

BAB II

TEORI DASAR TRANSFORMATOR

Transformator merupakan komponen yang sangat penting peranannya dalam sistem tenaga listrik. Transformator adalah suatu peralatan tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan tenaga/daya listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya, tanpa merubah frekuensinya.

Fungsi dari suatu transformator secara garis besar adalah :

1. Untuk menaikkan tegangan (Step-up)

Misalnya transformator tenaga digunakan untuk menaikkan tegangan menengah menjadi tegangan tinggi.

2. Untuk menurunkan tegangan (Step-down)

Misalnya transformator distribusi yang digunakan pada gardu distribusi untuk menurunkan tegangan menengah menjadi tegangan rendah.

Seperti yang telah dibahas pada bab sebelumnya bahwa transformator distribusi di desain agar tidak dipelihara selama masa operasinya (± 20 tahun). Maka untuk bisa memenuhi hal tersebut, transformator distribusi harus di desain dengan kriteria sebagai berikut :

- a. Tidak ada perubahan kontak ke listrik sehingga tidak ada loncatan bunga listrik di dalamnya.
- b. Harus kedap air sehingga kualitas dari minyak transformator tidak menurun karena kemasukan air.

- c. Konstruksi harus rapat sehingga bisa meminimalkan kontak dengan udara bebas.
- d. Dengan memperhatikan bagian (c), minyak transformator tetap harus dimungkinkan untuk mengembang sesuai dengan perubahan suhu minyak yang terjadi, untuk ini tersedia lubang kecil di atas tangki transformator.

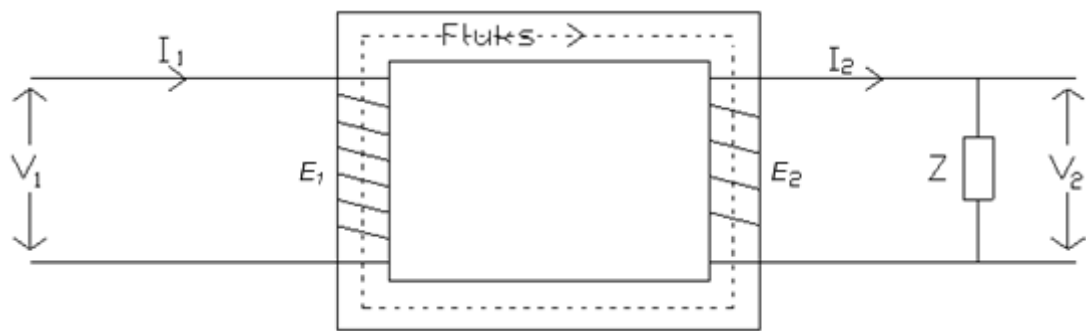
Kriteria – kriteria tersebut harus bisa dipenuhi oleh transformator distribusi dalam desain, khususnya apabila transformator distribusi dipasang diluar gedung (outdoor).

2.1. Prinsip Kerja Transformator

Prinsip kerja transformator berdasarkan induksi elektromagnetik, dimana jika suatu penghantar dialiri arus listrik akan timbul medan listrik dan jika suatu penghantar mendapatkan medan listrik yang berubah – ubah akan muncul tegangan induksi (emf).

Besarnya kenaikan atau penurunan tegangan suatu transformator tergantung pada perbandingan lilitan primer terhadap lilitan sekunder. Prinsip perbandingan lilitan ini dirumuskan sebagai berikut :

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1}$$



Gambar 2.1 Aliran Fluksi

Bila terdapat 2 buah kumparan, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder yang dihubungkan melalui sebuah inti besi dan kumparan primer tersebut diberi sumber tegangan AC maka pada kumparan primer akan mengalir arus yang akan mengakibatkan inti besi bersifat magnetis. Arus tersebut akan menimbulkan fluks yang berubah – ubah terhadap fungsi waktu. Dengan adanya fluks tersebut maka sesuai dengan prinsip induksi elektromagnetis akan timbul ggl induksi yang akan menginduksikan belitan sekunder.

