



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Teori Dasar Transformator

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 dikelompokkan 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 dikelompokkan sebagai berikut:

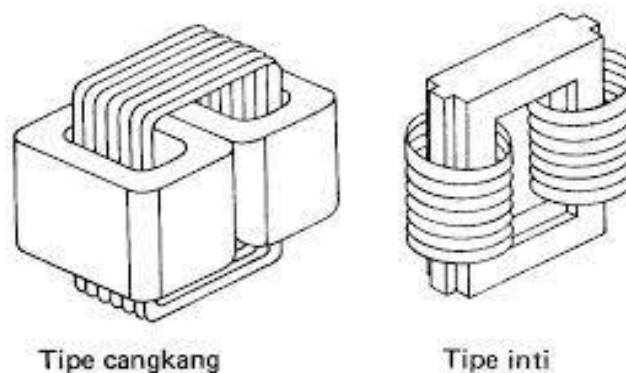
1. Transformator daya
2. Transformator distribusi
3. Transformator Pengukuran

## 2.2 Bentuk dan Konstruksi Transformator

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 kepermukaan tangki dan dibuang keudara disekitarnya.



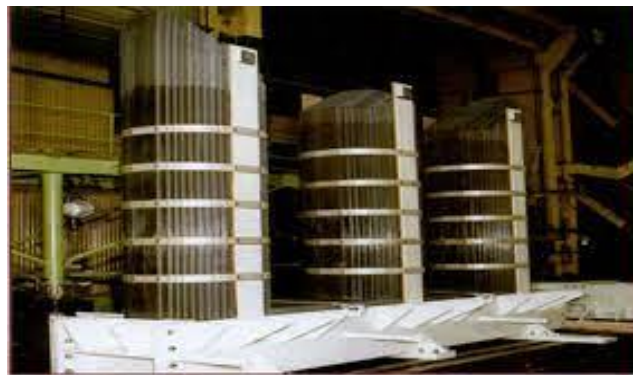
Gambar 2.1 a. Tipe Cangkang b. Tipe Inti



### 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 Fasa 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.

Macam-macam minyak trafo (minyak isolasi) yang banyak beredar dipasaran adalah :

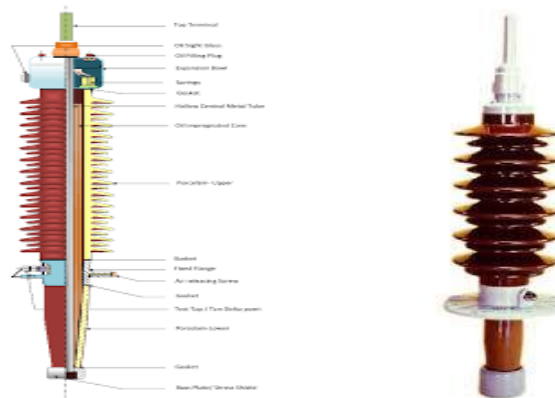
- Minyak Diala
- Minyak Esso
- Minyak Univolt
- Minyak Nynas
- Minyak BP
- Minyak Sun Om Oil

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 masukanya udara kedalam konservator perlu dilengkapi media penyerap uap air pada udara sering disebut denga silicagel tidak keluar mencemari udara disekitarnya.



Gambar 2.5 Konservator minyak trafo(tanky)

## 2.3 Peralatan Bantu Transformator

### 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

### 2.3.2 Tap changer

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



Gambar 2.7 Tap changer.

### 2.3.3 Alat pernafasan

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



Gambar 2.8 Silica gel.

### 2.3.4 Pengaman

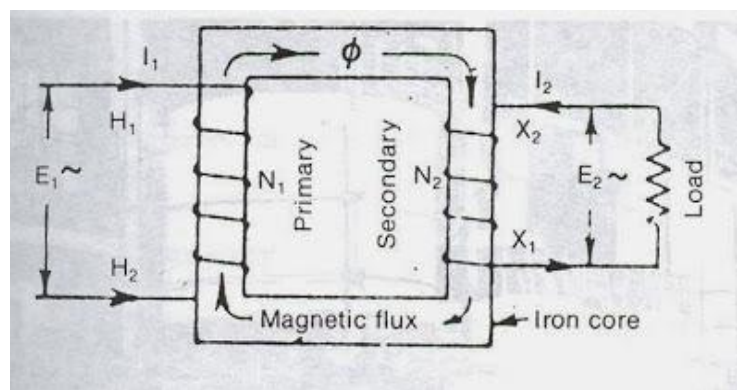
Yaitu Rele *Bucholz* untuk mendeteksi dan mengamankan terhadap gangguan di dalam trafo yang menimbulkan gas.



