

MESIN-MESIN LISTRIK (EE5R83)

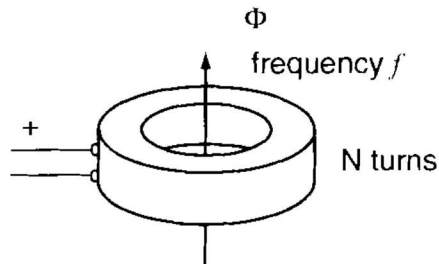
SESI 3:

Konsep dasar, trafo Ideal, dan trafo Non-Ideal

IVAN KUSUMA, ST., Meng.Sc.,

Perhatikan *coil* pada gambar 1 yang mengelilingi fluks Φ . Fluks berubah secara sinusoid dengan frekuensi f dan amplitudo Φ_{\max} . Perubahan nilai fluks akan menginduksi tegangan pada *coil* yang memiliki nilai efektif

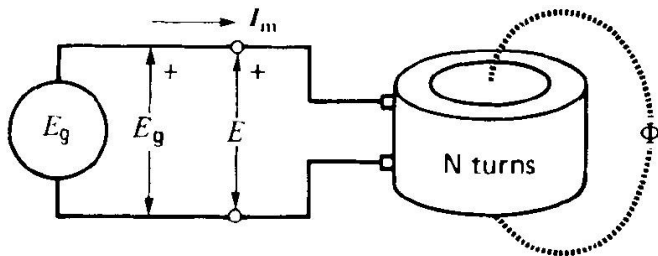
$$E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N \Phi_{\max} \approx 4.44 f N \Phi_{\max} \quad (1)$$



Gambar 1 : Tegangan terinduksi pada *coil* ketika mengelilingi fluks

Gambar 2 menunjukkan *coil* dengan N lilitan dihubungkan dengan sumber tegangan E_g . *Coil* memiliki reaktansi X_m dan mengalirkan arus I_m . Jika resistansi *coil* diabaikan maka

$$I_m = \frac{E_g}{X_m} \quad (2)$$

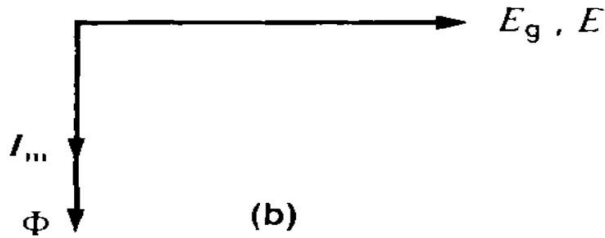


Gambar 2 : Tegangan induksi E pada *coil* sebanding dengan tegangan terapan E_g

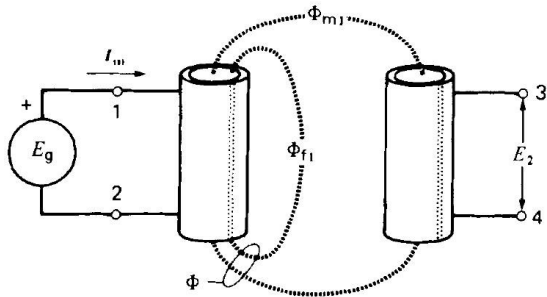
- ▶ Arus sinusoid I_m menghasilkan mmf sinusoid NI_m yang kemudian berubah menjadi fluks sinusoid Φ
- ▶ I_m disebut arus magnetisasi
- ▶ Fluks menginduksi tegangan efektif E
- ▶ Berdasarkan gambar 2, nilai E akan sama dengan E_g , sehingga

$$E_g = 4.44fN\Phi_{max} \quad (3)$$

- ▶ Hubungan fasor antara E_g , E , I_m dan Φ ditunjukkan oleh gambar 3



- ▶ Pada gambar 4, sebuah *coil* dengan inti udara di eksitasi oleh E_g .
- ▶ I_m akan menghasilkan fluks total Φ yang menyebar diruang sekitar *coil*.



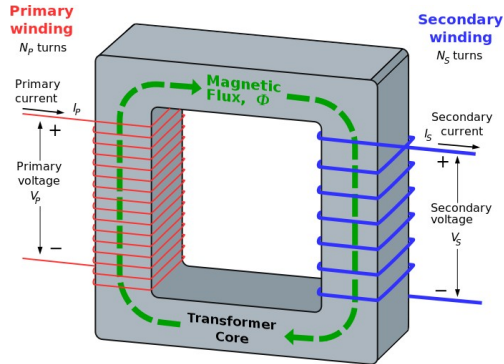
Gambar 4 : Induksi tegangan pada lilitan sekunder

- ▶ Jika kita letakkan sebuah *coil* lain mendekati yang pertama, *coil* baru tersebut akan mengelilingi fluks dengan porsi sebesar Φ_{m_1} dari total fluks Φ .
- ▶ Jika kita letakkan sebuah *voltmeter* diantara kaki 3 dan 4, diperoleh informasi bahwa tegangan induksi ac E_2 muncul pada *coil* yang kedua.
- ▶ Kombinasi dari kedua *coil* disebut **transformator**.

