



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum¹

Transformator merupakan peralatan listrik yang berfungsi untuk menyalurkan daya/tenaga dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya. Transformator menggunakan prinsip hukum induksi faraday dan hukum lorentz dalam menyalurkan daya, dimana arus bolak balik yang mengalir mengelilingi suatu inti besi maka inti besi itu akan berubah menjadi magnet.

Transformer atau trafo merupakan suatu peralatan yang dapat mengubah tenaga listrik dari suatu level tegangan ke level tegangan lainnya. Trafo biasanya terdiri atas dua bagian inti besi atau lebih yang dibungkus oleh belitan - belitan kawat tembaga. Prinsip pengubahan level tegangan dilakukan dengan memanfaatkan banyaknya jumlah belitan pada inti trafo. Bila salah satu kumpulan belitan, biasanya disebut belitan primer (N_1), diberikan suatu tegangan yang berubah-ubah, maka akan menghasilkan mutual flux yang berubah-ubah dengan besar amplitude yang tergantung pada tegangan, frekuensi tegangan, dan jumlah lilitan kawat tembaga di belitan primer. Mutual flux yang terjadi akan terhubung dengan belitan lain yang disebut sisi sekunder (N_2) dan akan menginduksi suatu tegangan yang berubah-ubah di dalamnya dengan nilai tegangan yang bergantung pada jumlah lilitan pada belitan sekunder. Dengan mengatur perbandingan jumlah lilitan antara sisi primer dan sekunder, maka akan dapat ditentukan rasio tegangan ataupun sering disebut rasio trafo.

Berdasarkan frekuensi transformator dapat dikelompokan menjadi:

1. frekuensi daya 50-60 c/s
2. frekuensi pendengaran 50 c/s-20 kc/s
3. frekuensi radio diatas 30 kc/s

Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator dapat dikelompokan sebagai berikut:

1. Transformator daya

¹Sumber: Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya. Zuhul. 1992

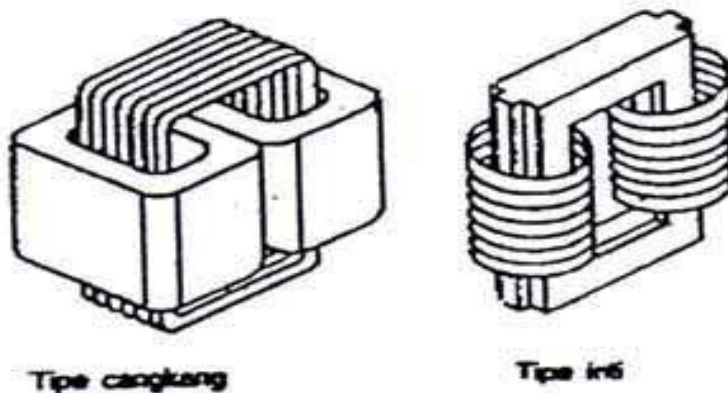
2. Transformator distribusi
3. Transformator pengukuran

2.2 Bentuk dan Konstruksi Transformator²

Ada dua perbedaan bentuk inti transformator yang biasa digunakan yang dinamakan tipe inti (core type) dan tipe cangkang (eggshell type) seperti ditunjukkan pada gambar 2.1 inti dari kedua tipe ini dibuat dari baja khusus berkerugian rendah dan dilaminasi untuk mengurangi kerugian inti.

Pada konstruksi tipe ini yang ditunjukkan dalam gambar 2.1 b, lilitan mengelilingi inti besi yang berlaminasi. Transformator komersial tidak dibentuk secara demikian karena sebagian besar fluksi yang dihasilkan lilitan primer tidak memotong lilitan sekunder, atau dikatakan bahwa transformator mempunyai kebocoran fluksi yang besar. Untuk menjaga agar kebocoran fluksi serendah mungkin, lilitan dibagi dua dan ditempatkan pada masing-masing kakinya.

Transformator konstruksi tipe cangkang dinyatakan dalam gambar 2.1 a, dalam konstruksi ini inti besi mengelilingi lilitan. Rakitan inti dan kumparan dari transformator tersebut biasanya dirancang untuk dicelupkan dalam minyak isolasi didalam tangki baja. Selain itu sifat isolasi ini, minyak juga menyalurkan panas dari inti dan kumparan ke permukaan tangki dan dibuang ke udara disekitarnya.



(a)

(b)

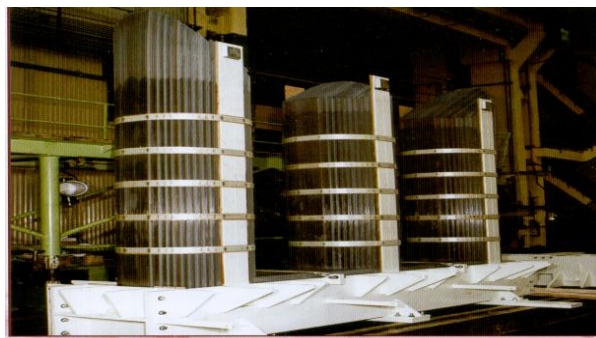
Gambar 2.1 a. Tipe Cangkang b. Tipe Inti

²Sumber: Transformator Tenaga. PT PLN. 2007

2.2.1 Inti trafo

Berfungsi untuk mempermudah jalan fluksi, yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan.

Dibuat dari lempengan-lempengan besi tipis yang berisolasi, untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh Eddy Current seperti gambar dibawah ini.



Gambar 2.2 Inti Besi dan Laminasi yang diikat Fiber Glass

2.2.2 Kumparan transformator

Adalah beberapa lilitan kawat berisolasi yang membentuk suatu kumparan. Kumparan tersebut terdiri dari kumparan primer dan kumparan sekunder yang diisolasi baik terhadap inti besi maupun terhadap antar kumparan dengan isolasi padat seperti karton, pertinak dan lain-lain.

Kumparan tersebut sebagai alat transformasi tegangan dan arus.



