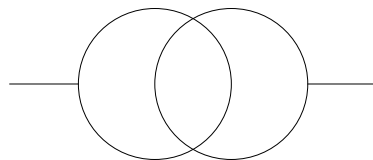


BAB II

TRANSFORMATOR

2.1 Teori Dasar Transformator

Transformator adalah suatu peralatan listrik elektromagnetik statis yang berfungsi untuk memindahkan daya listrik dari suatu rangkaian listrik ke rangkaian listrik lainnya, dengan frekuensi yang sama dan perbandingan transformasi tertentu melalui suatu gandengan magnet dan bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetis, di mana perbandingan tegangan antara sisi primer dan sisi sekunder berbanding lurus dengan perbandingan jumlah lilitan dan berbanding terbalik dengan perbandingan arusnya. Simbol transformator berdasarkan standar internasional adalah seperti diperlihatkan pada gambar 2.1 berikut:



Gambar 2.1 Simbol Transformator

Di dalam bidang tenaga listrik, pemakaian transformator dikelompokkan menjadi 3 bagian diantaranya:

1. Transformator daya, transformator ini biasanya digunakan untuk menaikkan tegangan pembangkit menjadi tegangan transmisi.
2. Transformator distribusi, untuk menurunkan tegangan transmisi menjadi tegangan distribusi.

3. Transformator pengukuran, digunakan untuk pengukuran yang terdiri atas transformator arus (*Current Transformer-CT*) dan transformator tegangan (*Potential Transformer-PT*).

2.2 Prinsip Kerja Transformator

Transformator terdiri atas dua buah kumparan primer dan kumparan sekunder yang bersifat induktif. Kedua kumparan ini terpisah secara elektrik 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, maka di kumparan primer terjadi induksi sendiri (*selfinduction*) dan terjadi pula induksi di kumparan sekunder karena pengaruh induksi dari kumparan primer atau disebut sebagai induksi bersama (*mutualinduction*) yang menyebabkan timbulnya fluks magnet di kumparan sekunder, maka mengalirlah arus sekunder jika rangkaian sekunder di bebani, sehingga energi listrik dapat ditransfer keseluruhan (secara magnetisasi).

Kumparan primer (*input*) dihubungkan dengan sumber daya arus bolak-balik sedangkan kumparan sekunder (*output*) dihubungkan ke beban. Arus bolak-balik dalam kumparan primer menimbulkan fluks magnetik bolak-balik dalam inti besi. Fluks magnetik bolak-balik dalam inti besi membangkitkan GGM (Gaya Gerak Magnet) induksi pada kumparan sekunder.

Untuk mengetahui besarnya GGL yang dibangkitkan pada kumparan primer ataupun sekunder menggunakan rumus yang mengacu pada hukum Induksi Faraday, sebagai berikut:

$$E_p \times N_p = \frac{d\Phi}{dt} \dots\dots\dots(2.1)$$

$$E_s \times N_s = \frac{d\Phi}{dt} \dots\dots\dots(2.2)$$

Sebagaimana pada rumus diatas bahwasanya nilai GGL pada kumparan primer maupun kumparan sekunder berbanding lurus dengan banyaknya lilitan pada kumparan tersebut, sehingga dapat dituliskan:

$$E_p : E_s = N_p : N_s \dots\dots\dots(2.3)$$

$$E_s = N_s / N_p \times E_p$$

$$E_p = N_p / N_s \times E_s$$

Dimana:

E_p = GGL induksi pada kumparan primer

E_s = GGL induksi pada kumparan sekunder

N_p = jumlah lilitan kumparan primer

N_s = jumlah lilitan kumparan sekunder

Jadi jika jumlah lilitan kumparan sekunder lebih banyak dari pada jumlah lilitan kumparan primer, tegangan sekunder lebih besar dari tegangan primer (*step-up transformer*), begitupun apabila jumlah lilitan kumparan primer lebih banyak daripada jumlah lilitan kumparan sekunder, maka tegangan primer lebih besar dari tegangan sekunder (*step – down transformer*).