1. lilitan kabel (2 buah atau lebih)

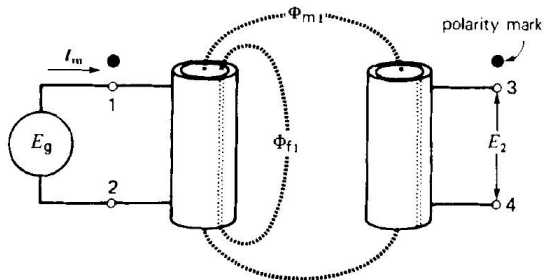
- ▶ lilitan primer N_p
- ▶ lilitan sekunder N_s

2. inti magnetis



Gambar 5 : Transformator

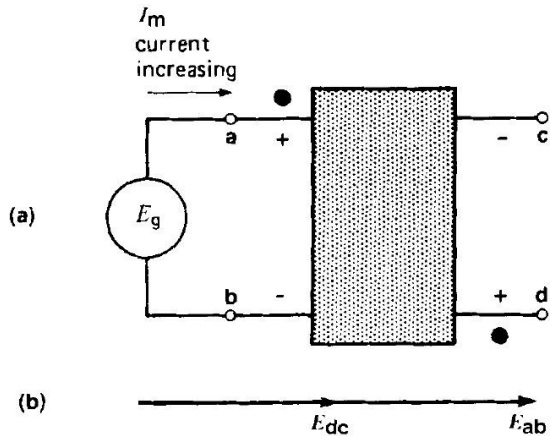
- ▶ Pada gambar 4, Φ_{m1} dan Φ_{f1} sama-sama dihasilkan oleh I_m , sehingga
 - ▶ Φ_{m1} dan Φ_{f1} memiliki fasa yang sama
 - ▶ E_2 akan memiliki fasa yang sama dengan E_g
 - ▶ Terminal 1 akan memiliki fasa yang sama dengan terminal 3
- ▶ Kesamaan ini dapat ditunjukkan dengan memberikan titik disisi terminal 1 dan 3 (seperti yang ditunjukkan gambar 6)



Gambar 6 : Penanda polaritas pada transformator

Sebuah transformator umumnya dipasang dengan sebuah penutup metal sehingga hanya terminal **primer** dan terminal **sekunder** yang bisa diakses beserta penanda polaritas masing-masing. Meskipun transformator menjadi tidak kelihatan, beberapa aturan berikut tetap berlaku pada penanda polaritas

1. Arus yang masuk pada terminal yang memiliki penanda polaritas menghasilkan mmf dan fluks yang bergerak pada arah "positif".
2. Jika satu terminal berpenanda polaritas bersifat positif sementara, maka terminal berpenanda polaritas lain juga bersifat positif sementara.



Gambar 7 : (a)Polaritas seketika pada saat I_m naik (b) Hubungan fasor

Transformator Ideal

1. Tidak ada kebocoran flux magnetik
 - ▶ Flux yang dihasilkan oleh arus primer dan sekunder bergerak terbatas di dalam inti
2. Tidak ada tahanan dalam pada lilitan kabel
 - ▶ Tegangan induksi sama dengan tegangan yang di berikan
3. Permeabilitas inti mendekati tak hingga
 - ▶ Reluktansi inti mendekati nol
4. Inti magnetis bersifat *lose-less*
 - ▶ Tidak ada hysteresis atau arus edy

Berdasarkan Faraday's law of Induction

- ▶ Pada lilitan primer dan sekunder

$$V_p = -N_p \frac{d(\Phi)}{dt}$$

$$V_s = -N_s \frac{d(\Phi)}{dt}$$

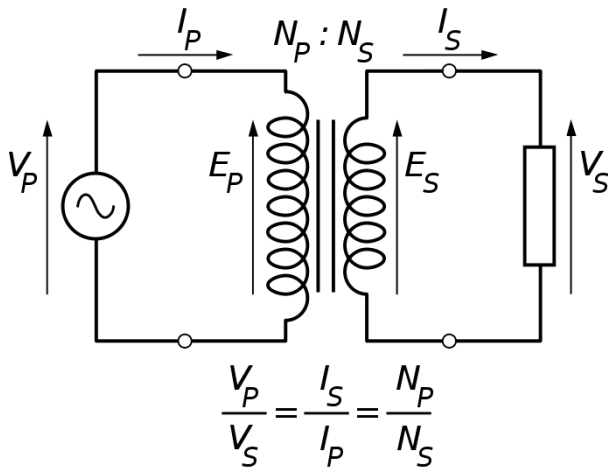
$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