Gambar 2.9 Rele *Bucholz*

### 2.4 Prinsip Kerja Transformator

Transformator bekerja berdasarkan prinsip kerja 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



### 2.4.1 Transformator tanpa beban

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  $I_\phi$  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 :

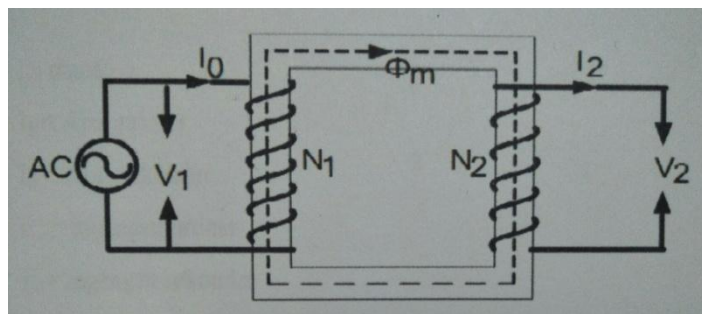
$$e_1 = \frac{d\lambda}{dt} = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots(2.1)$$

dimana :

$\lambda_1$  = flux di sisi primer

$\phi$  = flux di inti trafo yang menghubungkan kedua belitan

$NI$  = jumlah lilitan kawat di belitan primer



Gambar 2.11 Trafo dengan sisi sekunder hubungan terbuka

Rumus tegangan adalah:

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

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  $f_1 = f_2$

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

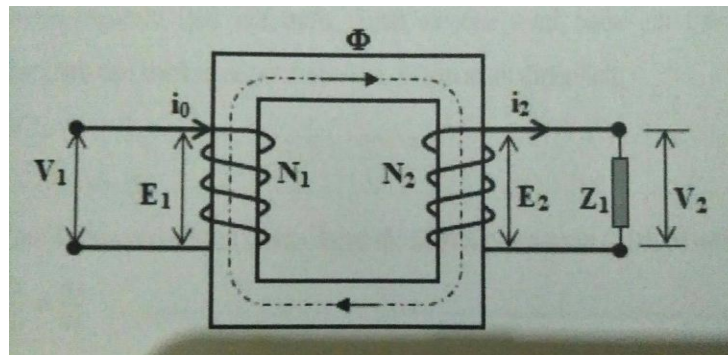
Rumus umum menjadi:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{V_1}{V_2} \dots \dots \dots (2.4)$$

### 2.4.2 Transformator berbeban

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 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 menganggap 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  $\phi$  yang menghasilkan gaya gerak listrik  $e_1$  yang sebanding dengan tegangan  $v_1$ .

$$V_1 = e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots (2.5)$$

Fluks 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,

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

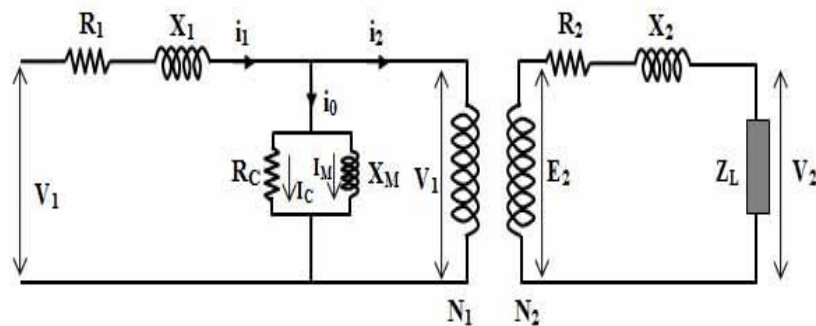
Perbandingan arus yang mengalir pada sisi primer dengan sisi sekunder adalah berbanding terbalik dengan perbandingan antara jumlah lilitan pada kedua belitan trafo. Dari persamaan (4) dan (7) dapat dituliskan persamaan berikut:

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

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.

