dots\dots(1)$$

dimana \mathfrak{R} adalah reluktansi inti.



Karena arus berubah waktu, Φ juga berubah dengan waktu. Gaya gerak listrik (ggl) lawan akan dibangkitkan sesuai persamaan:

$$e_p = N_p \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{.....(2)}$$

Substitute $\Phi = N_p i_p / \mathcal{R}$ into the above equation , then

$$e_p = \frac{N_p^2}{\mathcal{R}} \times \frac{d}{dt}(i_p) \quad \text{.....(3)}$$



Jika i_p sinusoidal, fluks yang dihasilkan juga sinusoidal, yaitu

$$\Phi = \Phi_m \sin 2\pi ft \quad \dots\dots(4)$$

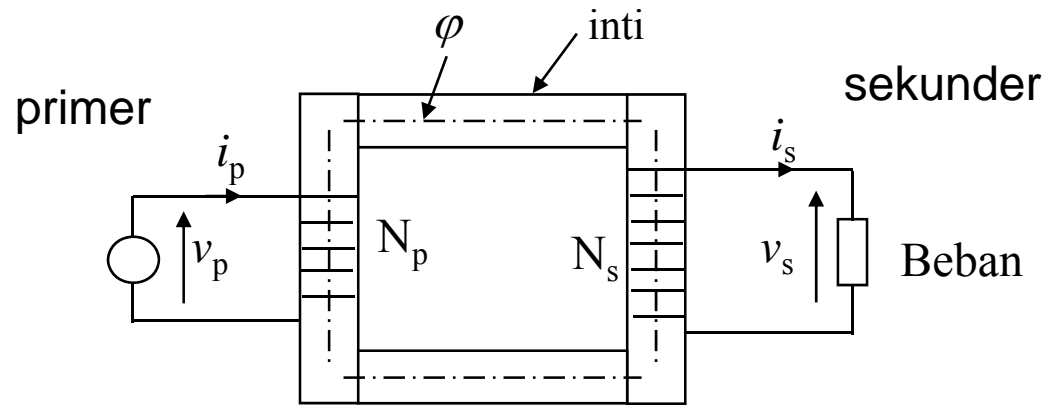
sehingga
$$e_p = N_p \frac{d(\Phi_m \sin 2\pi ft)}{dt}$$

$$e_p = N_p 2\pi f \Phi_m \cos 2\pi ft = N_p 2\pi f \Phi_m \sin (2\pi ft + \pi/2) \quad \dots\dots(5)$$

Nilai tegangan puncak, $E_{pm} = N_p 2\pi f \Phi_m \quad \dots\dots(6)$

dan e_p mendahului fluks sebesar $\pi/2$.

Nilai tegangan rms
$$E_p = \frac{E_{pm}}{\sqrt{2}} = 0.707 \times N_p 2\pi f \Phi_m = 4.44 N_p f \Phi_m \dots\dots(7)$$



Jika sebuah kumparan lain dililitkan disisi lain inti dengan jumlah lilitan N_s , maka fluks yang mengalir pada inti akan menginduksikan ggl e_s yang diberikan oleh:

$$e_s = N_s \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{.....(8)}$$



Dari (2) dan (8) didapatkan
$$\frac{v_s}{v_p} = \frac{N_s}{N_p} \quad \dots\dots(9)$$

atau dalam nilai rms nya
$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p} \quad \dots\dots(10)$$

Jika dihubungkan dengan beban, i_s akan mengalir pada beban, ggl pada beban akan sama dengan ggl pada input, sehingga diperoleh (dalam nilai rms)

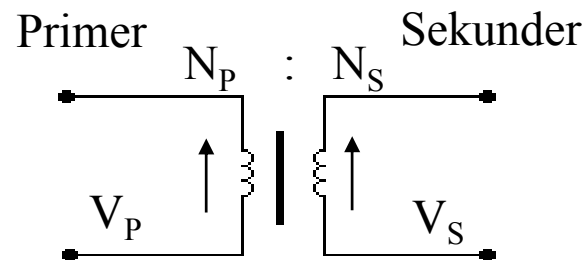
$$N_p I_p = N_s I_s \quad \dots\dots(11)$$

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p} \quad \dots\dots(12)$$

Pada trafo ideal, energi yang ditransfer akan sama dengan input. Jadi, daya pada primer sama dengan daya sekunder.

$$P_p = P_s$$

$$\text{atau } I_p V_p = I_s V_s$$



Simbol transformator ideal

Contoh 1

Sebuah trafo satu fasa 250 kVA, 11000 V / 400 V, 50 Hz mempunyai 80 lilitan sekunder. Hitung:

- (a) Harga arus yang sesuai pada sisi primer dan sekunder
- (b) Perkiraan jumlah lilitan primer;
- (c) Nilai fluks maksimum.