Dengan anggapan tidak adanya rugi - rugi pada perpindahannya dari kumparan primer ke kumparan sekunder maka:

$$W_p = W_s \dots\dots\dots(2.4)$$

$$E_s \cdot I_s = E_p$$

$$I_s = E_p / E_s \cdot I_p$$

$$I_s = N_p / N_s \cdot I_p$$

$$I_p : I_s = N_s : N_p$$

Dari hubungan itu dapat dilihat bahwa apabila jumlah lilitan pada kumparan sekunder lebih banyak, maka kuat arus pada kumparan sekunder lebih kecil daripada kuat arus dalam kumparan primer.

2.3 Transformator Tiga Phasa

2.3.1 Pengertian Umum

Transformator tiga fase pada prinsipnya sama dengan transformator satu fase, perbedaannya adalah pada transformator tiga mengenal adanya hubungan bintang, segitiga dan hubungan zig-zag, dan juga sistem bilangan jam yang sangat menentukan kerja paralel tiga fase. Untuk menganalisa transformator tiga fase dilakukan dengan cara menganggap bahwa transformator tiga fase sebagai transformator satu fase, teknik perhitungannya pun sama, hanya untuk nilai akhir biasanya parameter tertentu (arus, tegangan, dan daya) transformator tiga fase dikalikan dengan nilai $\sqrt{3}$.

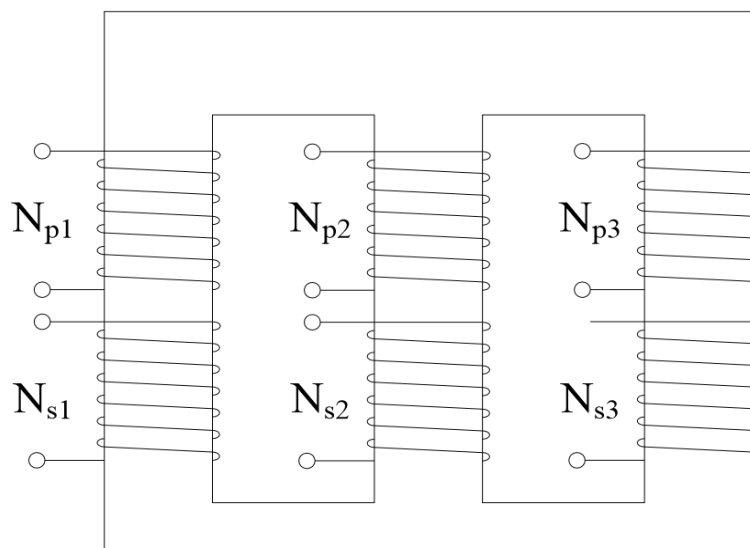
Transformator tiga fase dikembangkan untuk alasan ekonomis, biaya lebih murah karena bahan yang digunakan lebih sedikit dibandingkan tiga buah transformator satu fase dengan jumlah daya yang sama dengan satu buah transformator tiga fase, pengerjaannya

lebih cepat. Transformator tiga fase adalah trafo yang sering dipakai hal ini dikarenakan:

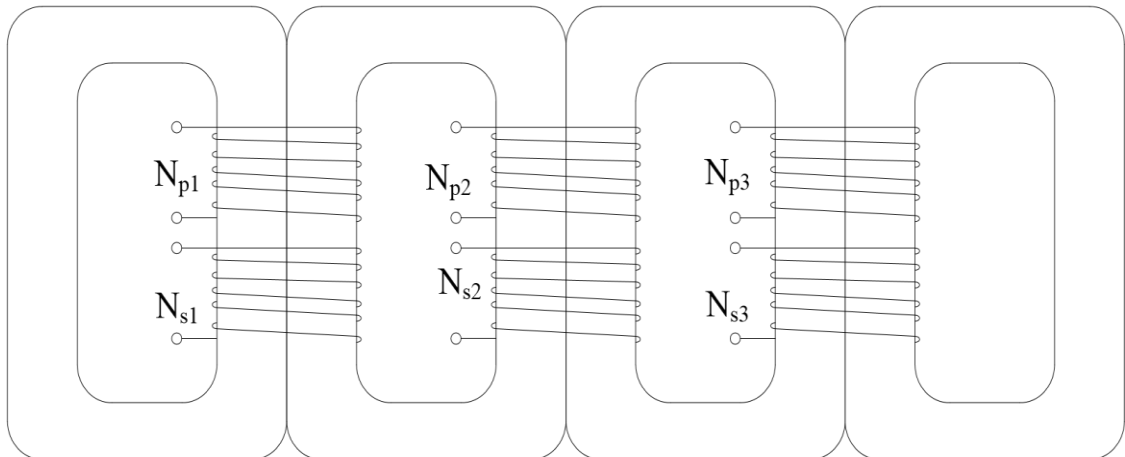
1. Untuk daya yang sama tidak memerlukan ruang yang besar.
2. Mempunyai nilai ekonomis.
3. Pemeliharaan persatuan barang lebih murah dan lebih mudah.

