



DASAR TEKNIK TENAGA LISTRIK

Transformator

Wike Handini

PENGERTIAN TRANSFORMATOR

- ✓ Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik arus bolak balik (*alternating current*) dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain, melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi-elektromagnet tanpa mengubah frekuensi.
- ✓ Pemindahan energi listrik tersebut dilakukan dengan mengubah tingkat/*level* tegangan dari satu tingkat ke tingkat lainnya.
- ✓ Penggunaan yang sederhana dan andal itu merupakan salah satu sebab penting bahwa arus bolak-balik banyak digunakan untuk pembangkitan dan penyaluran tenaga listrik.
- ✓ Pada umumnya transformator terdiri atas sebuah inti, yang terbuat dari besi berlapis, kumparan primer dan kumparan sekunder. Rasio perubahan tegangan akan tergantung dari rasio jumlah lilitan pada dua kumparan itu.

TRANSFORMATOR PADA SISTEM TENAGA

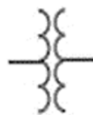
Penggunaan transformator pada sistem tenaga listrik dapat dikelompok menjadi:

1. **Transformator penaik tegangan (*step up*)** atau disebut **transformator daya**, untuk menaikkan tegangan pembangkitan menjadi tegangan transmisi.
2. **Transformator penurun tegangan (*step down*)**, dapat disebut **transformator distribusi**, untuk menurunkan tegangan transmisi menjadi tegangan distribusi.
3. **Transformator instrumen**, untuk pengukuran yang terdiri dari transformator tegangan dan trafo arus, yang digunakan untuk menurunkan tegangan dan arus agar dapat masuk ke meter-meter pengukuran.

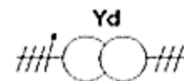
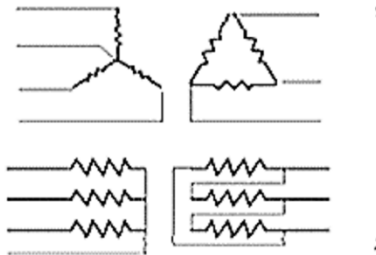
3

SIMBOL TRANSFORMATOR

Simbol transformator satu fasa



Simbol transformator tiga fasa



4

KONSTRUKSI TRANSFORMATOR

Pada umumnya konstruksi transformator daya terdiri atas bagian-bagian berikut:

1. Inti (*core*) yang dilaminasi, yang terbuat dari lembaran-lembaran plat besi lunak atau baja silikon yang diklem jadi satu.
2. Dua buah kumparan, kumparan primer dan sekunder.
3. Tangki.
4. Sistem pendinginan, pada transformator dengan daya yang cukup besar.
5. Terminal.
6. Bushing, untuk menghubungkan rangkaian dalam transformator dengan rangkaian luar.

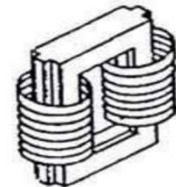
5

KONSTRUKSI TRANSFORMATOR

Jenis transformator berdasarkan konstruksinya:

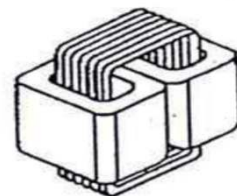
1. Tipe inti.

Pada transformator tipe inti, kumparan mengelilingi inti dan konstruksi dari intinya berbentuk huruf **L** atau huruf **U**



2. Tipe cangkang.

Pada transformator tipe cangkang, kumparan atau belitan transformator dikelilingi oleh inti dan konstruksi intinya berbentuk huruf **E**, huruf **I**, dan huruf **F**



6

PRINSIP KERJA TRANSFORMATOR

- ✓ Prinsip kerja transformator adalah berdasarkan hukum Ampere dan hukum Faraday, yaitu: arus listrik dapat menimbulkan medan magnet dan sebaliknya medan magnet dapat menimbulkan arus listrik .
- ✓ Jika pada salah satu kumparan pada transformator diberi arus bolak balik maka jumlah garis gaya magnet berubah-ubah, sehingga pada sisi primer terjadi induksi dan sisi sekunder menerima garis gaya magnet dari sisi primer yang jumlahnya berubah-ubah pula.
- ✓ Dengan demikian di sisi sekunder juga timbul induksi, akibatnya antara dua ujung terdapat beda tegangan .