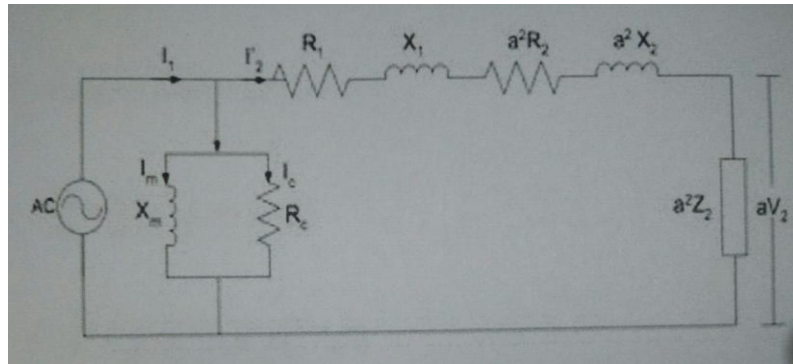
## 2.5 Rangkaian Ekuivalen Transformator

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



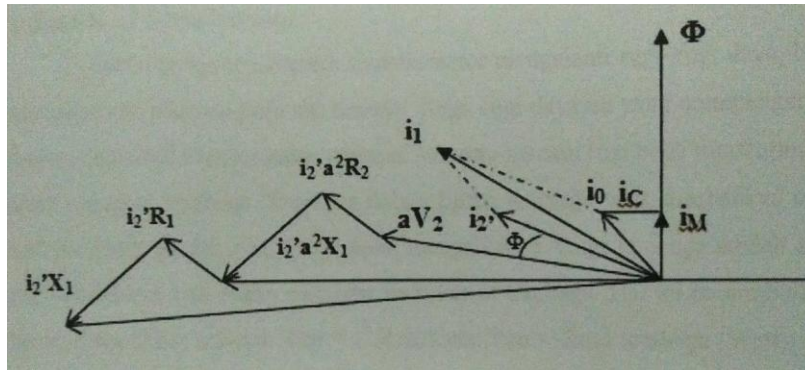
Gambar 2.13 Rangkaian pengganti trafo

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



Gambar 2.14 Rangkaian ekivalen 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:

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

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

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \text{ atau } E_1 = aE_2$$

Hingga:  $E_1 = a( I_2 X_2 + I_2 R_2 + I_2 X_1 )$



Karena:  $\frac{I_1'2}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} =$  atau  $I_2 = aI_1'$

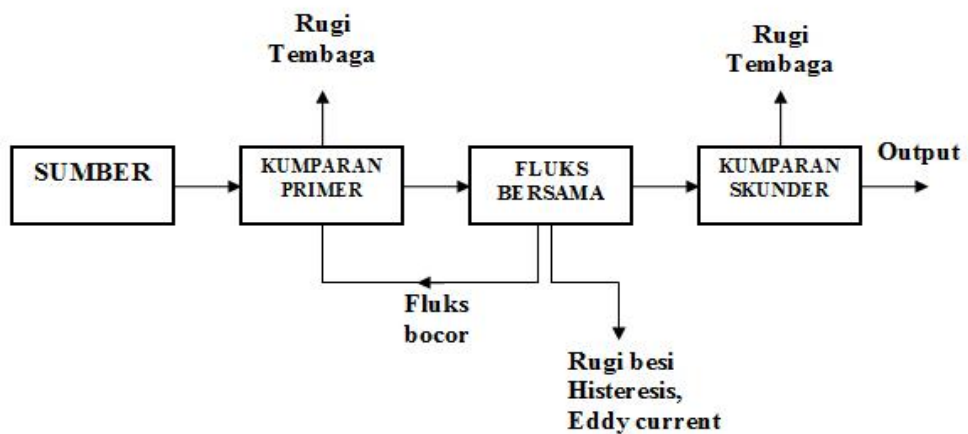
Maka:  $E_1 = a^2 I_1' Z_L + a^2 I_2 R_2 + a^2 I_1' X_2$

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 Transformator

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 beban

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:

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

b. Komponen magnetisasi  $I_e$  tertinggal  $90^\circ$  dari  $V_1$  yang besarnya:

$$I_{x_0} = I_0 \sin \phi \dots \dots \dots (2.16)$$

Sehingga dari seluruh komponen diatas besarnya nilai  $I_0$  merupakan penjumlahan vector dari  $I_{(h+e)}$  dan  $I_{x_0}$

$$I_0 = \sqrt{I_{(h+e)}^2 + I_{x_0}^2} \dots \dots \dots (2.17)$$

Pada keadaan tanpa beban ini arus primer  $I_0$  tertinggal dari  $V_1$  dengan sudut  $\phi$  ( $\phi < 90^\circ$ )