2.3.2 Konstruksi Transformator Tiga Fase

Untuk mengurangi rugi-rugi yang disebabkan oleh arus pusar di dalam inti, rangkaian magnetik biasanya terdiri dari setumpuk laminasi tipis. Dua jenis konstruksi yang biasa digunakan pada transformator tiga fase seperti pada gambar dibawah ini:



Gambar 2.2 Transformator tiga fase tipe inti.



Gambar 2.3 Transformator tiga fasa tipe cangkang.

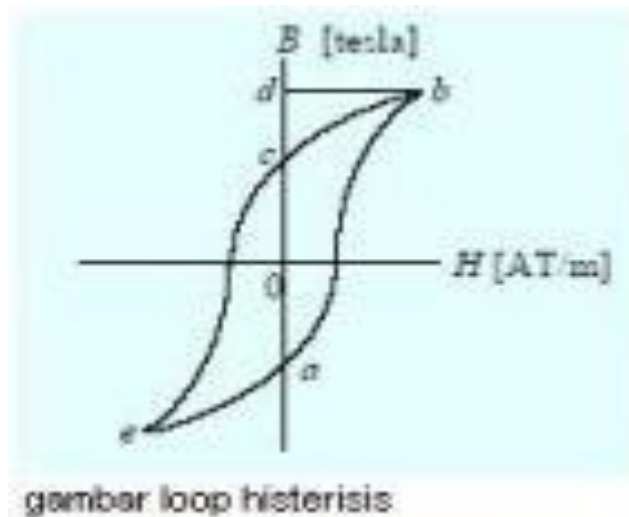
2.3.3 Rugi-rugi Pada Transformator

Secara umum ada 4 macam jenis rugi-rugi pada transformator yaitu:

1. Rugi *Hysteresis*

Terjadi karena respon yang lambat dari material inti. Hal ini terjadi karena masih adanya medan magnetik residu yang bekerja pada material, jadi saat arus eksitasi bernilai 0, fluks tidak serta merta berubah menjadi 0 namun perlahan-lahan menuju 0.

Sebelum fluks mencapai nilai 0 arus sudah mulai mengalir kembali atau dengan kata lain arus sudah bernilai tidak sama dengan 0 sehingga akan membangkitkan fluks kembali. Grafik *hysteresis* dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 2.4 Loop hysteresis

Rugi *hysteresis* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{maks}^{1.6} \text{ (watt)} \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana:

K_h = Konstanta

f = Frekuensi (Hz)

B_{maks} = Fluks maksimum (webber)

2. Rugi Arus Pusar (*Eddy Current*)

Rugi-rugi arus *eddy* adalah rugi-rugi yang disebabkan oleh pemanasan akibat timbulnya arus *eddy* (pusar) yang terdapat pada inti besi transformator. Rugi-rugi ini terjadi karena inti besi terlalu tebal sehingga terjadi perbedaan tegangan antara sisinya maka mengalir arus yang berputar-putar di sisi tersebut. Rugi-rugi arus *eddy* sebanding dengan kuadrat tegangan yang disuplai ke transformator.

Rugi arus pusar dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$P_e = K_e \cdot f \cdot t \cdot B_{max} \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana:

P_e = Rugi arus pusar (w/kg)

k_e = Konstanta material inti

f = Frekuensi (Hz)

t = Ketebalan material (m)

B_{max} = Nilai puncak medan magnet (T)

3. Rugi-rugi Tembaga

Rugi-rugi tembaga adalah rugi-rugi yang disebabkan oleh pemanasan yang timbul akibat arus mengalir pada hambatan kawat penghantar yang terdapat pada kumparan primer dan sekunder dari transformator. Rugi-rugi tembaga sebanding dengan kuadrat arus yang mengalir pada kumparan. Nilai resistansi konduktor dapat dihitung dengan persamaan:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana:

R = Tahanan (Ohm)

ρ = Tahanan jenis (Ohm.m)

l = Panjang (m)