Gambar 2.3 Kumparan Phasa RST

2.2.3 Minyak trafo

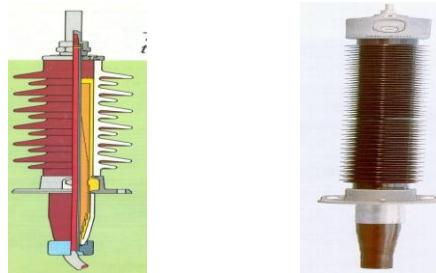
Berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi. Minyak trafo mempunyai sifat media pemindah panas (disirkulasi) dan mempunyai daya tegangan tembus tinggi.

Pada power transformator, terutama yang berkapasitas besar, kumparan-kumparan dan inti besi transformator direndam dalam minyak-trafo. Syarat suatu cairan bisa dijadikan sebagai minyak trafo adalah sebagai berikut:

1. Ketahanan isolasi harus tinggi ($>10\text{kV/mm}$)
2. Berat jenis harus kecil, sehingga partikel-partikel inert di dalam minyak dapat mengendap dengan cepat
3. Viskositas yang rendah agar lebih mudah bersirkulasi dan kemampuan pendinginan menjadi lebih baik
4. Titik nyala yang tinggi, tidak mudah menguap yang dapat membahayakan
5. Tidak merusak bahan isolasi padat
6. Sifat kimia yang stabil

2.2.4 Bushing

Hubungan antara kumparan trafo ke jaringan luar melalui sebuah bushing yaitu sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator, yang sekaligus berfungsi sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan tangki trafo. Pada bushing dilengkapi fasilitas untuk pengujian tentang kondisi bushing yang sering disebut center tap.



Gambar 2.4 Bushing

2.2.5 Tangki konservator

Berfungsi untuk menampung minyak cadangan dan uap/udara akibat pemanasan trafo karena arus beban. Diantara tangki dan trafo dipasangkan rele bucholz yang akan meyebak gas produksi akibat kerusakan minyak karena listrik. Untuk menjaga agar minyak terkontaminasi dengan air yang masuk bersama udara melalui saluran pelepasan dan masuknya udara kedalam konservator perlu dilengkapi media penyerap uap air pada udara sering disebut dengan silicagel tidak keluar mencemari udara disekitarnya.



Gambar 2.5 Konservator minyak trafo (tangkai)

2.3 Peralatan Bantu Transformator³

2.3.1 Pendingin

Berupa udara/gas,minyak, dan air. Sedangkan pengalirannya(sirkulasi) dapat dengan cara alamiah(natural) atau tekanan/paksaan.



Gambar 2.6 Pendingin

³Sumber:Pusat Pendidikan dan Pelatihan.PT PLN.2007

2.3.2 Tap changer

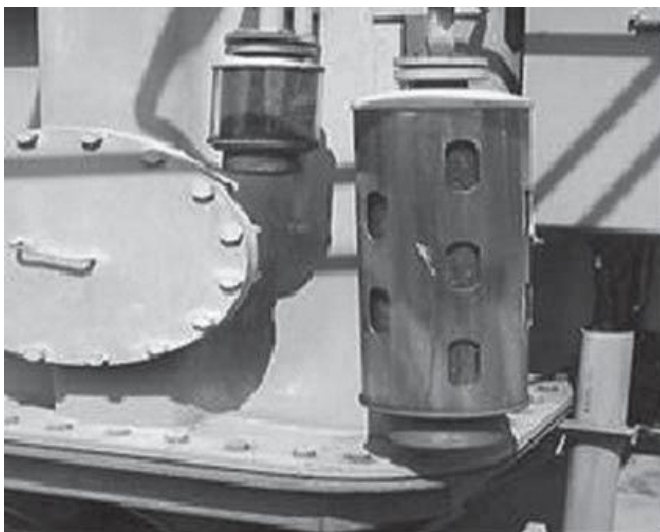
Berguna mengubah perbandingan tegangan, antara sisi primer dan sisi sekunder (agar konstan/stabil).



Gambar 2.7 Tap charger

2.3.3 Alat pernafasan

Bila suhu minyak tinggi, minyak akan memuai dan mendesak udara di atas permukaan minyak keluar dari dalam tangki, sebaliknya apabila suhu turun, minyak menyusut maka udara luar akan masuk kedalam tangki.



Gambar 2.8 silikagel

2.3.4 Pengaman

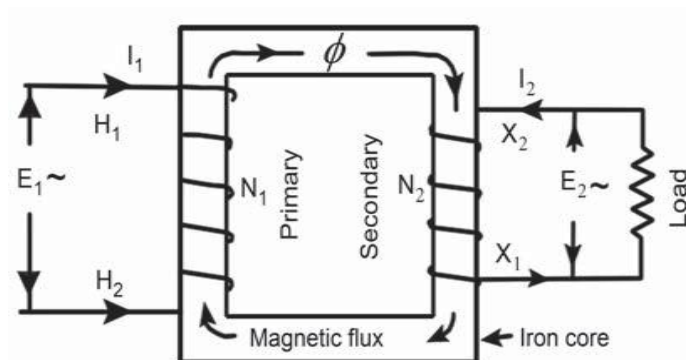
Yaitu Rele Bucholz untuk mendeteksi dan mengamankan terhadap gangguan di dalam trafo yang menimbulkan gas.



Gambar 2.9 Rele Bucholz

2.4 Prinsip Kerja Transformator⁴

Transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Tegangan masukan bolak-balik yang membentangi primer menimbulkan fluks magnet yang idealnya semua bersambung dengan lilitan sekunder. Fluks bolak-balik ini menginduksikan GGL dalam lilitan sekunder. Jika efisiensi sempurna, semua daya pada lilitan primer akan dilimpahkan ke lilitan sekunder.