Pada kumparan 1 :

$$e_1 = -N_1 \times \frac{d\Phi}{dt}$$

$$\Phi = \Phi_{maks} \times \sin Wt$$

$$e_1 = -N_1 \times \frac{d(\Phi_{maks} \sin wt)}{dt} = -N_1 W \Phi_{maks} \cos wt$$

Harga efektifnya :

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

Pada kumparan 2 :

$$e_2 = -N_2 \times \frac{d\Phi}{dt}$$

$$e_2 = -N_2 W\Phi_{\text{maks}} \cos wt$$

Harga efektifnya :

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

Keterangan :

N_1 = jumlah belitan pada kumparan primer

N_2 = jumlah belitan pada kumparan sekunder

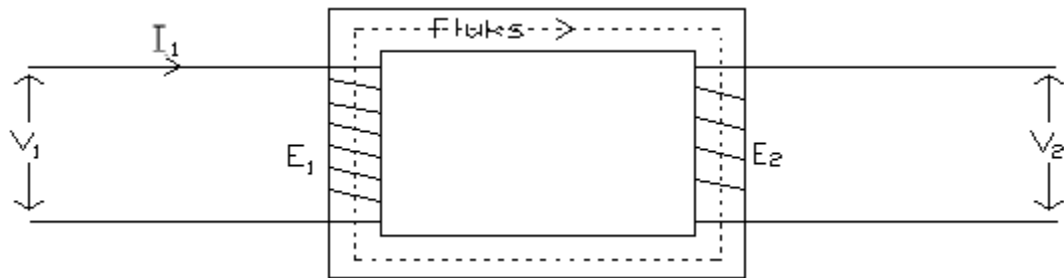
f = frekuensi gelombang listrik

Φ_{maks} = fluks maksimum

E_1 = gaya gerak listrik efektif di sisi primer

E_2 = gaya gerak listrik efektif di sisi sekunder

2.1.1. Keadaan Tanpa Beban



Gambar 2.2 Keadaan Tanpa Beban

Bila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak – balik yang sinusoidal, maka akan mengalir arus I_0 pada kumparan primer. I_0 menimbulkan fluks yang sefasa yang berbentuk sinusoidal.

Tegangan yang dibangkitkan :

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

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

Jika Φ_{maks} di sisi primer = Φ_{maks} di sisi sekunder, maka :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44 N_1 f \Phi_{\text{maks}}}{4,44 N_2 f \Phi_{\text{maks}}}$$

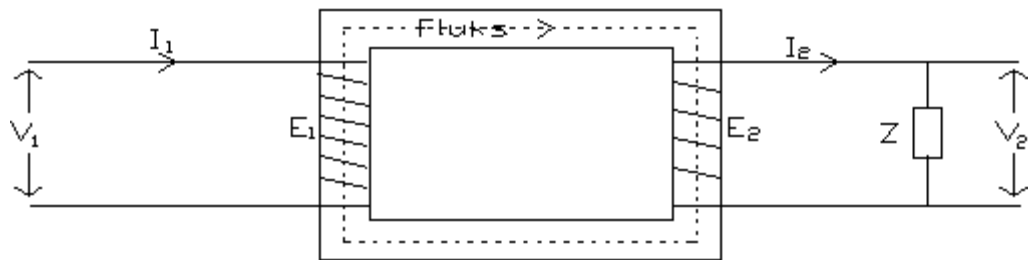
$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Jika rugi tegangan diabaikan, maka $E_1 = V_1$

$$\text{Sehingga berlaku} \rightarrow \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

a adalah rasio lilitan/kumparan

2.1.2. Keadaan Berbeban



Gambar 2.3 Keadaan Berbeban

Apabila pada kumparan sekunder dipasang beban (Z), maka akan mengalir arus di sekunder yang besarnya :

$$I_2 = \frac{V_2}{Z}$$

Dengan mengalirnya I_2 pada kumparan sekunder, maka pada kumparan primer akan mengalir I_2' . Sehingga arus yang mengalir secara keseluruhan pada kumparan primer adalah :

$$I_1 = I_0 + I_2' \rightarrow I_0 = I_1 + I_m$$

I_0 = Arus tanpa beban

I_R = Rugi - rugi besi

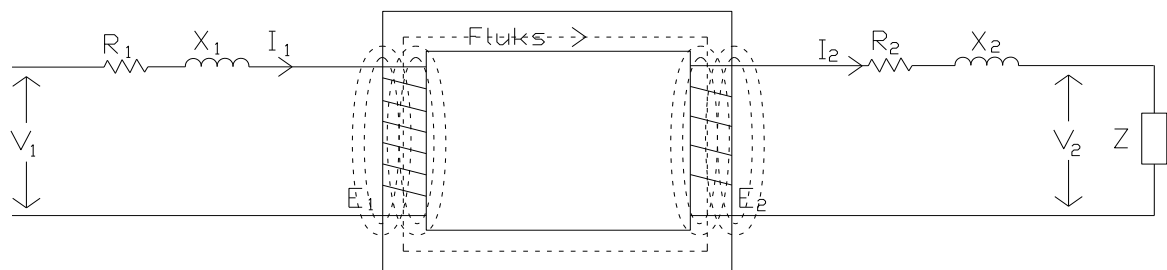
I_ϕ = Arus magnetisasi

Untuk besaran arus berlaku hubungan :