- ▶ Pada persamaan daya ideal

$$P_{in} = P_{out}$$

$$I_p V_p = I_s V_s$$

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p}$$



Gambar 8 : Hubungan Tegangan - Arus - Lilitan pada transformator ideal

Rasio Impedansi pada transformator:

$$\begin{aligned}\frac{Z_p}{Z_s} &= \frac{V_p}{I_p} \div \frac{V_s}{I_s} \\ &= \frac{V_p}{V_s} \times \frac{I_s}{I_p} \\ \frac{Z_p}{Z_s} &= a^2\end{aligned}\tag{4}$$

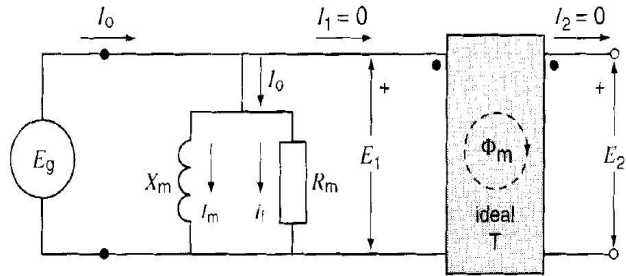
Trafo non-Ideal, Rugi-rugi, efisiensi

Rugi-Rugi Transformator

1. Rugi-rugi tembaga pada lilitan
 - ▶ Tergantung besar arus beban
 - ▶ Besar impedansi dapat dicari dengan menggunakan pengujian hubung singkat
 - ▶ Daya yang hilang pada lilitan disebut *copper loss* atau P_c
2. Rugi-rugi hysteresis dan arus eddy pada inti magnetik
 - ▶ Bernilai konstan pada setiap transformator
 - ▶ Besar impedansi dapat dicari dengan menggunakan pengujian open circuit
 - ▶ Daya yang hilang pada lilitan disebut iron loss atau P_i
3. Rugi-rugi simpangan karena adanya arus induksi oleh flux-flux yang bocor pada struktur transformator

Transformator Ideal dengan *Core* Tak Sempurna

- ▶ Pada pembahasan sebelumnya, *core* dari transformator dianggap memiliki resistansi dan reluktansi yang mendekati nol
- ▶ Pada prakteknya, pada *core* transformator akan muncul sifat hysteresis dan arus edy
- ▶ Ketidakidealan ini dapat kita nyatakan dengan menambahkan resistor dan induktor yang diparalelkan dengan masukan transformator



Transformator Ideal dengan *Core* Tak Sempurna

- ▶ Impedansi yang muncul pada model transformator pada gambar diatas
 - ▶ R_C merepresentasikan rugi-rugi inti besi dan panas yang dihasilkan
 - ▶ X_M menunjukkan ukuran dari permeabilitas pada inti transformator
- ▶ Karena adanya R_C dan X_M , muncul arus
 - ▶ I_m yang melintasi X_M dan memiliki fasa tertinggal 90 derajat dari E_1
 - ▶ I_f yang melintasi R_C dan sefasa dengan E_1
- ▶ Nilai R_C dan X_M dapat dicari dengan melakukan percobaan tanpa beban

Pengujian Tanpa Beban

Dalam keadaan tanpa beban, saat kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan V_p maka hanya arus I_o yang mengalir. Dari pengukuran daya masuk P_p , tegangan V_p dan arus I_o akan diperoleh:

$$R_C = \frac{V_p^2}{P_p}$$

$$Z_o = \frac{V_p}{I_p} = \frac{iX_M R_C}{R_C + iX_M}$$

$$S_M = V_p I_p$$

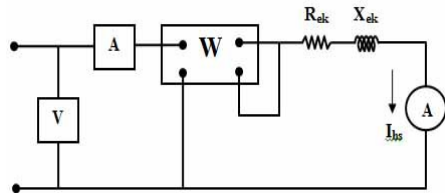
$$Q_M = \sqrt{S_M^2 - P_p^2}$$

$$R_C = \frac{V_p^2}{P_p}$$

$$X_M = \frac{V_p^2}{Q_M}$$

Pengukuran Hubung Singkat

Hubung singkat berarti impedansi Z_L diperkecil mendekati nol dan muncul impedansi $Z_{ek} = R_{ek} + iX_{ek}$ yang membatasi arus. Harga R_{ek} dan X_{ek} relatif kecil, tegangan yang masuk (V_{hs}) bernilai kecil agar $I_{hs} \leq I_n$ dimana I_n sesuai dengan spesifikasi trafo. Harga $I_o \ll I_{hs}$ sehingga I_o dapat diabaikan.