A = Luas penampang (m)

Sedangkan untuk menghitung kerugian tembaga itu sendiri dapat menggunakan rumus:

$$P_{cp^2} = I_p \cdot R_p \text{ untuk sisi primer, dan} \dots \dots \dots (2.8)$$

$$P_{cs^2} = I_s \cdot R_s \text{ untuk sisi sekunder} \dots \dots \dots (2.9)$$

Dimana:

P_{cp} = Rugi konduktor primer

P_{cs} = Rugi konduktor sekunder

I_p = Arus pada kumparan primer

I_s = Arus pada kumparan sekunder

R_p = Tahanan kumparan primer

R_s = Tahanan kumparan sekunder

4. Rugi-rugi Pembebanan

Rugi-rugi pembebanan merupakan rugi-rugi yang diakibatkan oleh efek pembebanan pada transformator. Rugi-rugi ini terdiri dari I^2R belitan yang disebabkan oleh arus yang mengalir dibelitan dan rugi-rugi lain yang tidak teridentifikasi (*stray loss*).

Rugi-rugi pembebanan diukur dengan melakukan hubung singkat pada salah satu belitan baik belitan tegangan tinggi maupun belitan tegangan rendah, untuk menghasilkan arus maksimal yang mengalir pada belitan. Rugi-rugi transformator pada kondisi ini dapat bernilai sama dengan rugi-rugi yang diakibatkan oleh kenaikan suhu saat sejumlah arus mengalir melalui transformator.

Rugi pembebanan dapat diukur menggunakan persamaan:

$$P_L = P_j + P_a \dots \dots \dots (2.10)$$

Dimana:

P_L = rugi pembebanan (watt).

P_j = rugi belitan I^2R (watt).

P_a = *stray load losses* (watt).

Nilai dari rugi-rugi pembebanan (P_L) dan rugi-rugi belitan mengalami kenaikan seiring dengan naiknya suhu oleh sebab itu diperlukan faktor konversi suhu dari suhu pengujian/*ambient* (Φ_m) ke suhu yang lebih tinggi (Standart IEEE). Faktor konversi pada suhu 75°C . Konversi terhadap suhu ini dapat menggunakan persamaan, yaitu:

$$P_j (T) = \frac{T_k + T}{T_k + \Phi_m} \dots \dots \dots (2.11)$$

$$P_a (T) = \frac{T_k + \Phi_m}{T_k + T} \dots \dots \dots (2.12)$$

Dimana:

Φ_m = Suhu saat pengujian/*ambient*($^\circ\text{C}$).

T = 75°C

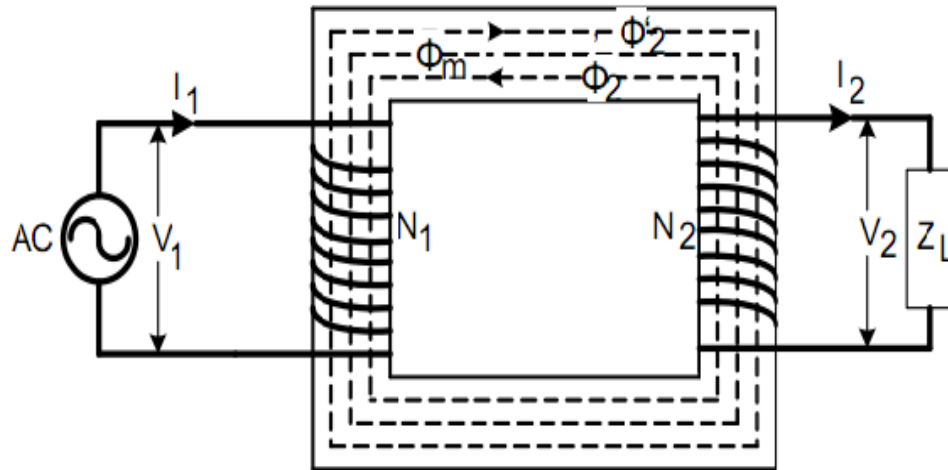
T_k =Konstanta 235°C (tembaga) dan 225°C (aluminium),
(standar IEC)

5. Rugi-rugi liar (*stray load losses*)

Rugi-rugi liar merupakan rugi-rugi yang terdiri dari rugi kopling, rugi kapasitas liar, rugi efek kulit dll.