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

2.1.3 Transformator Berbeban Dengan Memperhitungkan Rugi – Rugi

Transformator yang sisi sekundernya dibebani dan diperhitungkan rugi tembaga dan fluks bocor pada belitannya, baik untuk sisi primer maupun sisi sekunder, lihat gambar 2.4.



Gambar 2.4. Transformator berbeban, rugi – rugi diperhitungkan

2.2. Konstruksi Transformator Distribusi

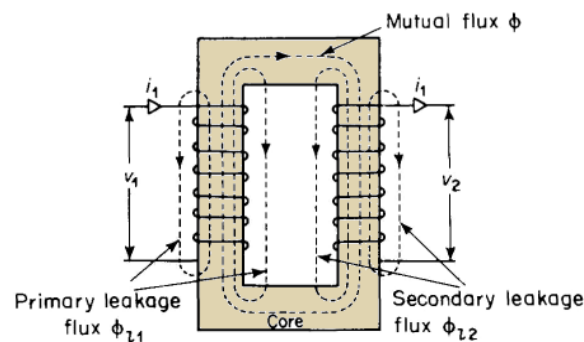
Secara umum transformator distribusi mempunyai konstruksi hampir sama dengan transformator tenaga, yang membedakannya adalah alat bantu dan sistem pengamanannya, sistem pendingin, pengoperasian, fungsi serta pemakaiannya. Bagian – bagian dari transformator dapat dilihat pada gambar di bawah :

1. Inti transformator

Inti besi berfungsi untuk mempermudah jalannya fluks yang ditimbulkan oleh arus listrik dari kumparan primer sehingga akan menimbulkan fluks pada inti besi yang kemudian akan timbul ggl induksi yang akan menginduksikan belitan sekunder. Inti besi tersebut diatas dibuat dari lempengan baja silikon tipis. Berdasarkan letak kumparannya ada dua jenis tipe inti yaitu tipe inti dan tipe cangkang.

a. Tipe inti (core type)

Tipe inti ini dibentuk dari lapisan besi berisolasi berbentuk persegi dan kumparan transformatornya dibelitkan pada dua sisi persegi. Pada konstruksi tipe inti, lilitan mengelilingi inti besi, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.5.



Gambar 2.5. konstruksi transformator tipe inti (core type)

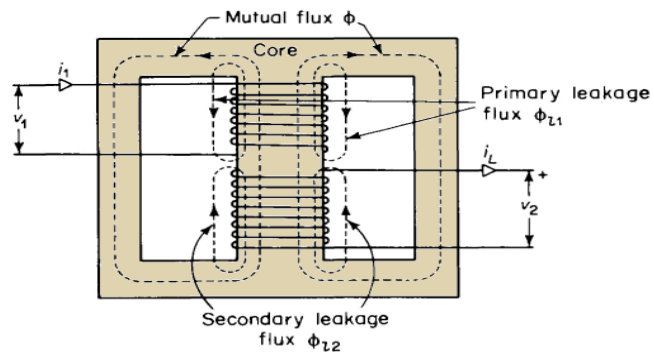
Sedangkan konstruksi intinya umumnya berbentuk huruf L atau huruf U (gambar 2.6)



Gambar 2.6. konstruksi lempengan logam inti transformator bentuk L dan U

b. Tipe cangkang (Shell Type)

Jenis Konstruksi transformator yang kedua yaitu tipe cangkang (shell type) yang dibentuk dari lapisan inti berisolasi, dan kumparan dibelitkan di pusat inti besi. Pada transformator ini, kumparan atau belitan transformator dikelilingi inti.



Gambar 2.7. Tipe Cangkang (Shell Type)

Sedangkan konstruksi intinya umumnya berbentuk huruf E, huruf I dan huruf F.