(a) Arus beban penuh primer $I_p = \frac{P}{V_p} = \frac{250 \times 10^3}{11000} = 22.7 \text{ A}$

Arus beban penuh sekunder $I_s = \frac{P}{V_s} = \frac{250 \times 10^3}{400} = 625 \text{ A}$

(b) Jumlah kumparan primer

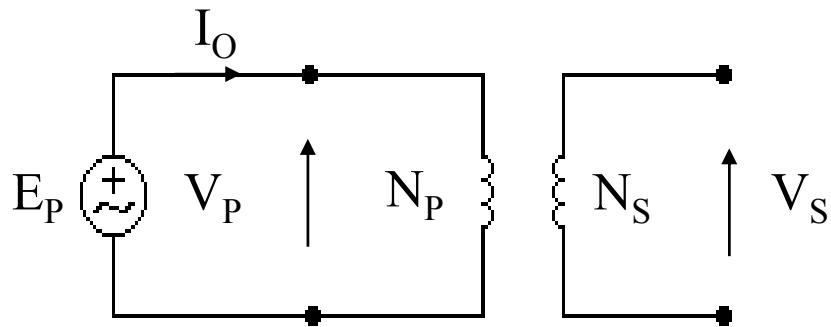
$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p}$$

$$\longrightarrow N_p = \frac{N_s}{V_s} \times V_p = \frac{80}{400} \times 11000 = 2200$$

(c) Fluks maksimum

$$E = 4.44 N f \Phi_m$$

$$\Phi_m = \frac{E_s}{4.44 N_s f} = \frac{400}{4.44 \times 80 \times 50} = 0,0225 \text{ Wb}$$



Transformator ideal tanpa beban

I_o adalah arus tanpa beban yang mengalir pada rangkaian primer ketika rangkaian sekunder terbuka. Arus ini terdiri atas I_M yang diperlukan untuk menghasilkan fluks pada ini (sefasa dengan fluks) dan I_C yang mengkompensasi rugi-rugi histerisis dan arus pusar.

V_P = Tegangan suplay kepada kumparan primer, mendahului fluks 90° .

E_P = ggl yang terinduksi pada kumparan primer dan sefasa V_P .

V_S = ggl induksi pada kumparan sekunder, tertinggal 90° dari flux.

I_M = arus magnetisasi untuk menghasilkan fluks, sefasa dengan fluks.

I_C = arus untuk mengkompensasi rugi-rugi histerisis dan arus pusar.

I_o = arus tanpa beban, diberikan oleh $I_o = \sqrt{I_M^2 + I_C^2}$

$$\text{Faktor daya } \cos \phi_o = \frac{I_C}{I_o}$$

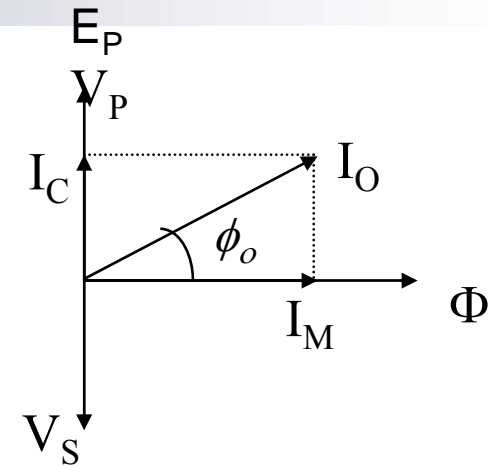
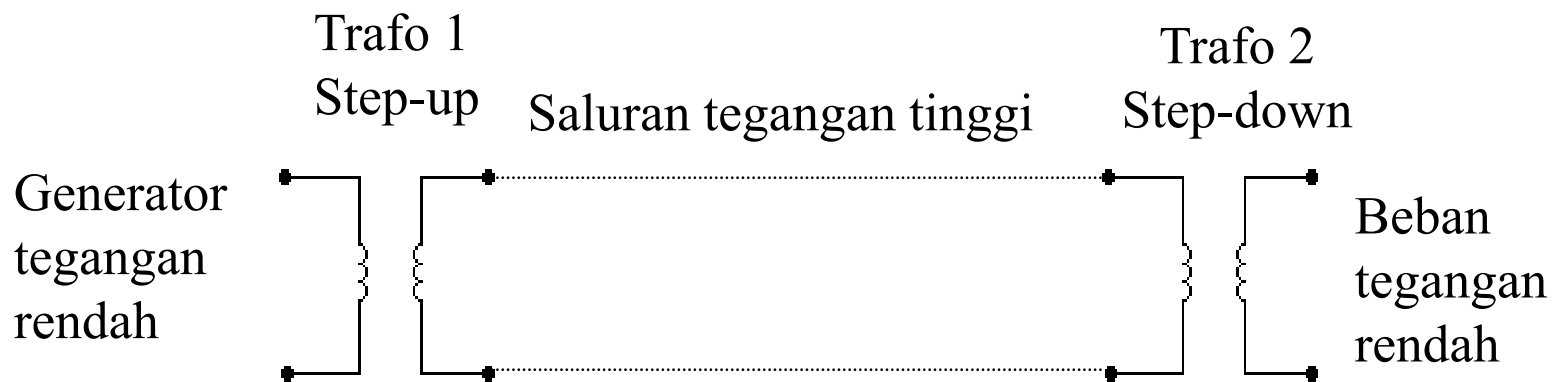


Diagram fasor trafo tanpa beban

Aplikasi Transformator

Transformator mengkonversi energi menjadi tegangan tinggi dan mengirimkannya melalui saluran tegangan tinggi. Pada beban, energi dalam tegangan tinggi dikonversi menjadi tegangan rendah. Dengan cara ini akan menurunkan rugi-rugi selama transfer energi.