Gambar 2.10 trafo disisi primer dan sekunder

⁴Sumber: Transformator Tenaga.PT PLN.2007

2.4.1 Transformator tanpa beban ⁵

Gambar menunjukkan suatu bentuk trafo dengan rangkaian pada sisi sekunder dalam keadaan terbuka ataupun tidak berbeban, dan pada bagian primernya diberikan tegangan berubah-ubah V_1 Kemudian arus I_ϕ yang biasa disebut sebagai arus eksitasi, akan mengalir pada sisi primer dan menghasilkan flux yang berubah-ubah secara magnetik. Flux tersebut menghasilkan gaya gerak listrik (emf) dengan persamaan sebagai berikut ini :

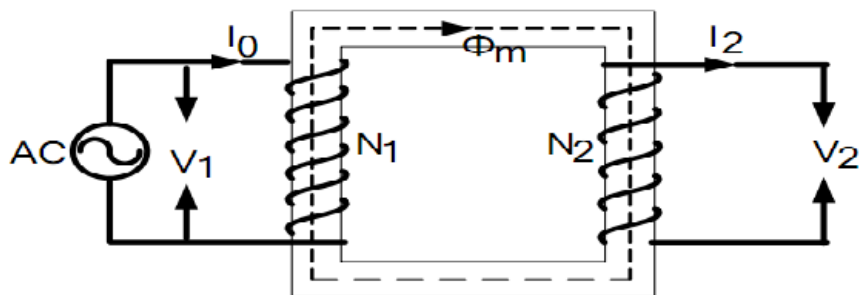
$$e_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \dots \dots \dots (2.1)$$

dimana :

λ_1 = flux di sisi primer

ϕ = flux di inti trafo yang menghubungkan kedua belitan

N_1 = jumlah lilitan kawat di belitan primer



Gambar 2.11 Trafo dengan sisi sekunder hubungan terbuka

Rumus tegangan adalah:

$$E_1 = 4,44 N_1 f \cdot \Phi_{max} 10^{-8}$$

Maka untuk transformator rumus tersebut sebagai berikut.

$$E_1 = 4,44 N_1 f_1 \cdot \Phi_{max} 10^{-8}$$

$$E_2 = 4,44 N_2 f_2 \cdot \Phi_{max} 10^{-8}$$

karena $f_1 = f_2$

⁵Sumber: IEC Standar 60076.Marsud.Makasar:Media Elektrik:2009



maka:

$$E_1: E_2 = N_1: N_2$$

$$E_1 N_2 = E_2 N_1$$

$$E_2 = (N_2 / N_1) \times E_1 \dots\dots\dots(2.2)$$

Di mana:

E_1 = tegangan primer

E_2 = tegangan sekunder

N_1 = belitan primer

N_2 = belitan sekunder

VA primer = VA sekunder

$$I_1 \times E_1 = I_2 \times E_2$$

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

$$\text{maka } I_1 = I_2 \frac{E_2}{E_1} \dots\dots\dots(2.3)$$

Di mana:

I_1 = Arus primer

I_2 = Arus sekunder

E_1 = tegangan primer

E_2 = tegangan sekunder

Rumus umum menjadi;

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = a \dots\dots\dots(2.4)$$

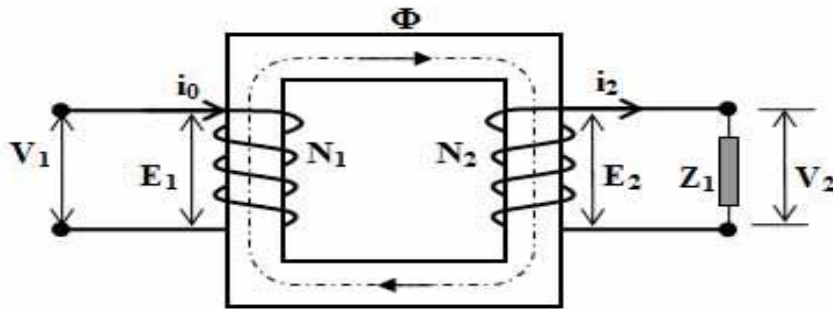
2.4.2 Transformator berbeban⁵

Bila belitan lilitan kawat tembaga di sisi sekunder pada gambar 1 diatas dihubungkan dengan beban, maka akan terlihat seperti pada gambar 2.

N_1 adalah jumlah lilitan di sisi primer dan N_2 adalah jumlah lilitan di sisi sekunder. Belitan sekunder terhubung ke beban dan diasumsikan bahwa arus

⁵Sumber: IEC Standar 60076.Marsud.Makasar:Media Elektrik:2009

yang keluar dari belitan sekunder adalah bernilai positif, maka arus tersebut akan menghasilkan gaya gerak magnet yang berlawanan arah dengan yang dihasilkan oleh arus dari lilitan primer. Dengan mengangap resistansi belitan dapat diabaikan, maka akan dihasilkan flux yang terbatas pada inti trafo yang menghubungkan kedua inti belitan (flux bocor diasuksikan dapat diabaikan).



Gambar 2.12 Trafo ideal terhubung dengan beban

Dengan asumsi tersebut di atas, maka pada gambar 1 dapat dikatakan apabila tegangan yang berubah waktu v_1 diberikan pada belitan primer akan dihasilkan flux inti ϕ yang menghasilkan gaya gerak listrik e_1 yang sebanding dengan tegangan v_1 .

$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots(2.5)$$

Flux pada inti juga terhubung ke bagian sekunder trafo sehingga menghasilkan induksi gaya gerak listrik emf e_2 sehingga belitan sekunder akan menghasilkan tegangan pada terminalnya dengan persamaan.

$$v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots(2.6)$$

Dengan membandingkan persamaan (2) dan (3) maka dapat diperoleh,

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} \dots\dots\dots(2.7)$$



Maka dapat dikatakan bahwa prinsip pengubahan tegangan pada trafo dilakukan dengan perbandingan antara jumlah belitan antara sisi primer dengan sisi sekundernya. Apabila suatu beban dihubungkan pada sisi sekunder trafo maka akan dihasilkan arus i_2 dengan mmf N_2i_2 .