2.4 Transformator Berbeban

Apabila kumparan sekunder di hubungkan dengan beban Z_L , I_2 mengalir pada kumparan sekunder dimana $I_2 = V_2/Z_L$ dengan θ_2 = faktor kerja beban, seperti pada gambar 2.6.



Gambar 2.5 Transformator Dalam Keadaan Berbeban.

Arus beban 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 harus mengalir arus I_2 , yang menentang fluks yang dibangkitkan oleh arus beban I_2 , sehingga keseluruhan arus yang mengalir pada kumparan primer menjadi:

$$I_1 = I_0 + I_2 \dots \dots \dots (2.13)$$

Bila komponen arus rugi tembaga (I_c) diabaikan, maka $I_0 = I_m$, sehingga:

$$I_1 = I_m + I_2 \dots \dots \dots (2.14)$$

Dimana:

I_1 = arus pada sisi primer (Amper)

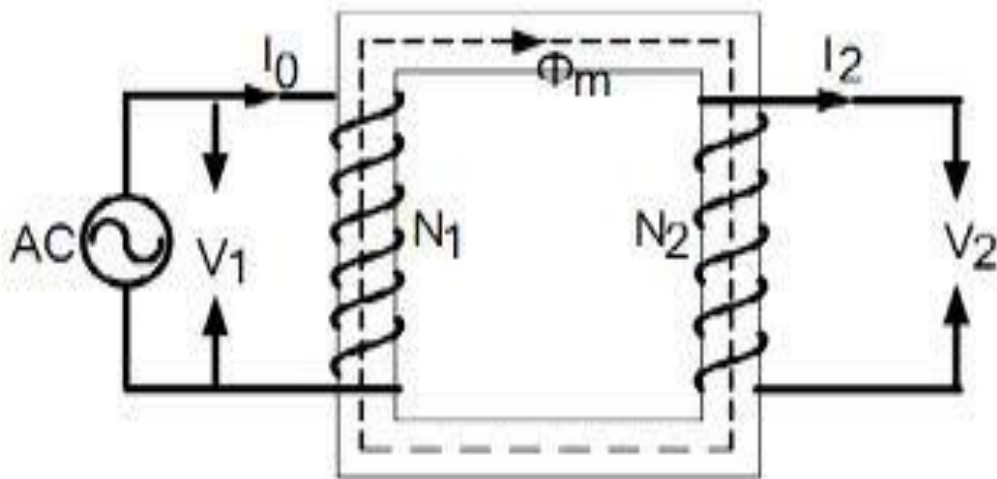
I_0 = arus penguat (Amper)

I_m = arus pemagnetan (Amper)

I_c = arus rugi-rugi tembaga (Amper)

2.5 Transformator Tanpa Beban

Bila kumparan primer suatu transformator dihubungkan dengan sumber tegangan V_1 yang sinusoidal, akan mengalirkan arus primer I_0 yang juga sinusoid dan dengan menganggap belitan N_1 reaktif murni. I_0 akan tertinggal 90° dari V_1 . Arus primer I_0 menimbulkan fluks (Φ) yang sefasa dan juga berbentuk sinusoid. Pada gambar 2.7 dapat dilihat suatu transformator tanpa beban.



Gambar 2.6 Transformator Dalam Keadaan Tanpa Beban

$$\phi = \phi_{\max} \sin \omega t \dots \dots \dots (2.15)$$

Fluks yang sinusoid ini akan menghasilkan tegangan. Induksi e_1 (hukum farraday).

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \dots \dots \dots (2.16)$$

Harga efektifnya : 0

$$E_1 = 4,44 N_1 f \Phi_{\max}$$

Bila rugi tahanan dan adanya fluksi bocor diabaikan akan terdapat hubungan:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \dots \dots \dots (2.17)$$

Apabila $a < 1$, maka transformator berfungsi untuk menaikkan tegangan(*step up*).

$a > 1$, maka transformator berfungsi untuk menurunkan tegangan(*step down*).

Dimana:

E_1 = ggl induksi di sisi primer (volt).

E_2 = ggl induksi di sisi sekunder (volt).

V_1 = tegangan terminal di sisi primer (volt).

V_2 = tegangan terminal di sisi sekunder (volt).

N_1 = jumlah belitan di sisi primer.

N_2 = jumlah belitan di sisi sekunder.

a = faktor transformasi.