Contoh 2

Sebuah transformator satu fasa mempunyai 480 lilitan primer dan 90 lilitan sekunder. Panjang jalur fluks rata-rata pada inti 1,8 m dan sambungannya ekuivalen dengan celah udara 0,1 mm. Kuat medan magnet untuk rapat fluks 1,1 T adalah 400 A/m. Rugi-rugi inti pada frekuensi 50 Hz adalah 1,7 W/kg dan massa jenis inti 7800 kg/m³.

Jika harga fluks maksimum 1,1 T ketika tegangan 2200 V, 50 Hz diberikan kepada kumparan primer, hitunglah:

- (a) Luas penampang inti
- (b) Tegangan sekunder tanpa beban
- (c) Arus primer dan faktor daya beban nol



(a) $E = 4.44 N f \Phi_m$

$$\Phi_m = \frac{E_p}{4.44 N_p f} = \frac{2200}{4.44 \times 480 \times 50} = 0.0206 \text{ Wb}$$

$$\Phi = B \times A$$

$$A = \frac{\Phi_m}{B} = \frac{0.026}{1.1} = 0.0187 \text{ m}^2$$

(b) $\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p}$

$$N_p = \frac{N_s}{V_s} \times V_p = \frac{90}{480} \times 2200 = 413 \text{ V}$$

(c) Gaya gerak magnet (mmf) pada inti adalah

$$H_C \ell_C = 400 \times 1.8 = 720 \text{ A}$$


$$\text{mmf celah udara } H_a \ell_a = \frac{B}{\mu_0} \times \ell_a = \frac{1.1}{4\pi \times 10^{-7}} \times 0.0001 = 87.5 \text{ A}$$

$$\text{Mmf total} = 720 + 87.5 = 807.5 \text{ A}$$

$$H\ell = NI$$

$$\therefore \text{ Arus magnetisasi maksimum } I_{M \max} = \frac{H\ell}{N} = \frac{807.5}{480} = 1.682 \text{ A}$$

$$\text{Nilai rms nya } I_{M \text{ rms}} = 0.707 I_{M \max} = 0.707 \times 1.682 = 1.19 \text{ A}$$


$$\text{Volume inti} = \ell \times A = 1.8 \times 0.0187 = 0.0337 m^3$$

$$\text{Massa inti} = \text{Vol} \times \text{massa jenis} = 0.0337 \times 7800 = 263 \text{ kg}$$

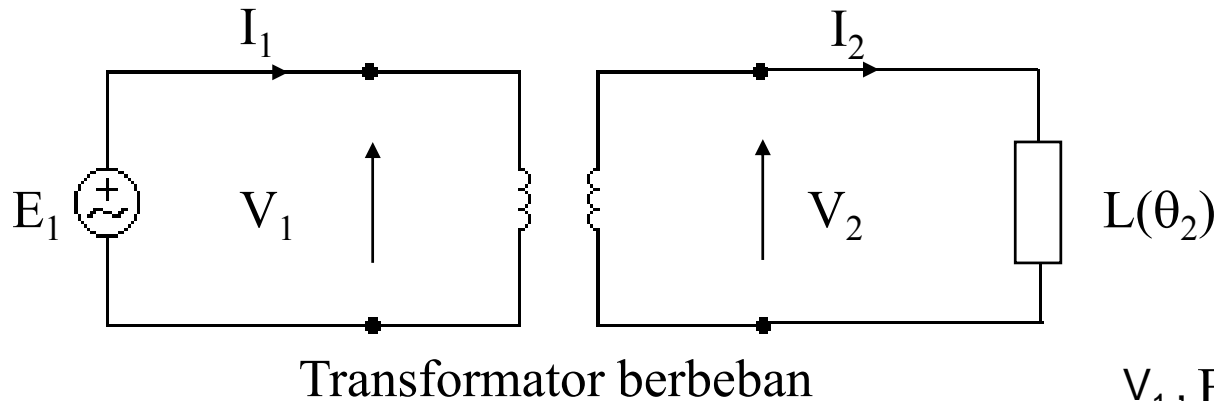
$$\text{Rugi inti} = 263 \times 1.7 = 447 \text{ W}$$

$$\text{Arus rugi-rugi inti} \quad I_C = \frac{P}{V_p} = \frac{447}{2200} = 0.203 \text{ A}$$

$$\text{Arus tanpa beban} \quad I_o = \sqrt{I_M^2 + I_C^2} = \sqrt{1.19^2 + 0.203^2} = 1.21 \text{ A}$$

$$\text{Faktor daya} \quad \cos \phi = \frac{I_C}{I_o} = \frac{0.203}{1.21} = 0.168 \quad \textit{lagging}$$