Gambar 2.8. konstruksi lempengan logam inti transformator

bentuk E, I dan F

2. Kumparan

Beberapa lilitan kawat berisolasi membentuk suatu kumparan, kumparan tersebut diisolasi baik terhadap inti besi maupun terhadap kumparan lain dengan isolasi padat, seperti kertas, kraft, karton, pertinax, dll. Umumnya pada transformator terdapat kumparan primer dan kumparan sekunder. Bila kumparan primer dihubungkan dengan tegangan/arus bolak – balik maka pada kumparan tersebut timbul fluks yang menginduksikan tegangan, bila pada rangkaian sekunder ditutup (rangkaian beban) maka akan mengalir arus pada kumparan ini.

3. Bushing

Pada transformator terdapat terminal primer dan terminal sekunder atau lilitan primer dan lilitan sekunder. Terminal dijaga agar tidak terjadi kontak langsung dengan tangki transformator. Untuk itu dibuat bushing pada setiap terminal suatu transformator. Dengan kata lain bushing adalah sebuah konduktor yang diselubungi isolator yang berfungsi sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan tangki transformator.

4. Sadapan

Sadapan merupakan suatu alat yang berfungsi untuk merubah kedudukan sadapan dengan maksud mendapatkan tegangan keluaran yang stabil walaupun beban berubah – ubah. Pengubah sadapan selalu diletakkan pada posisi tegangan tinggi dari trafo pada posisi tegangan tinggi. Pengubah sadapan dilakukan dalam keadaan tak berbeban (off load) pada transformator distribusi.

5. Tangki

Tangki transformator dibuat dengan bentuk silinder atau persegi empat dari pelat baja dan dirancang kedap air dan udara. Tangki terbuat dari pelat dengan permukaan yang halus yang dilas dan diperkuat dengan lipatan – lipatan atau seksi – seksi. Bagian luar harus di cat dengan cat yang tahan cuaca, dengan ketebalan minimum 70 mm, tidak mudah hilang dan berkualitas baik. Pada umumnya bagian – bagian elektrik transformator harus terendam minyak transformator, oleh karena itu bagian – bagian elektrik tersebut diletakkan dalam tangki. Dan konservator itu sendiri berfungsi sebagai penampung minyak transformator yang memuai apabila

terjadi kenaikan suhu dalam operasinya, dan menjaga kontak langsung antara minyak transformator dengan dengan udara.



Gambar 2.9. Tangki transformator

6. Minyak transformator

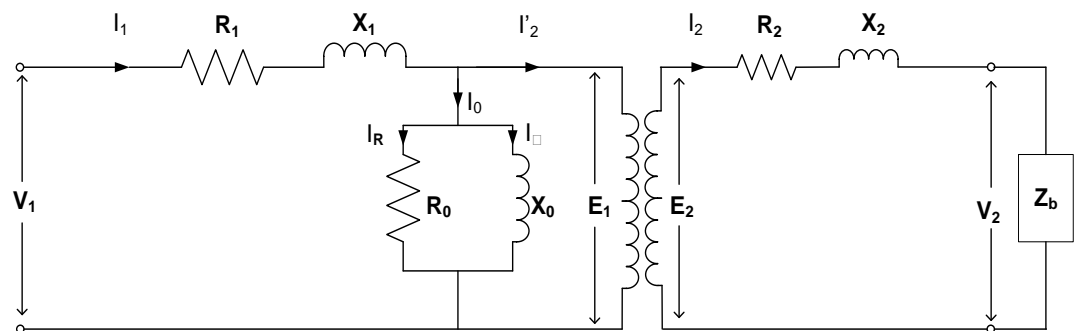
Minyak transformator yang digunakan harus minyak alami, untuk itu harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

- a. Kekuatan isolasi tinggi.
- b. Penyalur panas yang baik, berat jenis yang kecil sehingga partikel – partikel dalam minyak dapat mengendap dengan cepat.
- c. Viskositas yang rendah agar lebih mudah bersirkulasi dan kemampuan pendingin menjadi lebih baik.
- d. Titik nyala yang tinggi, tidak mudah menguap yang dapat membahayakan.
- e. Tidak merusak isolasi padat.

Semua peralatan yang berhubungan dengan ujung – ujung belitan transformator (terminal bushing sekunder) yang berada dalam tangki harus terendam minyak.