Rangkaian pengukuran hubung singkat

dari nilai V_{hs} , I_{hs} , dan P_{hs} diperoleh

$$P_{hs} = P_L + P_C \\ \cong P_L$$

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

$$Z_{ek} = \frac{V_{hs}}{I_{hs}} = R_{ek} + iX_{ek}$$

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

Pengukuran Hubung Singkat

diperoleh hubungan

$$R_{ek} = R_p + R'_s$$

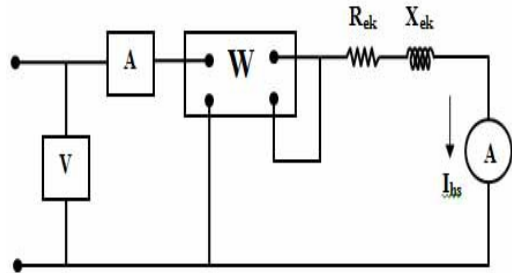
$$R'_s = a^2 R_s$$

$$X_{ek} = X_p + X'_s$$

$$X'_s = a^2 X_s$$

$$\frac{X_p}{X'_s} = \frac{R_p}{R'_s}$$

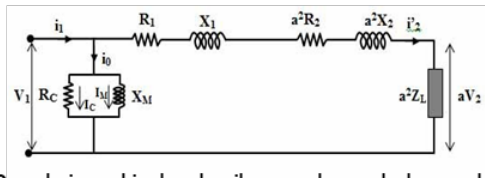
dimana $a = \frac{N_p}{N_s}$



Rangkaian pengukuran hubung singkat

Rangkaian Ekuivalen

Dari hasil pengukuran beban nol dan hubung singkat diperoleh rangkaian ekuivalen



Gambar 12 : Rangkaian ekuivalen hasil pengukuran beban nol dan hubung singkat

dimana $V_1 = V_p$, $I_1 = I_p$, $R_1 = R_p$, $X_1 = X_p$, $V_2 = V_s$, $I_2 = I_s$, $R_2 = R_s$, dan $X_2 = X_s$. Jika V_p bernilai tetap dan $V_s^t = aV_s$ maka diperoleh

$$V_s^t = V_p - I_s^t(R_{ek} + iX_{ek}) \quad (5)$$

Efisiensi Transformator

- Secara umum, efisiensi transformator merupakan rasio dari daya keluaran terhadap daya masukan.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - \text{losses}}{P_{in}} = 1 - \frac{\text{losses}}{P_{in}} \quad (6)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \text{losses}} \quad (7)$$

- Efisiensi maksimum (η_{max}) dari sebuah transformator dapat dituliskan sebagai

$$\eta_{max} = \frac{xV_S I_S \cos \varphi}{xV_S I_S \cos \varphi + 2P_i} \quad (8)$$

- dimana x adalah rasio beban yang diberikan terhadap beban penuh dan

$$P_i = x^2 P_c \rightarrow x = \sqrt{P_i / P_c} \quad (9)$$

Contoh Soal

Soal Sebuah transformator 10 kVA memiliki rugi-rugi inti 400 watt dan rugi-rugi tembaga 600 watt. Hitung efisiensi maksimum transformator pada faktor daya 0.8 lagging dan beban maksimum saat η_{max} tersebut diperoleh.

$$\text{Jawaban } x = \frac{\overline{P_i}}{\overline{P_c}} = \frac{400}{600} = 0.8165$$

Maka beban kVA ketika η_{max} diperoleh adalah
 $= 0.8165 \times 10 \text{ kVA} = 8.165 \text{ kVA}$

pada saat efisiensi maksimum diperoleh, nilai $P_i = P_c$. Sehingga rugi-rugi total adalah
 $= 2 \times P_i = 2 \times 400 \text{ Watt} = 800 \text{ Watt}$ dan efisiensi maksimum dari transformator

$$\begin{aligned} \eta_{max} &= \frac{xV_s I_s \cos \varphi}{xV_s I_s \cos \varphi + 2P_i} = \frac{0.8165 \times 10000 \times 0.8}{0.8165 \times 10000 \times 0.8 + 800} \\ &= 0.891 \end{aligned}$$

End of Session 3