Transformator Berbeban



$L(\theta_2)$ = Beban dengan faktor daya $\cos \theta_2$

V_1 = tegangan suplay

E_1 = ggl induksi kumparan primer

V_2 = tegangan pada beban

E_2 = ggl induksi kumparan sekuder

I_1 = arus primer

I_2 = arus sekunder

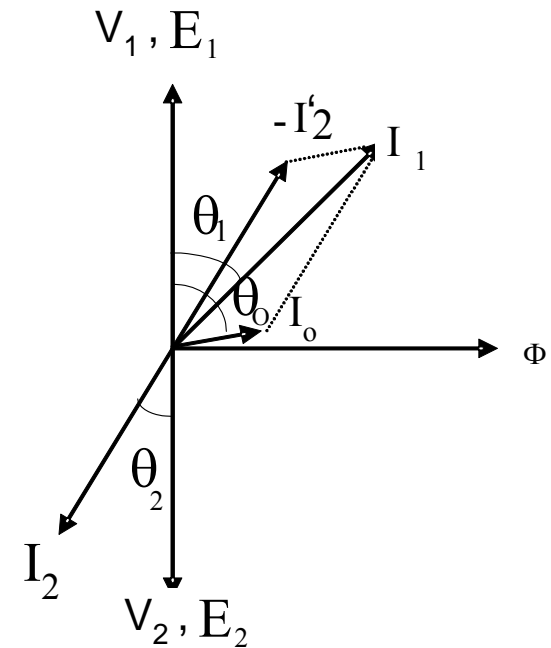


Diagram fasor

Contoh 2

Sebuah trafo 1 fasa mempunyai 1000 lilitan primer dan 200 lilitan sekunder. Arus tanpa beban 3 A pada PF 0,2 lagging. Arus sekunder pada PF 0,8 lagging adalah 280 A. Hitung arus primer dan faktor dayanya. Asumsikan tidak ada jatuh tegangan pada kumparan.

Dari persamaan 12

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p}$$

Maka

$$I_p = \frac{N_s}{N_p} \times I_s = \frac{200}{1000} \times 280 = 56 A$$

$$\cos \phi_{2'} = 0.8 \quad \therefore \sin \phi_{2'} = 0.6$$

$$\cos \phi_o = 0.2 \quad \therefore \sin \phi_o = 0.98$$

Penyelesaian komponen vertikal dan horizontal

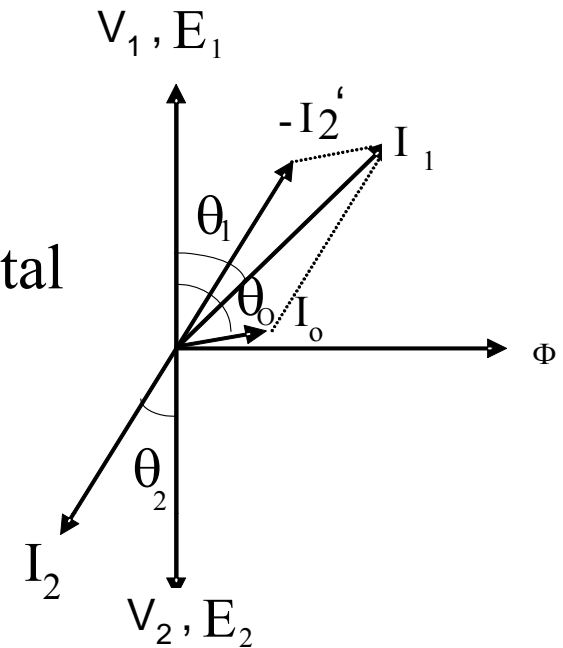
$$\begin{aligned} I_1 \cos \phi_1 &= I_{2'} \cos \phi_{2'} + I_o \cos \phi_o \\ &= (56 \times 0.8) + (3 \times 0.2) = 45.4 A \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_1 \sin \phi_1 &= I_{2'} \sin \phi_{2'} + I_o \sin \phi_o \\ &= (56 \times 0.6) + (3 \times 0.98) = 36.54 A \end{aligned}$$

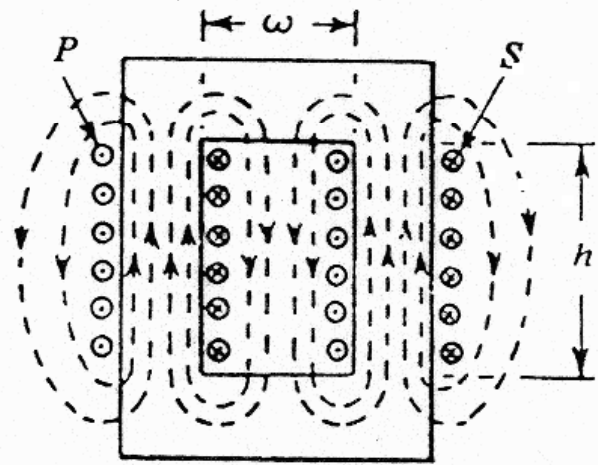
$$I_1 = \sqrt{(45.4)^2 + (36.54)^2} = 58.3 A$$

$$\tan \phi_1 = \frac{36.54}{45.4} = 0.805 \quad \longrightarrow \quad \phi_1 = 38^\circ 50'$$

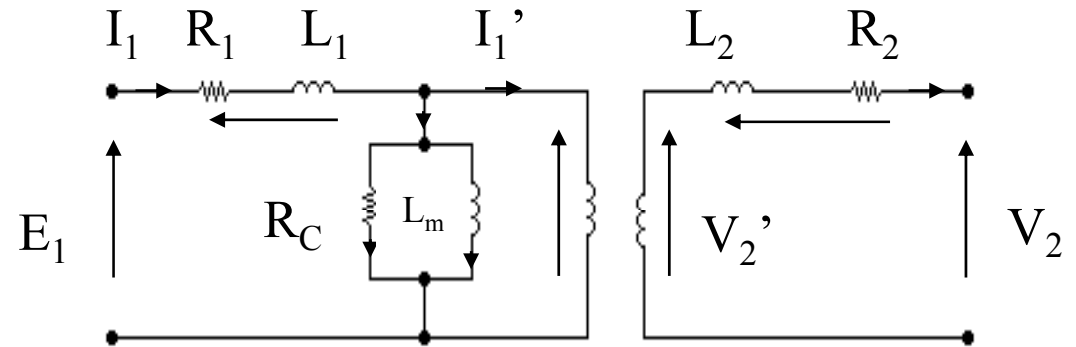
Faktor daya $\cos \phi_1 = \cos 38^\circ 50' = 0.78$ lagging