Dari persamaan (1) dan dengan mengasumsikan permeabilitas inti trafo yang sangat besar, maka penambahan beban pada sisi sekunder trafo tidak mempengaruhi flux inti trafo. Total eksitasi mmf pada inti trafo tidak akan berubah dan bahkan dapat diabaikan. Maka akan diperoleh:

$$N_1i_1 - N_2i_2 = 0 \dots\dots\dots (2.8)$$

$$N_1i_1 = N_2i_2 \dots\dots\dots (2.9)$$

Dari kedua persamaan diatas dapat dituliskan persamaan (7) di bawah ini,

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} \dots\dots\dots (2.10)$$

Perbandingan arus yang mengalir pada sisi primer dengan sisi sekunder adalah berbanding terbalik dengan perbandingan antara jumlah lilitan pada kedua belitan trafo. Dari persamaan (4) dan (7) dapat dituliskan persamaan berikut

$$v_1i_1 = v_2i_2 \dots\dots\dots (2.11)$$

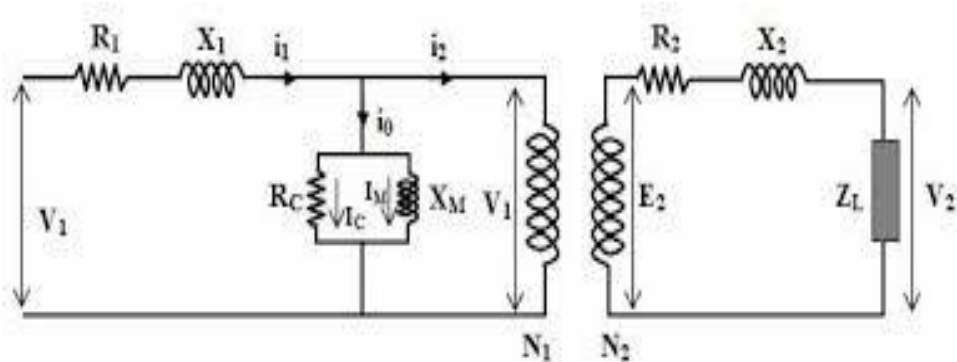
Dari persamaan diatas dapat dikatakan bahwa suplai daya yang terjadi pada sisi primer trafo akan bernilai sama dengan yang disalurkan pada sisi sekundernya akibat dari tidak adanya disipasi daya dan rugi-rugi daya.

2.5 Rangkaian Ekuivalen Transformator⁶

Pada umumnya, trafo yang digunakan di dunia ketenagalistrikan bukanlah trafo-trafo ideal, karena sangatlah sulit untuk memperoleh bahan pada inti dan belitan trafo yang dapat menghasilkan persamaan-persamaan sesuai dengan keadaan saat trafo pada keadaan ideal. Hal ini disebabkan oleh resistansi pada belitan, fluksi nyasar (rugi-rugi fluksi), dan permeabilitas inti trafo. Agar dapat memperoleh gambaran terhadap trafo yang digunakan, maka digunakanlah

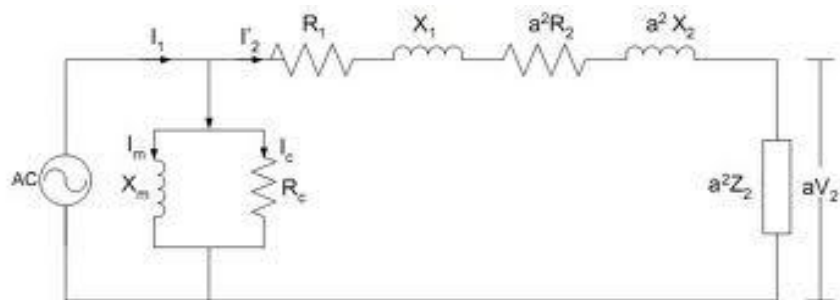
⁶Sumber: Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya. Zuhul. 1995

pemodelan trafo dengan cara membuat rangkaian pengganti pada trafo. Rangkaian pengganti trafo dapat dilihat seperti gambar di bawah ini.



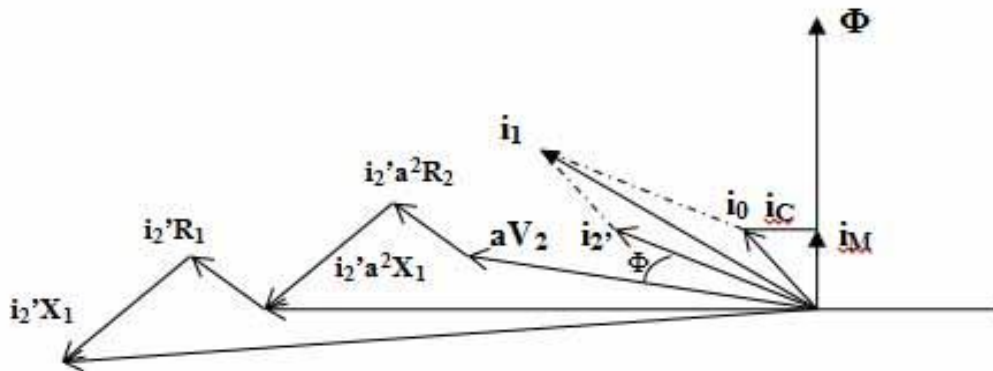
Gambar 2.13 Rangkaian pengganti trafo

Untuk memudahkan analisis (perhitungan),rangkaiannya dapat diubah menjadi seperti dapat dilihat pada gambar 2.14



Gambar 2.14 Rangkaian ekuivalen sederhana

Dari rangkaian diatas dapat dibuat vektor diagramnya sebagai terlukis pada gambar.