2.3. Rangkaian Pengganti Transformator

Transformator yang diperlihatkan pada gambar 2.4 sebelumnya dapat digambarkan rangkaian listriknya seperti pada gambar 2.10. Arus beban nol I_0 , terdiri dari komponen I_R dan I_ϕ , dimana arus I_R mengalir melalui tahanan murni R_0 , arus pemagnet I_ϕ mengalir melalui induktansi murni X_0 (lihat gambar 2.10)

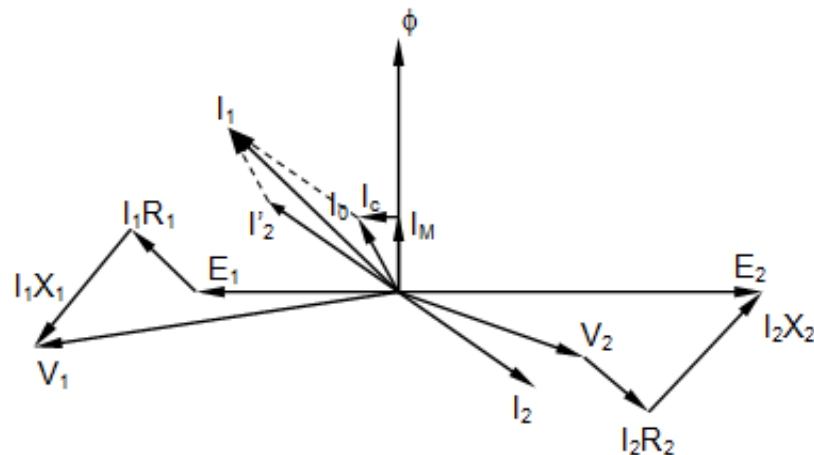


Gambar 2.10. Rangkaian listrik dari transformator berbeban

Dari rangkaian diatas dapat dibuat vektor diagramnya sebagai terlukis pada gambar 2.11. Dari model rangkain diatas dapat pula diketahui penjumlahan vektor:

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

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



Gambar 2.11. Diagram vektor transformator Berbeban

Untuk membuat perhitungan menjadi sederhana, rangkaian transformator pada gambar 2.10 harus diubah menjadi rangkaian pengganti transformator, yaitu tegangan dan arus serta impedansi dari kedua sisi disatukan ke salah satu sisi, bisa ke sisi primer maupun ke sisi sekunder. Bila rangkaian sekunder di transfer ke sisi primer, maka nilai arus dan impedansinya berubah menjadi :

- Tegangan induksi sekunder E_2 ditransfer ke primer menjadi

$$E_2 = aE_1$$

- Tegangan terminal V_2 ditransfer ke primer menjadi $V'_2 = aV_2$

- Arus sekunder I_2 ditransfer ke primer menjadi $I'_2 = \frac{I_2}{a}$

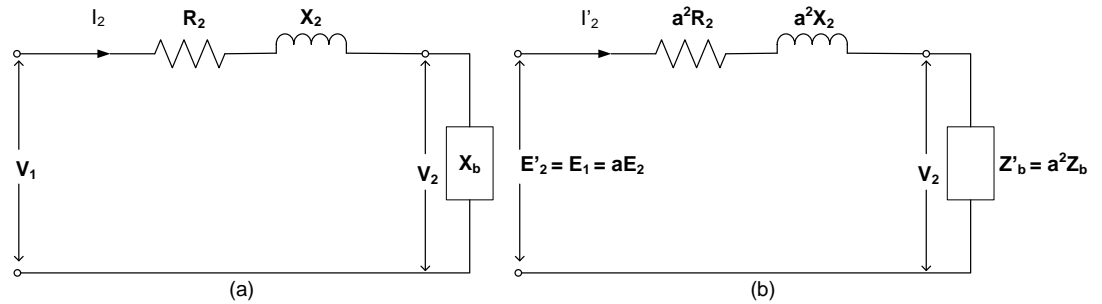
- Untuk mentransfer impedansi dari sekunder ke primer, digunakan faktor pengali a^2