Fluks bocor



Jalur bocor

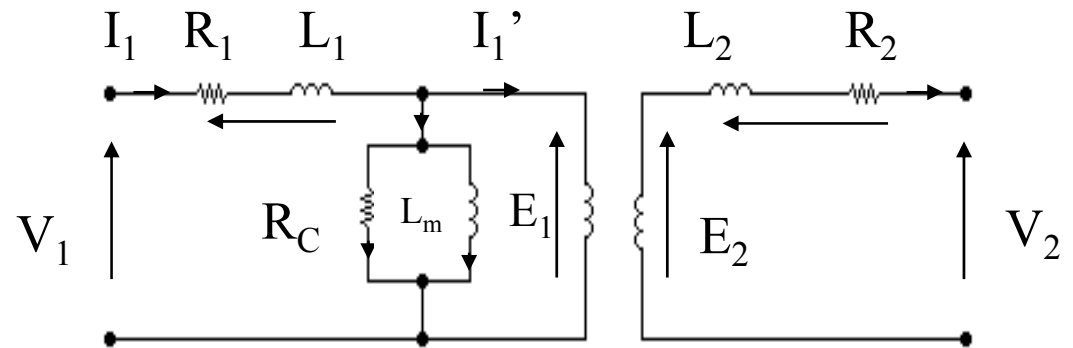


Rangkaian ekivalen transformator

Arus bocor akibat arus sekunder yang menghasilkan fluks yang melawan fluks primer. Sebagian fluks membuat tautan pada kumparannya sendiri dan menghasilkan induksi. Fluks bocor ini dilambangkan sebagai induktansi dengan L_1 dan L_2 .

Ada 4 jenis rugi-rugi pada transformator:

- Daya yang hilang pada penghantar akibat tahanan (I^2R)
- Daya akibat histerisis
- Daya akibat arus pusar
- Daya fluks bocor



Rangkaian ekivalen transformator

R_1 = tahanan penghantar kumparan primer

L_1 = induktansi bocor kumparan primer

R_C = tahanan rugi-rugi inti (histerisis dan arus pusar)

L_m = Induktansi magnetisasi

L_2 = Induktansi bocor kumparan sekunder

R_2 = tahanan penghantar kumparan sekunder

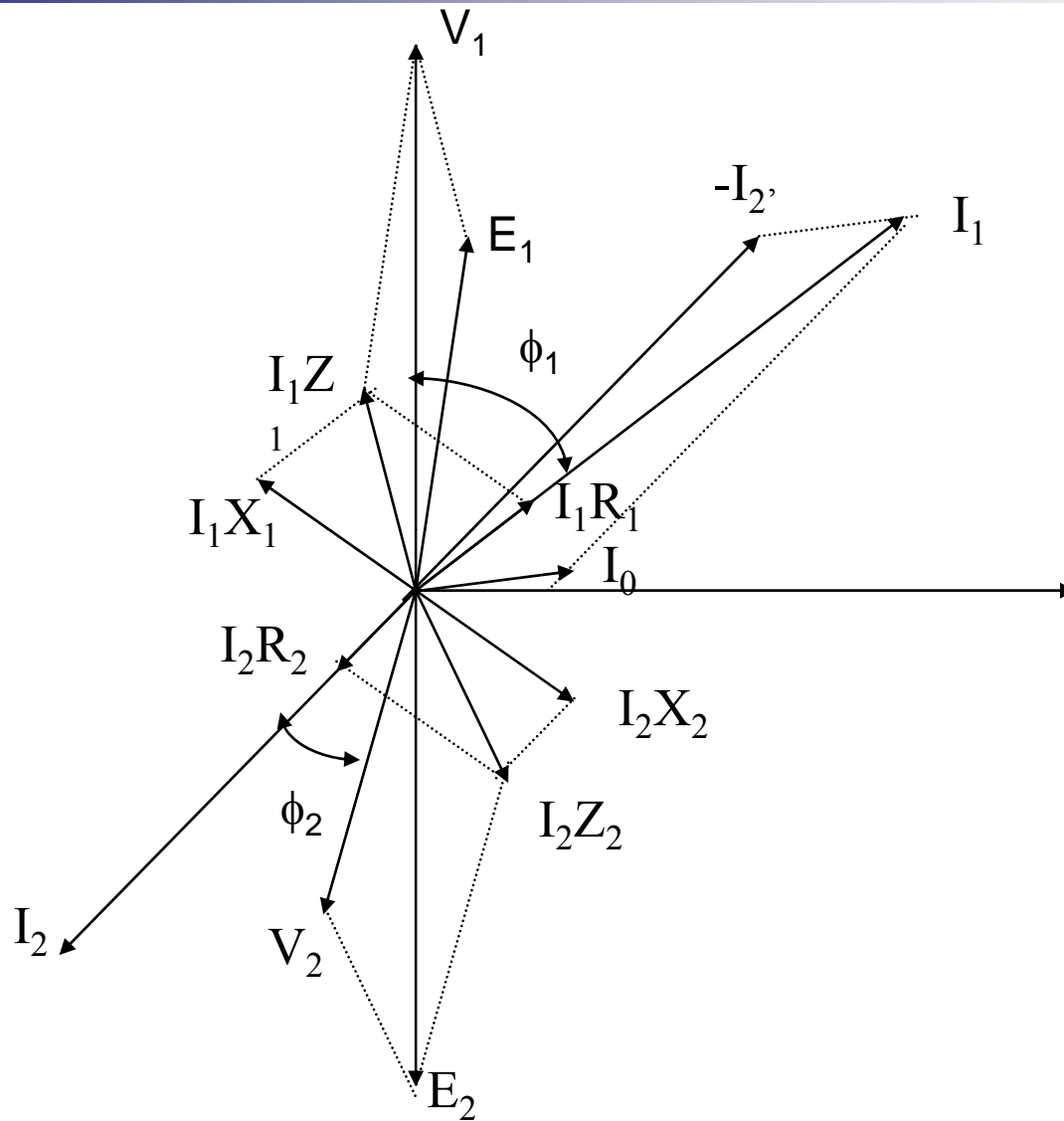
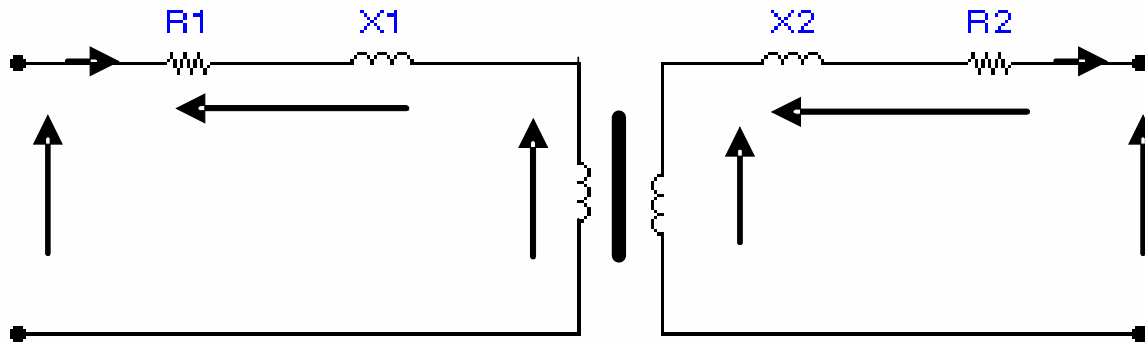