Gambar 2.15 Diagram Vektor

Dari model rangkaian diatas dapat pula diketahui hubungan penjumlahan vektor:

$$V_1 = E_1 + I_1 R_1 + I_1 X_1 \dots \dots \dots (2.12)$$

$$E_2 = V_2 + I_2 R_2 + I_2 X_2 \dots \dots \dots (2.13)$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \text{ atau } E_1 = a E_2$$

Hingga: $E_1 = a(I_2 Z_L + I_2 R_2 + I_2 X_2)$

Karena: $\frac{I_1 N_1}{I_2 N_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a}$ atau $I_2 = a I_1'$

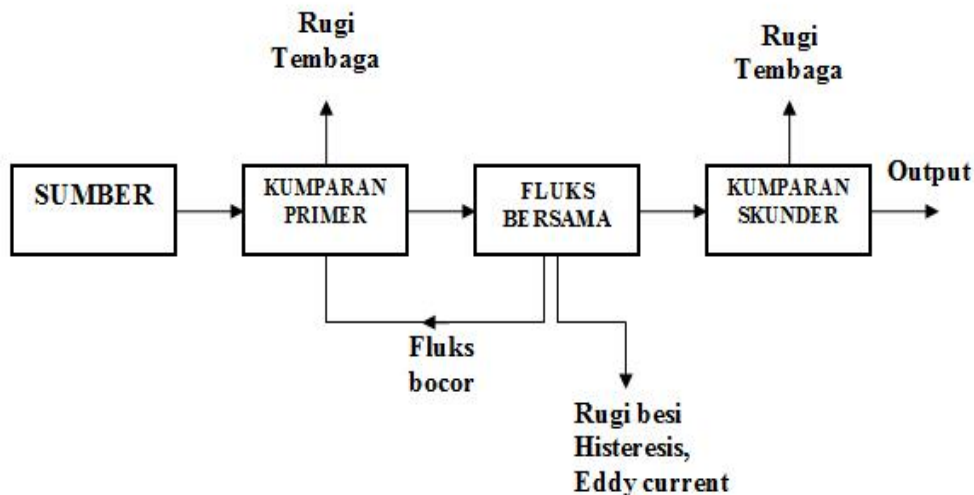
Maka: $E_1 = a^2 I_1' Z_L + a^2 I_1' R_2 + a^2 I_1' X_2$

Dan: $V_1 = a^2 I_1' Z_L + a^2 I_1' R_2 + a^2 I_1' X_2 + I_1 R_1 + I_1 X_1 \dots \dots \dots (2.14)$

Persamaan terakhir mengandung pengertian, apabila parameter rangkaian sekunder dinyatakan dalam harga rangkaian primer harganya perlu dikalikan dengan faktor a^2 .

2.6 Rugi-Rugi Transformator⁷

Didalam pengoperasiannya transformator mengalami rugi-rugi daya, baik pada kumparan maupun pada inti besinya. Rugi-rugi daya ini yang mempengaruhi efisiensi kerja dari transformator tersebut. Macam-macam rugi pada transformator adalah Kerugian tembaga. Kerugian dalam lilitan tembaga yang disebabkan oleh resistansi tembaga dan arus listrik yang mengalirinya. Rugi tembaga adalah rugi yang disebabkan arus beban mengalir pada kawat tembaga. Hal ini menimbulkan rugi tembaga (P_{cu}) sebesar $P_{cu} = I^2 R$, dimana: P_{cu} = Rugi tembaga (Watt); I = Arus (A); R = Tahanan (Ohm). Karena arus beban berubah-ubah, rugi tembaga juga tidak tetap tergantung pada beban.



Gambar 2.16 Blok Diagram Rugi-Rugi Pada Transformator

2.6.1 Rugi-rugi tanpa beban⁷

Rugi-rugi yang terjadi pada transformator tanpa beban membentuk arus I_0 yang terdiri dari:

a. Sebagai komponen aktif yaitu $I_{(h+e)}$ yang sefasa dengan V_1 yang merupakan penjumlahan dari rugi hesterisis dan arus eddy yang besarnya adalah:

$$I_{(h+e)} = I_0 \cos \phi \dots \dots \dots (2.15)$$

⁷Sumber: Dasar Teknik Tenaga Listrik. Yon Rijono. 1997



b. Komponen magnetisasi I_e tertinggal 90° dari V_1 yang besarnya:

$$I_{x0} = I_0 \sin \varphi \dots\dots\dots(2.16)$$

Sehingga dari seluruh komponen diatas besarnya nilai I_0 merupakan penjumlahan vector dari $I_{(h+e)}$ dan I_{x0}

$$I_0 = \sqrt{I(h + e)^2 + I_{x0}^2} \dots\dots\dots(2.17)$$

Pada keadaan tanpa beban ini arus primer I_0 tertinggal dari V_1 dengan sudut φ ($\varphi < 90^\circ$) sehingga daya masukan sebesar

$$P = V I \cos \varphi \dots\dots\dots(2.18)$$

Dari persamaan (2.18.) didapat:

$$S = V \times I \text{ sehingga}$$

$$P = S \times \cos \varphi \dots\dots\dots(2.19)$$

$$Q = S \times \sin \varphi \dots\dots\dots(2.20)$$

Dimana: S = Daya semu (VA)

P = Daya nyata (Watt)

Q = Daya reaktif (VAR)

1. Hysterisis losses (*rugi-rugi histerisis*)

Kerugian histerisis disebabkan oleh gesekan molekul yang melawan aliran gaya magnet di dalam inti besi. Gesekan molekul dalam inti besi ini menimbulkan panas. Panas yang timbul ini menunjukkan kerugian energi, karena sebagian kecil energi listrik tidak dipindahkan , tetapi diubah bentuk menjadi energi panas. Panas



yang tinggi juga dapat merusak trafo ,sehingga pada trafo – trafo transmisi daya listrik ukuran besar, harus didinginkan dengan media pendingin. Umumnya digunakan minyak khusus untuk mendinginkan trafo ini.