$$R_2 \text{ ditransfer ke primer menjadi } R'_2 = a^2 R_2$$

$$X_2 \text{ ditransfer ke primer menjadi } X'_2 = a^2 X_2$$

$$\text{Beban } Z_b \text{ ditransfer ke primer menjadi } Z'_b = a^2 Z_b$$

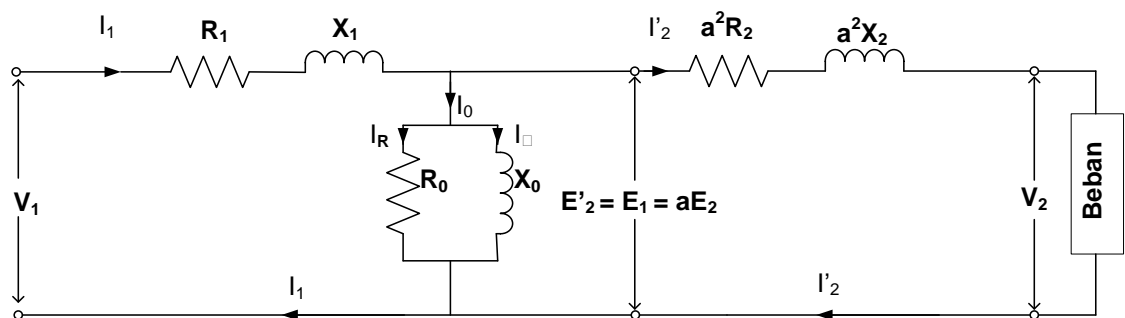
Rangkaian sirkit sekunder diperlihatkan pada gambar 2.12a dan rangkaian ekivalen yang diacu ke sisi primer seperti terlihat pada gambar 2.12b. Perubahan nilai sekunder akibat ditransfer ke sisi primer adalah sebagai berikut :



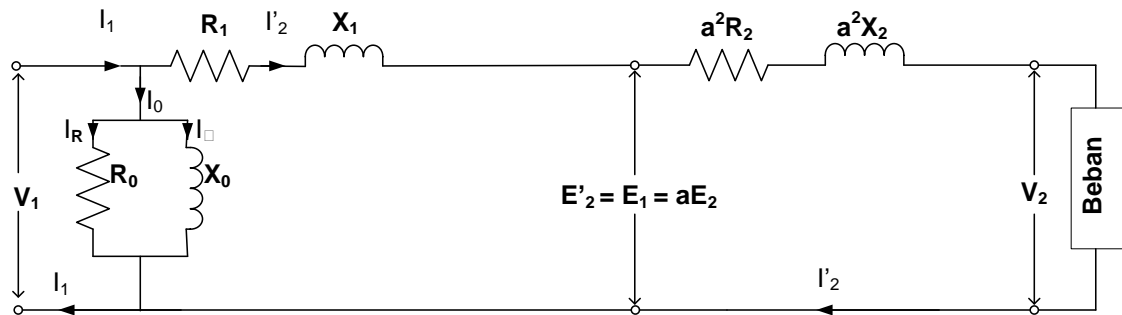
Gambar 2.12. Rangkaian yang diacu ke primer

(a) Rangkaian sirkit sekunder

(b) Rangkaian ekivalen yang diacu ke sisi primer



Gambar 2.13. Rangkaian ekivalen transformator yang diacu ke sisi primer



Gambar 2.14. Rangkaian ekivalen transformator yang diacu ke sisi primer
rangkaian magnetnya dipindahkan

$$R_2 = a^2 R, ; X, = a^2 X,$$

$$Z'_2 = R, + jX, = a^2 R_2 + ja^2 X_2 ; E = aE_2$$

Dan

$$V_2 = aV_2$$

Harga tegangan, arus dan impedansi dari sisi sekunder yang telah ditransfer atau diacu ke sisi primer dengan menggunakan persamaan berikut :

$$I'_2 = \frac{I_2}{a}$$

$$Z'_2 = a^2 Z_b$$

Sehingga rangkaian primer dan sekunder dari gambar 2.10 yang semula terpisah dapat digabung menjadi satu rangkaian, dan ini merupakan rangkaian ekivalen yang sebenarnya dari transformator (lihat gambar 2.13).

Untuk menyelesaikan persoalan transformator dengan menggunakan rangkaian ekivalen yang sebenarnya tersebut diatas sangat sulit. Maka dari itu untuk mempermudah perhitungan rangkaiannya disederhanakan, yaitu dengan memindahkana rangkaian arus pemagnetnya, seperti yang terlihat pada gambar 2.14.