Diagram fasor transformator berbeban

Penyederhanaan rangkaian ekivalen



R_2 dapat digantikan dengan R_2' pada kumparan primer.
Tahanan ekivalennya adalah

$$I_1^2 R_2' = I_2^2 R_2$$

menghasilkan
$$R_2' = R_2 \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2 \approx R_2 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2$$

Untuk reaktansinya
$$X_2' = X_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \approx X_2 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2$$

$$R_e = R_1 + R_2' = R_1 + R_2 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2$$

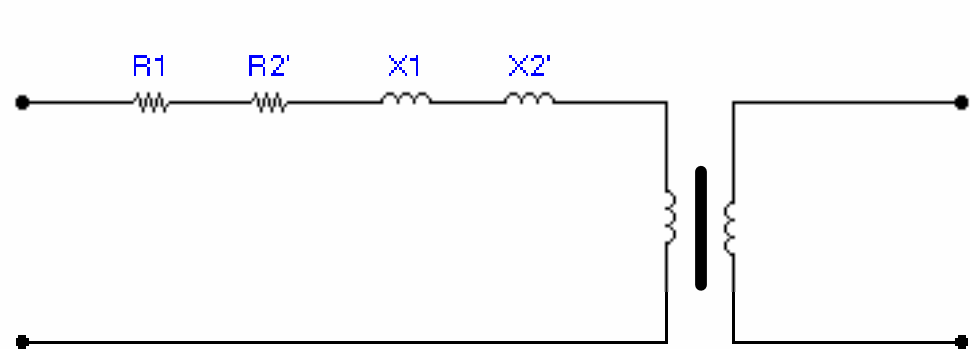
$$X_e = X_1 + X_2' = X_1 + X_2 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2$$