Sebuah trafo didesain untuk bekerja pada rentang frekuensi tertentu. Menurunnya frekuensi arus listrik dapat menyebabkan meningkatnya rugi-rugi histerisis dan menurunkan kapasitas (VA) trafo.

Rugi histerisis (Ph), yaitu rugi yang disebabkan fluks bolak – balik pada inti besi

yang dinyatakan sebagai berikut :

$$Ph = kh f B_{maks}^{1.6} \text{ (watt)} \dots\dots\dots(2.21)$$

Dimana: Kh = konstanta

Bmaks = Fluks maksimum (weber)

2. Kerugian karena Eddy current (*eddy current losses*)

Kerugian karena Eddy current disebabkan oleh aliran sirkulasi arus yang menginduksi logam. Ini disebabkan oleh aliran fluks magnetik disekitar inti besi. Karena inti besi trafo terbuat dari konduktor (umumnya besi lunak), maka arus Eddy yang menginduksi inti besi akan semakin besar. Eddy current dapat menyebabkan kerugian daya pada sebuah trafo karena pada saat terjadi induksi arus listrik pada inti besi, maka sejumlah energi listrik akan diubah menjadi panas. Ini merupakan kerugian.

Untuk mengurangi arus Eddy, maka inti besi trafo dibuat berlapis-lapis, tujuannya untuk memecah induksi arus Eddy yang terbentuk di dalam inti besi.

Rugi arus eddy (Pe) , yaitu rugi yang disebabkan arus pusar pada inti besi. Dirumuskan sebagai berikut:

$$Pe = ke f^2 B^2_{maks} \text{ (Watt)} \dots\dots\dots (2.22)$$



Dimana: Kh = konstanta

Bmaks = Fluks maksimum (weber)

Jadi, rugi besi (rugi inti) adalah :

$$P_i = P_h + P_e \text{ (Watt)} \dots\dots\dots (2.23)$$

2.6.2 Rugi-rugi tembaga (*copper losses*)⁷

Rugi – rugi yang ketiga adalah rugi-rugi tembaga (*copper losses*). Rugi-rugi tembaga terjadi di kedua kumparan. Kumparan primer atau sekunder dibuat dari gulungan kawat tembaga yang dilapisi oleh isolator tipis yang disebut enamel. Umumnya kumparan dibuat dari gulungan kawat yang cukup panjang. Gulungan kawat yang panjang ini akan meningkatkan hambatan dalam kumparan. Pada saat trafo dialiri arus listrik maka hambatan kumparan ini akan mengubah sejumlah kecil arus listrik menjadi panas yaitu sebesar (I^2R). Semakin besar harga R maka semakin besar pula energi panas yang timbul di dalam kumparan. Mutu kawat yang bagus dengan nilai hambatan jenis yang kecil dapat mengurangi rugi – rugi tembaga.

Rugi tembaga disebabkan oleh arus mengalir pada kawat tembaga yang terjadi pada kumparan sekunder dapat ditulis sebagai berikut :

$$P_{cu} = I^2 R \text{ (Watt)} \dots\dots\dots(2.24)$$

Jumlah rugi-rugi pada transformator keadaan berbeban adalah:

$$P_{\text{rugi total}}(\%) = \frac{P_{\text{rugi}}}{P_{\text{in}}} \times 100 \% \dots\dots\dots(2.25)$$

Karena arus beban berubah,rugi tembaga juga tidak konstan bergantung pada beban.Besarnya rugi-rugi tembaga pada setiap perubahan beban dapat ditentukan dengan persamaan:

$$P_{cu} = \left(\frac{\text{Beban yang dioperasikan}}{\text{Nilai pengenal}} \right)^2 \times \text{rugi tembaga beban penuh} \dots\dots\dots (2.26)$$

⁷Sumber:Dasar Teknik Tenaga Listrik.Yon Rijono.1997



2.7 Efisiensi⁸

Efisiensi transformator dapat diketahui dengan rumus $\eta = (P_o / P_i) \times 100\%$. Karena adanya kerugian pada transformator. Maka efisiensi transformator tidak dapat mencapai 100%. Untuk transformator daya frekuensi rendah, efisiensi bisa mencapai 98% dan dinyatakan dengan persamaan dibawah ini:

$$\eta = \frac{\text{Daya Keluaran (Pout)}}{\text{Daya Masukan (Pin)}} \dots\dots\dots (2.27)$$

atau:

$$\eta = \frac{\text{Daya Keluaran (Pout)}}{\text{Daya Keluaran (Pout)} + \sum \text{Rugi}} \dots\dots\dots (2.28)$$

$$\eta = 1 - \frac{\sum \text{Rugi}}{\text{Daya Masukan (Pin)}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.29)$$

a. Perubahan efisiensi terhadap beban

$$\eta = \frac{V_2 \cos \phi}{V_2 \cos \phi + I_2 R_2 e k + \frac{P_i}{I_2^2}} \dots\dots\dots (2.30)$$

Agar η maksimum, maka

$$\frac{d}{dI_2} \left[I_2 R_2 e k + \frac{P_i}{I_2^2} \right] = 0 \dots\dots\dots (2.31)$$

Jadi

$$R_{2ek} = \frac{P_i}{I_2^2}$$
$$P_i = I_2^2 R_{2ek} = P_{cu} \dots\dots\dots (2.32)$$

Artinya : untuk beban tertentu, efisiensi maksimum terjadi ketika rugi tembaga = rugi inti



Pada efisiensi maksimum

Rugi P_{cu} = Rugi Besi

Beban yang mempunyai efisiensi maksimum:

$$\sqrt{\left(\frac{\text{Rugi besi}}{\text{Rugi } P_{cu} \text{ pada beban penuh}}\right) x \text{beban penuh}} \dots \dots \dots (2.33)$$

b. Perubahan efisiensi terhadap faktor kerja ($\cos \Phi$) beban

$$\eta = 1 - \frac{\sum \text{Rugi}}{V_2 I_2 \cos \Phi + \sum \text{Rugi}}$$

$$\eta = 1 - \frac{\sum \text{Rugi} / N_2 I_2}{\cos \Phi + \sum \text{Rugi} / N_2 I_2} \dots \dots \dots (2.34)$$