7

PRINSIP KERJA TRANSFORMATOR

- ✓ Transformator terdiri atas dua buah kumparan (primer dan sekunder) yang bersifat induktif. Kedua kumparan ini terpisah secara elektris namun berhubungan secara magnetis melalui jalur yang memiliki reluktansi (*reluctance*) rendah.
- ✓ Apabila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik maka fluks bolak-balik akan muncul di dalam inti yang dilaminasi, karena kumparan tersebut membentuk jaringan tertutup maka mengalirlah arus primer.
- ✓ Akibat adanya fluks di kumparan primer terjadi induksi (*self-induction*) dan terjadi pula induksi di kumparan primer atau disebut sebagai induksi bersama (*mutual induction*) yang menyebabkan timbulnya fluks magnet di kumparan sekunder, maka mengalirlah arus sekunder jika rangkaian sekunder dibebani, sehingga energi listrik dapat ditransfer keseluruhan (secara magnetisasi).

8

PRINSIP KERJA TRANSFORMATOR

- ✓ fluks yang berubah-ubah pada inti besi menghasilkan gaya gerak listrik (ggl) sebesar:

$$e = -N \frac{d\phi}{dt}$$

Dimana:

e = gaya gerak listrik (ggl), dalam volt

N = jumlah lilitan

$\frac{d\phi}{dt}$ = perubahan fluks magnet

- ✓ Maka ggl induksi seluruh kumparan primer dengan N_1 lilitan adalah:

$$E_1 = 4,44fN_1\phi_m$$

- ✓ Demikian juga pada kumparan sekunder:

$$E_2 = 4,44fN_2\phi_m$$

Dimana: ϕ_m = fluks maksimum dalam weber

9

PRINSIP KERJA TRANSFORMATOR

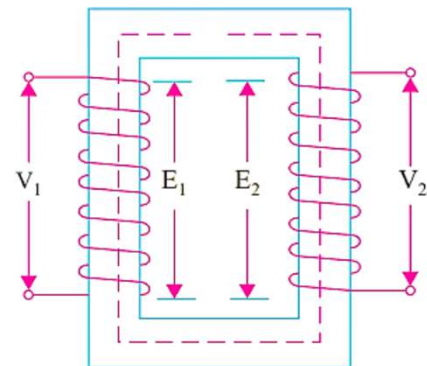
- ✓ Pada transformator ideal, dengan mengabaikan rugi-rugi penghantar dan inti besi, nilai tegangan terminal kumparan primer $V_1 = E_1$ dan tegangan kumparan sekunder $V_2 = E_2$. Maka tegangan terminal kumparan primer dengan N_1 lilitan adalah:

$$V_1 = E_1 = 4,44fN_1\phi_m$$

- ✓ Demikian juga pada kumparan sekunder:

$$V_2 = E_2 = 4,44fN_2\phi_m$$

Dimana: $\phi_m = B_m A$ dengan B_m adalah kerapatan fluks maksimum (weber/m²) dan A adalah luas penampang dari inti dalam m².



10

PRINSIP KERJA TRANSFORMATOR

- ✓ Perbandingan tegangan antara kumparan primer dan kumparan sekunder disebut sebagai **rasio transformasi tegangan (a)**. Besarnya rasio transformasi tegangan dinyatakan oleh persamaan:

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

Dengan E adalah ggl induksi, V adalah tegangan terminal dan N adalah jumlah lilitan pada kumparan transformator.