Maka $Z_e = \sqrt{R_e^2 + X_e^2}$

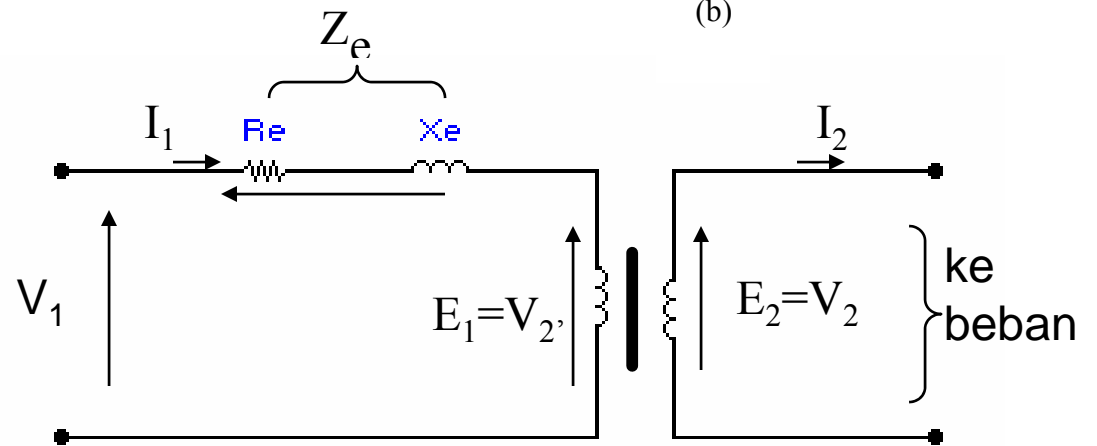
dimana $R_e = Z_e \cos \phi_e$

$$X_e = Z_e \sin \phi_e$$

dan $\tan \phi_e = \frac{X_e}{R_e}$

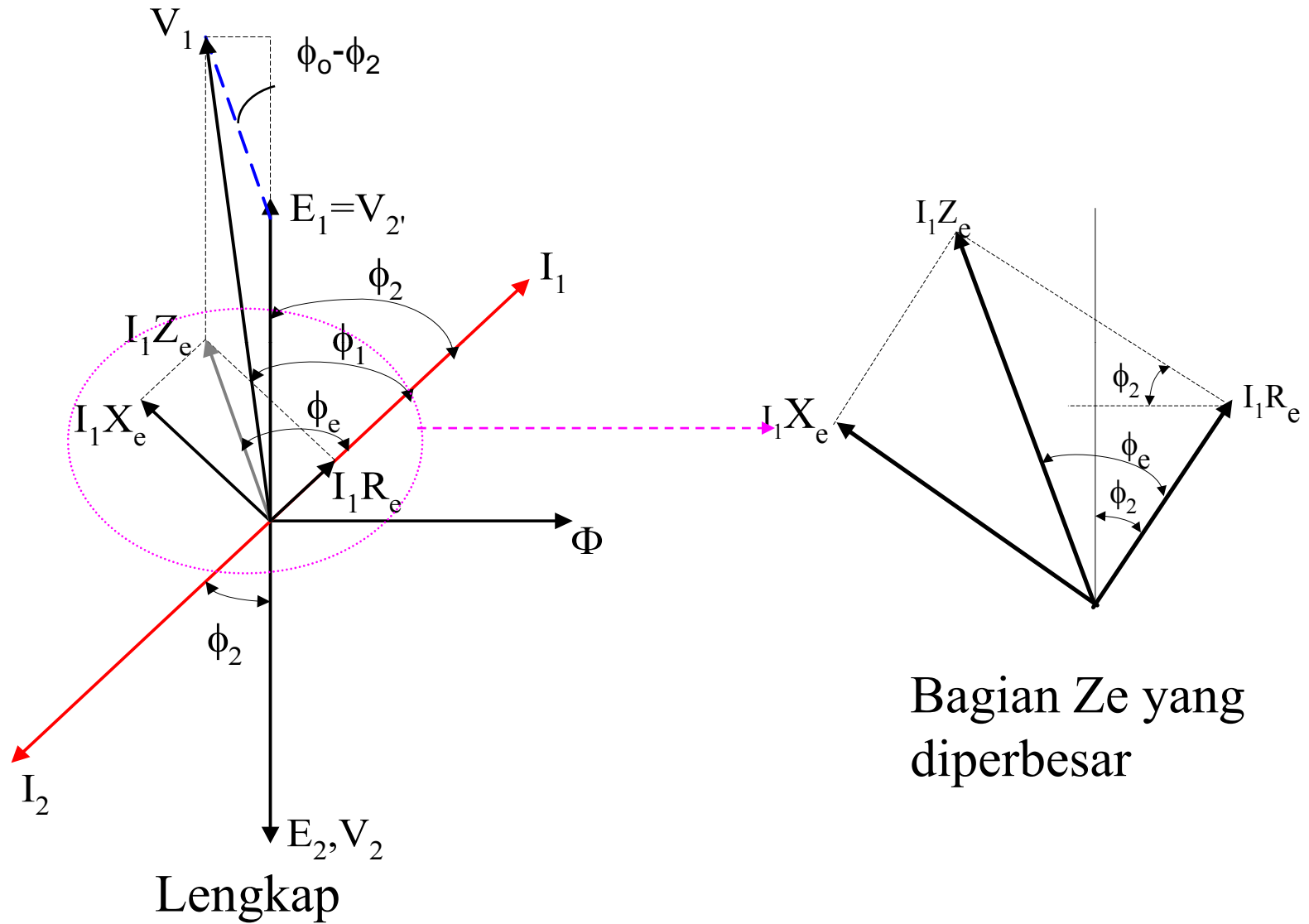


(b)



Penyederhanaan rangkaian ekivalen

Diagram fasor penyederhanaan rangkaian ekivalen transformator



Pengaturan Tegangan Transformator

$$\text{Pengaturan tegangan (VR)} = \frac{\text{tegangan tanpa beban} - \text{tegangan beban penuh}}{\text{tegangan tanpa beban}}$$

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p}$$

$$\text{Tegangan tanpa beban sekunder } V_2 = V_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)$$

Jika disubstitusikan

$$VR = \frac{V_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right) - V_2}{V_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)}$$

V_2 adalah tegangan sekunder beban penuh

Atau

$$VR = \frac{V_1 - V_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)}{V_1}$$
$$= \frac{V_1 - V_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)}{V_1} \times 100 \text{ per cent}$$