Bila $\sum \text{Rugi} / V_2 I_2 = X =$ konstan, maka.

$$\eta = 1 - \frac{x}{\cos \Phi + x}$$

$$\eta = 1 - \frac{x / \cos \Phi}{1 + x / \cos \Phi} \dots \dots \dots (2.35)$$

2.8 Menentukan Parameter⁹

Parameter transformator yang terdapat pada model rangkaian (rangkaiannya ekuivalen) R_c, X_m, R_{ek}, X_{ek} dapat ditentukan dengan dua macam pengukuran (test) berikut:

2.8.1 Pengukuran beban nol⁹

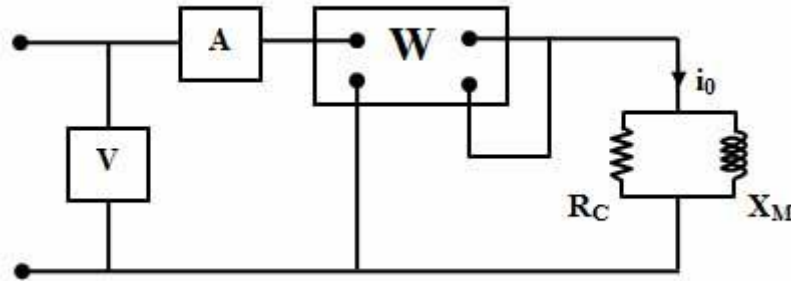
Dalam keadaan tanpa beban bila kumparan primer dihubungkan dengan sumber V_1 , seperti telah diterangkan terdahulu maka hanya I_0 yang mengalir. Dari pengukuran daya yang masuk (P_1), arus I_0 dan tegangan V_1 akan diperoleh harga :

$$R_c = V^2 / P \dots \dots \dots (2.36)$$

⁹Sumber: Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya. Zuhail. 1991

$$Z_o = V_1 / I_o = j (X_M R_c) / (R_c + jX_M) \dots \dots \dots (2.37)$$

Dengan demikian, dari pengukuran beban nol dapat diketahui Harga R_c dan X_M .



Gambar 2.17 Rangkaian pengukuran beban nol

2.8.2 Pengukuran hubung singkat⁹

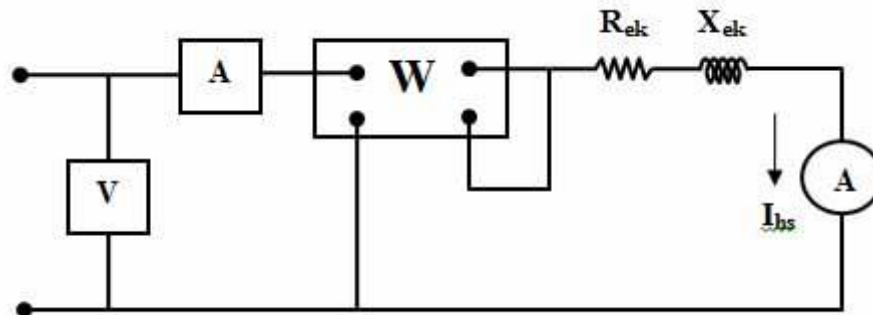
Hubung singkat berarti impedansi Z_L diperkecil menjadi nol, sehingga impedansi $Z_{ek} = R_{ek} + jX_{ek}$. Yang membatasi arus. Karena harga R_{ek} dan X_{ek} ini relatif kecil, harus dijaga tegangan yang masuk (V_{hs}) cukup kecil sehingga arus yang dihasilkan tidak melebihi arus normal. Harga I_o akan relatif kecil jika dibandingkan dengan arus nominal, sehingga pada pengukuran ini dapat diabaikan. Dengan mengukur tegangan V_{hs} , arus I_{hs} dan daya P_{hs} akan dapat dihitung parameter:

$$R_{ek} = \frac{Ph.s}{(I_{h.s})^2} \dots \dots \dots (2.38)$$

$$Z_{ek} = \frac{V_{h.s}}{I_{h.s}} = R_{ek} + jX_{ek} \dots \dots \dots (2.39)$$

$$X_{ek} = Z_{ek} - R_{ek} \dots \dots \dots (2.40)$$

⁹Sumber: Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya. Zuhul. 1991



Gambar 2.18 Pengukuran hubung singkat

2.9 Transformator (Trafo) Daya¹⁰

Transformator Daya adalah suatu peralatan tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan tenaga/daya listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya (mentransformasikan tegangan). Dalam operasi umumnya, trafo-trafo tenaga ditanahkan pada titik netralnya sesuai dengan kebutuhan untuk sistem pengamanan/proteksi, sebagai contoh transformator 150/70 kV ditanahkan secara langsung di sisi netral 150 kV, dan transformator 70/20 kV ditanahkan dengan tahanan di sisi netral 20 kV nya. Transformator yang telah diproduksi terlebih dahulu melalui pengujian sesuai standar yang telah ditetapkan.

2.9.1 Fungsi/pemakaian

Berdasarkan fungsi/pemakaiannya transformator terdiri dari :

1. Transformator Pembangkit
2. Transformator Gardu Induk
3. Transformator Distribusi

2.9.2 Kapasitas dan tegangan

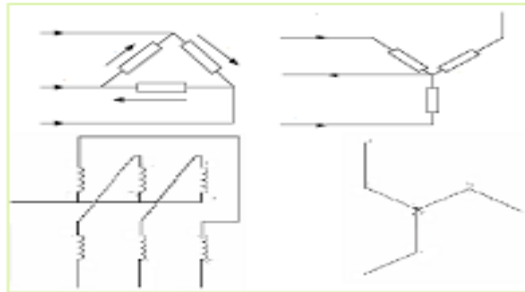
Berdasarkan kapasitas dan tegangannya transformator terdiri dari :

1. Trafo Besar
2. Trafo Sedang
3. Trafo Kecil

¹⁰Sumber: Trafo Daya. <http://www.transformator.com>. 16 April 2015 pukul 10.30

2.10 Transformator Tiga Fasa¹¹

Transformator tiga fasa sebenarnya adalah tiga transformator yang dihubungkan secara khusus satu sama lain. Lilitan primer biasanya dihubungkan secara bintang (Y) dan lilitan sekunder dihubungkan secara delta (Δ).