- ✓ Jika $N_2 > N_1$, maka $a < 1$, transformator disebut sebagai *Transformator Step-up*.
- ✓ Jika $N_2 < N_1$, maka $a > 1$, transformator disebut sebagai *Transformator Step-down*.
- ✓ Pada transformator ideal, berlaku: $V_1 I_1 = V_2 I_2$

Sehingga: $\frac{I_2}{I_1} = \frac{V_1}{V_2} = a$ Dari persamaan terlihat bahwa arus merupakan rasio terbalik terhadap rasio tegangan transformasi

11

CONTOH 1

Suatu transformator ideal satu fasa mempunyai 200 lilitan pada belitan primer dan 100 lilitan pada sekunder. Jika belitan primer dihubungkan dengan tegangan sumber sebesar 200 V dan arus beban sekunder 20 A, hitunglah:

- Arus primer.
- Tegangan sekunder

Penyelesaian

Diketahui:

$$N_1 = 200$$

$$N_2 = 100$$

$$V_1 = 200 \text{ V}$$

$$I_2 = 20 \text{ A}$$

a. $a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{200}{100} = 2$

$$\frac{I_2}{I_1} = a \Rightarrow \frac{20}{I_1} = 2$$

$$I_1 = \frac{20}{2} = 10 \text{ A}$$

b.

$$\frac{V_1}{V_2} = a \Rightarrow \frac{200}{V_2} = 2$$

$$V_2 = \frac{200}{2} = 100 \text{ V}$$

12

CONTOH 2

Suatu transformator ideal satu fasa mempunyai 400 lilitan primer dan 1000 lilitan sekunder, luas penampang inti 60 cm^2 . Jika belitan primer dihubungkan pada sumber tegangan 520 V dan frekuensi 50 Hz, hitunglah:

- Kerapatan fluks maksimum pada inti.
- Tegangan induksi pada belitan sekunder.

Penyelesaian a

Diketahui:

$$N_1 = 400$$

$$N_2 = 1000$$

$$A = 60 \text{ cm}^2 \\ = 60 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$V_1 = 520 \text{ V}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$V_1 = E_1 = 4,44 f N_1 \phi_m$$

$$520 = 4,44 \times 50 \times 400 \times \phi_m$$

$$\phi_m = \frac{520}{88800}$$

$$= 0,005856 \text{ weber}$$

$$\phi_m = B_m A$$

$$B_m = \frac{\phi_m}{A}$$

$$B_m = \frac{0,005856}{60 \times 10^{-4}}$$

$$B_m = 0,976 \text{ weber/m}^2$$

13

CONTOH 2

Penyelesaian b

Diketahui:

$$N_1 = 400$$

$$N_2 = 1000$$

$$A = 60 \text{ cm}^2 \\ = 60 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$V_1 = 520 \text{ V}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{400}{1000} = 0,4$$

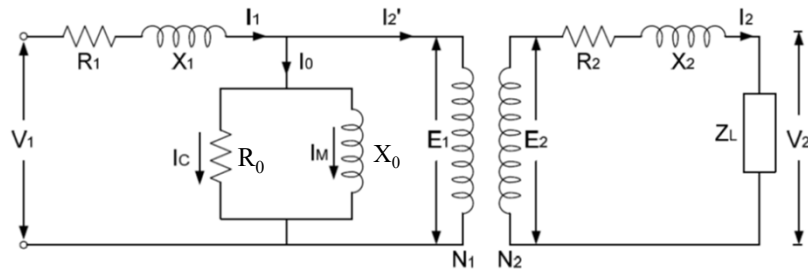
$$\frac{V_1}{V_2} = a \quad \Rightarrow \quad \frac{520}{V_2} = 0,4 \quad \Rightarrow \quad V_2 = \frac{520}{0,4} = 1300 \text{ V}$$

Pada transformator ideal, dengan mengabaikan rugi-rugi penghantar dan inti besi, nilai tegangan terminal kumparan sekunder $V_2 = E_2$, sehingga:

$$E_2 = V_2 = 1300 \text{ V}$$

14

RANGKAIAN EKIVALEN TRANSFORMATOR



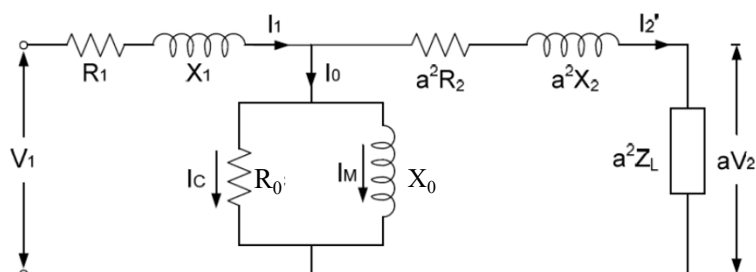
Arus beban nol disimulasikan oleh induktansi murni (X_M) dengan arus magnetisasi (I_M) dan reaktansi non induktif (R_C) dengan komponen arus (I_C) yang diparalel menyilang pada rangkaian primer, dimana:

$$X_0 = \frac{E_1}{I_M} \qquad R_0 = \frac{E_1}{I_C}$$

15

RANGKAIAN EKIVALEN TRANSFORMATOR

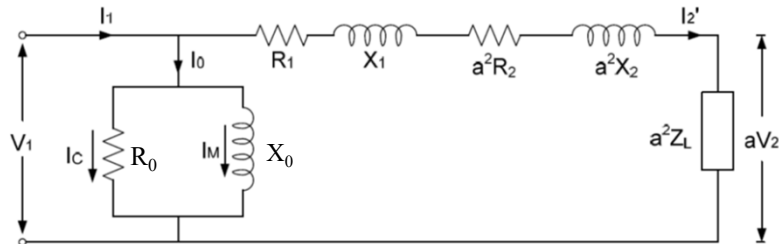
Untuk membuat perhitungan maka rangkaian transformator harus diubah menjadi rangkaian ekuivalen transformator, yakni tegangan dan arus serta impedansi dari kedua sisi disatukan pada salah satu sisi transformator, bisa sisi primer atau sisi sekunder. Jika rangkaian sekunder ditransfer ke sisi primer maka besaran tegangan, arus dan impedansinya harus diubah, dengan demikian rangkaian ekuivalen transformator dapat digambarkan sebagai berikut:



16

RANGKAIAN EKIVALEN TRANSFORMATOR

Untuk lebih memudahkan dalam perhitungan, rangkaian dapat disederhanakan seperti berikut ini:



Rangkaian ekivalen pendekatan tersebut masih dapat disederhanakan bila arus beban nol (I_0) cukup kecil, sehingga dapat diabaikan, dengan demikian didapatkan:

$$I_1 = I_2'$$

17

RANGKAIAN EKIVALEN TRANSFORMATOR

Maka didapatkan persamaan-persamaan berikut:

- ✓ Resistansi ekivalen trafo berdasarkan sisi primer

$$R_{e1} = R_1 + R_2' = R_1 + a^2 R_2$$

- ✓ Reaktansi ekivalen trafo berdasarkan sisi primer

$$X_{e1} = X_1 + X_2' = X_1 + a^2 X_2$$

- ✓ Impedansi ekivalen trafo berdasarkan sisi primer

$$Z_{e1} = R_{e1} + jX_{e1}$$

- ✓ Impedansi beban berdasarkan sisi primer

$$Z_L' = a^2 Z_L = R_L' + jX_L' = a^2 R_L + ja^2 X_L$$

18

RANGKAIAN EKIVALEN TRANSFORMATOR

- ✓ Arus primer

$$I_1 = I'_2 = \frac{V_1}{\sqrt{(R_{e1} + a^2 R_L)^2 + (X_{e1} + a^2 X_L)^2}}$$

- ✓ Regulasi transformator berdasarkan sisi primer

$$\text{Regulasi} = \frac{V_1 - V'_2}{V_1} \times 100\%$$

Dimana: $V'_2 = a^2 V_2$

19

PENGUJIAN TRANSFORMATOR

Maksud dan tujuan pengujian transformator adalah untuk mengetahui karakteristik kerja transformator, dengan memperhitungkan empat parameter utama yakni:

1. Resistansi ekivalen berdasarkan primer (R_{e1}) atau berdasarkan sekunder (R_{e2}).
2. Reaktansi bocor ekivalen berdasarkan primer (X_{e1}) atau berdasarkan sekunder (X_{e2}).
3. Konduktansi rugi inti G_0 (kebalikan R_0).
4. Suseptansi magnetisasi B_0 (kebalikan reaktansi X_0).