Dari diagram fasor dapat dibuktikan

$$VR = \frac{I_1 Z_e \cos(\phi_e - \phi_2)}{V_1}$$


Atau

$$VR = \frac{I_1 (R_e \cos \phi_2 + X_e \sin \phi_2)}{V_1}$$

Contoh 4

Sebuah transformator 100kVA mempunyai 400 lilitan primer dan 800 lilitan sekunder. Tahanan primer dan sekunder berturut-turut 0.3Ω dan 0.01Ω dan reaktansi bocor berturut-turut 1.1Ω dan 0.035Ω . Tegangan suplay 2200V. Hitunglah:

- (a) Impedansi ekivalen yang dipandang dari sisi primer;
- (b) Pengaturan tegangan dan tegangan terminal sekunder pada beban penuh dengan faktor daya (i) 0.8 lagging dan (ii) 0.8 leading.
- (c) Persentasi drop akibat tahanan dan reaktansi bocor pada transformator



(a)

$$R_e = R_1 + R_2 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 = 0.3 + 0.01 \left(\frac{400}{80} \right)^2 = 0.55 \Omega$$

$$X_e = X_1 + X_2 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 = 1.1 + 0.035 \left(\frac{400}{80} \right)^2 = 1.975 \Omega$$

$$Z_e = \sqrt{R_e^2 + X_e^2} = \sqrt{(0.55)^2 + (1.975)^2} = 2.05 \Omega$$

(b) (i)

$$\text{Arus primer beban penuh} = \frac{P}{V} = \frac{100 \times 10^3}{2200} = 45.45 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \text{Pengaturan tegangan} &= \frac{I_1 (R_e \cos \phi_2 + X_e \sin \phi_2)}{V_1} \\ &= \frac{45.45 (0.55 \times 0.8 + 1.975 \times 0.6)}{2200} = 0.0336 \\ &= 3.36 \% \end{aligned}$$


$$\text{Tegangan terminal sekunder tanpa beban} = V_P \times \frac{N_S}{N_P} = 2200 \times \frac{80}{400} = 440V$$

$$\text{Penurunan tegangan} = 440 \times 0.0336 = 14.8V$$


$$\text{Jadi, tegangan beban penuh sekunder} = 440 - 14.8 = 425.2V$$

(b) (ii) faktor daya 0.8 leading

$$\begin{aligned} VR &= \frac{45.45(0.55 \times 0.8 - 1.975 \times 0.6)}{2200} = -0.0154 \\ &= -1.54\% \end{aligned}$$

$$\text{Kenaikan tegangan} = 440 \times 0.0154 = 6.78V$$

$$\text{Tegangan beban penuh sekunder} = 440 + 6.78 = 446.78V$$


$$\text{Drop tahanan} = \frac{\left(\begin{array}{l} \text{arus primer} \\ \text{beban penuh} \end{array} \right) \times \left(\begin{array}{l} \text{tahanan ekivalen} \\ \text{ditinjau dari primer} \end{array} \right)}{\text{tegangan primer}}$$

atau

$$\text{Drop tahanan} = \frac{\left(\begin{array}{l} \text{arus sekunder} \\ \text{beban penuh} \end{array} \right) \times \left(\begin{array}{l} \text{tahanan ekivalen} \\ \text{ditinjau dari sekunder} \end{array} \right)}{\text{Tegangan tanpa beban sekunder}}$$

$$\begin{aligned} \text{Drop tahanan} &= \frac{I_1 R_e}{V_1} = \frac{45.45 \times 0.55}{2200} = \mathbf{0.0114} \\ &= \mathbf{0.0114\%} \end{aligned}$$

Alternatif Dari persamaan 12

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p}$$

Arus sekunder beban penuh $I_s = \frac{N_p}{N_s} I_p = \frac{400}{80} \times 45.45 = 227.2 A$

Tahanan ekivalen ditinjau dari sisi sekunder

$$R_e = R_2 + R_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 = 0.01 + 0.3 \left(\frac{80}{400} \right)^2 = 0.022 \Omega$$

Tegangan sekunder beban penuh $= V_p \times \frac{N_s}{N_p} = 2200 \times \frac{80}{400} = 440V$

$$\begin{aligned} \text{Drop tahanan} &= \frac{\left(\begin{array}{l} \text{ arus sekunder} \\ \text{ beban penuh} \end{array} \right) \times \left(\begin{array}{l} \text{ tahanan ekivalen} \\ \text{ ditinjau dari sisi sekunder} \end{array} \right)}{\text{tegangan tanpa beban sekunder}} = \frac{227.2 \times 0.022}{440} \\ &= \mathbf{0.0114 = 1.14\%} \end{aligned}$$

Reaktansi bocor ekivalen ditinjau dari primer

$$X_e = X_1 + X_2 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 = 1.1 + 0.035 \left(\frac{400}{80} \right)^2 = 1.975 \Omega$$

$$\text{Arus primer beban penuh} = \frac{P}{V} = \frac{100 \times 10^3}{2200} = 45.45 \text{ A}$$

$$\text{Drop reaktansi} = \frac{\left(\begin{array}{c} \text{arus primer} \\ \text{beban penuh} \end{array} \right) \times \left(\begin{array}{c} \text{reaktansi ekivalen} \\ \text{ditinjau dari primer} \end{array} \right)}{\text{tegangan primer}} = \frac{45.45 \times 1.975}{2200}$$

$$= 0.0408 = 4.08\%$$