Gambar 2.19 transformator 3 fasa

Ciri-ciri transformator 3 fasa,yaitu:

- 1.Kumparan primer dan sekunder dapat dibuat beberapa macam vektor group dan angka jam yang sesuai dengan yang diinginkan
- 2.Ketiga transformator dapat dioperasikan ke beban menjadi satu fasa dengan cara yang di hubung paralel
- 3.Dengan daya yang sama ketiga fasa maka untuk 3x1 fasa dibandingkan dengan 1x3 fasa lebih berat dan lebih mahal.
- 4.Tegangan untuk ketiga fasanya primer dan sekunder betul-betul seimbang.

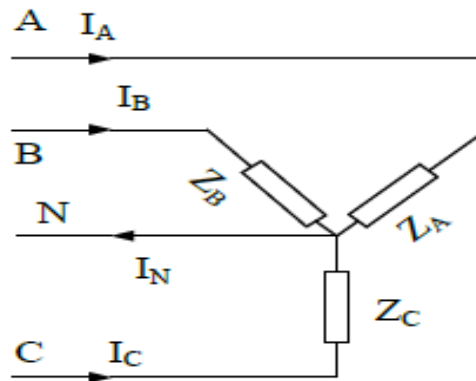
2.11 Hubungan Belitan Transformator Tiga Fasa¹²

Secara umum ada 3 macam jenis hubungan pada transformator tiga fasa yaitu :

2.11.1 Hubungan bintang (Y)

¹¹Sumber: Modul Perkuliahan Trafo Tiga Fasa.2014

¹²Sumber:Hubungan Belitan Trafo.<http://www.transformator3fasa.com>.16 April 2015 pukul 11.00



Gambar 2.20 Rangkaian hubungan bintang

Hubungan bintang ialah hubungan transformator tiga fasa, dimana ujung-ujung awal atau akhir lilitan disatukan. Titik dimana tempat penyatuan dari ujung-ujung lilitan merupakan titik netral. Arus transformator tiga fasa dengan kumparan yang dihubungkan bintang yaitu; I_A , I_B , I_C masing-masing berbeda 120° .

Transformator tiga fasa hubungan bintang. Dari gambar diperoleh bahwa :

$$I_A = I_B = I_C = I_L$$

$$I_L = I_{ph}$$

$$V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = V_{L-L}$$

$$V_{L-L} = V_{ph}$$

Dimana :

V_{L-L} = tegangan line to line (Volt)

V_{ph} = tegangan fasa (Volt)

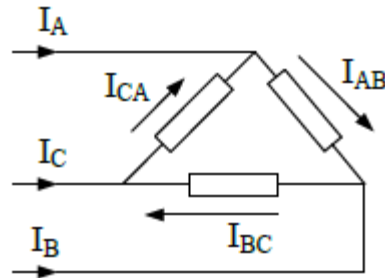
I_L = arus line (Ampere)

I_{ph} = arus fasa (Ampere)

$$V_A = 3V_P I_P$$

$$V_A = 3\left(\frac{V_L}{\sqrt{3}}\right)I_L = \sqrt{3} V_L I_L \dots \dots \dots (2.41)$$

2.11.2 Hubungan segitiga/ delta (Δ)



Gambar 2.21 Rangkaian hubungan delta

Hubungan segitiga adalah suatu hubungan transformator tiga fasa, dimana cara penyambungannya ialah ujung akhir lilitan fasa pertama disambung dengan ujung mula lilitan fasa kedua, akhir fasa kedua dengan ujung mula fasa ketiga dan akhir fasa ketiga dengan ujung mula fasa pertama. Tegangan transformator tiga fasa dengan kumparan yang dihubungkan segitiga yaitu; V_A , V_B , V_C masing-masing berbeda 120° .

Transformator tiga fasa hubungan segitiga/delta. Dari gambar diperoleh bahwa :

$$I_A = I_B = I_C = I_L$$

$$I_L = I_{ph}$$

$$V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = V_{L-L}$$

$$V_{L-L} = V_{ph}$$

Dimana :

V_{L-L} = tegangan line to line (Volt)

V_{ph} = tegangan phasa (Volt)

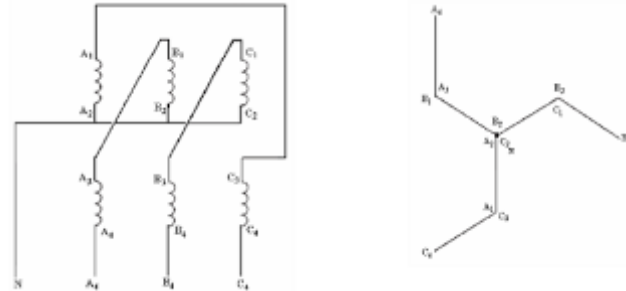
I_L = arus line (Ampere)

I_{ph} = arus phasa (Ampere)

$$V_A = V_P I_P$$

$$V_A = \sqrt{3} V_L I_L \dots \dots \dots (2.42)$$

2.11.3 Hubungan zigzag



Gambar 2.22 Rangkaian hubungan zig-zag

Transformator zig-zag merupakan transformator dengan tujuan khusus.

Salah satu aplikasinya adalah menyediakan titik netral untuk sistem listrik yang tidak memiliki titik netral. Pada transformator zig-zag masing-masing lilitan tiga fasa dibagi menjadi dua bagian dan masing-masing dihubungkan pada kaki yang berlainan.