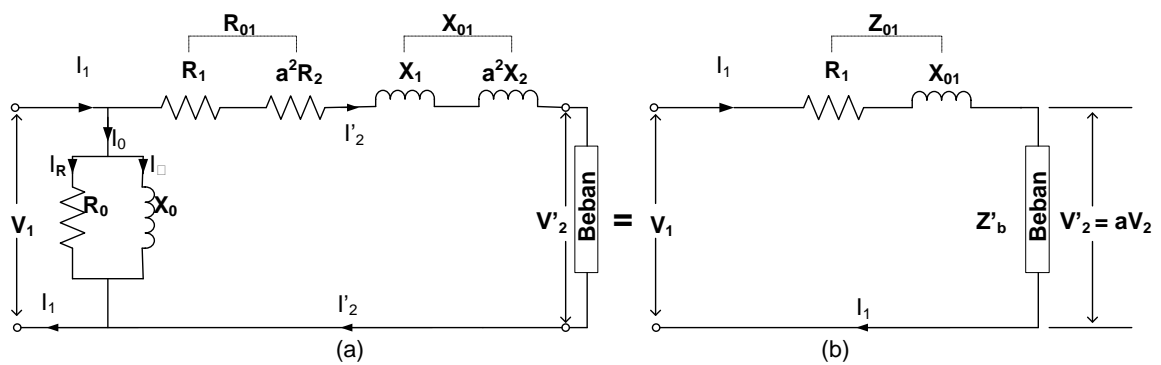
Selanjutnya tahanan dan reaktansi dari kedua kumparan dikumpulkan menjadi satu, seperti yang terlihat pada gambar 2.15a, dimana :

$$R_{01} = R_1 + a^2 R_2$$

$$X_{01} = X_1 + a^2 X_2$$

$$Z_{01} = R_{01} + a^2 jX_{01}$$

Penyederhanaan lebih lanjut ialah dengan mengabaikan I_0 , sehingga hasilnya seperti terlihat pada gambar 2.15b.



Gambar 2.15.(a)Rangkaian ekivalen transformator yang diacu ke sisi primer

(b)Rangkaian ekivalen transformator (disederhanakan) yang diacu ke sisi primer

2.4. Rugi – Rugi Transformator

Rugi – rugi transformator berupa rugi inti atau rugi besi dan rugi tembaga. Untuk mengurangi rugi besi penampang inti besi yang digunakan haruslah cukup besar agar fluks magnet mudah mengalir di dalamnya. Sedangkan untuk mengurangi rugi tembaga kawat tembaga yang digunakan haruslah cukup besar untuk mengalirkan arus yang diperlukan diperlukan. Rugi besi terdiri dari rugi arus eddy (*eddy current*) dan rugi hysteresis.

2.4.1. Rugi Arus Putar (Rugi Arus Eddy)

Rugi arus putar (rugi arus eddy) adalah rugi – rugi yang disebabkan oleh arus yang mengitari bagian dari suatu lapisan inti besi. Besar arus putar ditentukan oleh tegangan yang diinduksikan pada bagian tersebut dan sifat tahanan dari bahan inti yang dipakainya. Besar arus putar secara matematis adalah :

$$P_e = K_e \times f^2 \times B_m^2$$

Dimana : P_e = Rugi arus putar / arus eddy (watt)

K_e = Konstanta material inti

f = Frekuensi (Hertz)

B_{maks} = Rapat fluks maksimum (weber)

2.4.2. Rugi – Rugi Hysteresis

Rugi – rugi hysteresis yaitu rugi – rugi yang disebabkan fluks bolak – balik pada inti besi. Secara matematis rugi – rugi hysteresis dituliskan sebagai berikut :

$$P_h = \eta \times f \times V \times B_{maks}^{1,6}$$

Dimana : P_h = Rugi – rugi hysteresis (watt)

K_h = Koefisien Steinmetz

f = Frekuensi (Hertz)

V = Volume

B_{maks} = Rapat fluks maksimum (weber)

2.4.3. Rugi – Rugi Tembaga

Rugi – rugi tembaga adalah rugi – rugi daya pada saat transformator diberi beban. Rugi – rugi tembaga disebabkan oleh mengalirnya arus beban pada kawat tembaga. Karena arus beban berubah – ubah, maka rugi – rugi tembaga tergantung dari perubahan bebannya sehingga sering disebut rugi – rugi berbeban.

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

Dimana : P_{cu} = Rugi – rugi tembaga (watt)

I = Arus jala – jala (A)

R = Tahanan belitan (kumparan) (Ω)