Keempat paramter tersebut dapat ditentukan melalui dua macam pengujian yaitu:

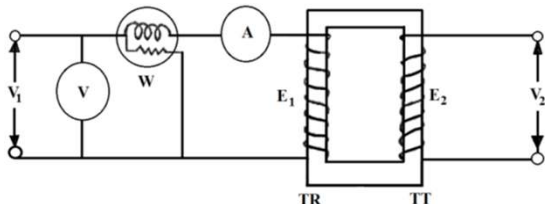
1. Pengujian beban nol (*open circuit*, OC)
2. Pengujian hubung singkat (*short circuit*, SC).

20

PENGUJIAN BEBAN NOL

Tujuan pengujian ini adalah:

1. Menentukan rugi beban nol atau rugi inti.
2. Menentukan harga X_0 dan R_0 .



$$W_0 = V_1 I_0 \cos \phi_0$$

$$I_C = I_0 \cos \phi_0$$

$$I_M = I_0 \sin \phi_0$$

$$X_0 = \frac{V_1}{I_M} \quad R_0 = \frac{V_1}{I_C}$$

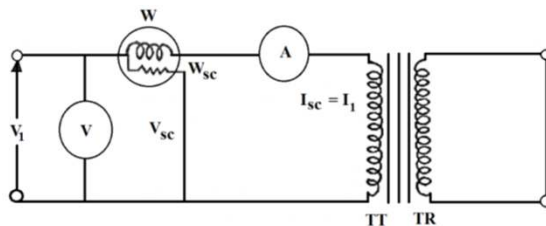
Arus beban nol (I_0) amat kecil jika dibandingkan dengan arus beban penuh primer, hanya sekitar 2% hingga 3%. Oleh karena itu rugi tembaga primer dapat diabaikan, sehingga secara praktis, daya input beban nol (W_0) digunakan untuk mengatasi rugi-rugi inti.

21

PENGUJIAN HUBUNG SINGKAT

Tujuan pengujian ini adalah:

1. Menentukan impedansi ekuivalen Z_{e1} dan Z_{e2} , reaktansi bocor ekuivalen X_{e1} dan X_{e2} serta reaktansi total trafo berdasarkan belitan dimana alat-alat ukur dipasang. Dengan diketahuinya Z_{e1} dan Z_{e2} maka jatuh tegangan total dalam trafo berdasarkan sisi primer atau sisi sekunder dapat dihitung sehingga regulasi trafo dapat ditentukan.
2. Menentukan rugi tembaga pada waktu beban penuh (pada sembarang beban). Rugi ini dapat digunakan untuk menghitung efisiensi trafo.



22

PENGUJIAN HUBUNG SINGKAT

- ✓ Pemberian tegangan pada sisi TT hanya berkisar antara 5 sampai 10% dari tegangan nominal, maka fluks yang terjadi pada inti juga hanya sekitar 5% sampai 10% dari fluks nominalnya, sehingga rugi inti sangat kecil dan daya input yang terbaca pada *Wattmeter* merupakan rugi tembaga.
- ✓ Jika V_{SC} adalah tegangan yang dibutuhkan untuk mendapatkan arus beban penuh pada waktu hubung singkat maka:

$$Z_{e1} = \frac{V_{SC}}{I_1}$$

dimana: $Z_{e1} = R_{e1} + jX_{e1}$



$$Z_{e1} = \sqrt{R_{e1}^2 + X_{e1}^2} \angle \tan^{-1}(X_{e1}/R_{e1})$$

$$W_{SC} = I_1^2 R_{e1}$$



$$R_{e1} = \frac{W_{SC}}{I_1^2}$$

$$X_{e1} = \sqrt{Z_{e1}^2 - R_{e1}^2}$$

23

EFISIENSI TRANSFORMATOR

Efisiensi dari setiap peralatan dalam bidang teknik adalah daya keluaran dibagi dengan daya masukan (input), dapat dinyatakan dalam persen (%) atau dengan persamaan:

$$Efisiensi (\eta) = \frac{Daya\ keluaran}{Daya\ masukan} \times 100\%$$

Dari pengujian beban nol dan pengujian hubung singkat didapatkan rugi total pada trafo sehingga:

$$Daya\ keluaran = Daya\ masukan + \sum Rugi$$

Rugi-rugi transformator:

- Rugi inti $P_C = W_0$ dari pengujian beban nol.
- Rugi tembaga $= I_2^2 R_{e2}$ dari pengujian hubung singkat

24