Sehingga daya masukan sebesar

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

Dari persamaan (2.18) didapat:

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

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

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

Dimana:

$$S = \text{Daya semu (VA)}$$

$$P = \text{Daya nyata (Watt)}$$

$$Q = \text{Daya reaktif (VAR)}$$





### 1. Hysterisis losses (*rugi-rugi tegangan*)

Oleh gesekan molekul Kerugian histerisis disebabkan 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 pembangkit 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 ( $P_h$ ), yaitu rugi yang disebabkan fluks bolak-balik pada inti besi yang dinyatakan sebagai berikut:

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

Dimana:

$k_h$  = konstanta

$B_{maks}$  = 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 ( $P_e$ ), yaitu rugi yang disebabkan arus pusar pada inti besi.

Dirumuskan sebagai berikut:

$$P_e = k_e f^2 B^2 \text{ maks (Watt)} \dots\dots\dots(2.22)$$

Dimana:

$k_h$  = konstanta

$B_{maks}$  = 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 tegangan (*copper losses*)

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 pada setiap perubahan beban dapat ditentukan dengan persamaan:

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

### 2.7 Efisiensi

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:

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

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

a. Perubahan efisiensi terhadap beban

$$\eta = \frac{V_2 \cos \phi}{V^2 \cos \phi + I^2 R^2_{ek} + \frac{P_i}{I_2^2}} \dots \dots \dots (2.30)$$

Agar  $\eta$  maksimum, maka

$$\frac{d}{dI_2} \left[ I^2 R^2_{ek} + \frac{P_i}{I_2^2} \right] = 0 \dots \dots \dots (2.31)$$

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:

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

b. perubahan efisiensi terhadap faktor kerja (Cos  $\phi$ ) beban

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma \text{Rugi}}{V^2 I^2 \cos \phi + \Sigma \text{Rugi}}$$

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

Bila  $\Sigma \text{Rugi} / V_2 I_2 = \text{konstan}$ , 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 Parameter

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

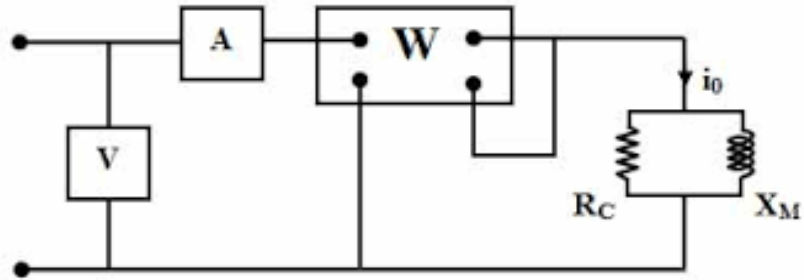
#### 2.8.1 Pengukuran beban nol

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

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

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

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



Gambar 2.17 Rangkaian pengukuran beban nol

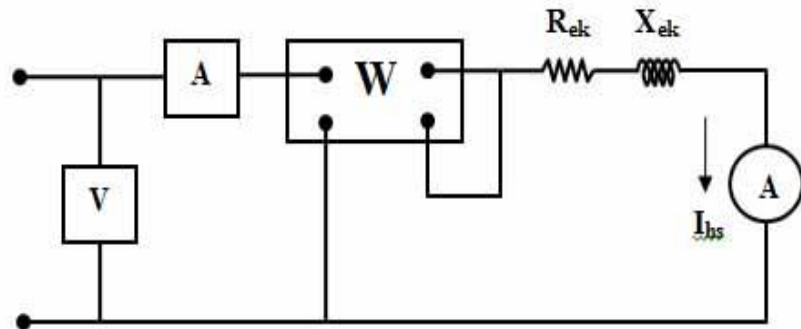
### 2.8.2 Pengukuran hubung singkat

Hubung singkat berarti impedansi  $Z_L$  di perkecil 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  $I_0$  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:

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

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

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



Gambar 2.18 Rangkaian pengukuran hubung singka



## **2.9 Transformator (Trafo) Daya**

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 daya ditanahkan pada titik netralnya sesuai dengan kebutuhan untuk sistem pengamanan/proteksi. 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

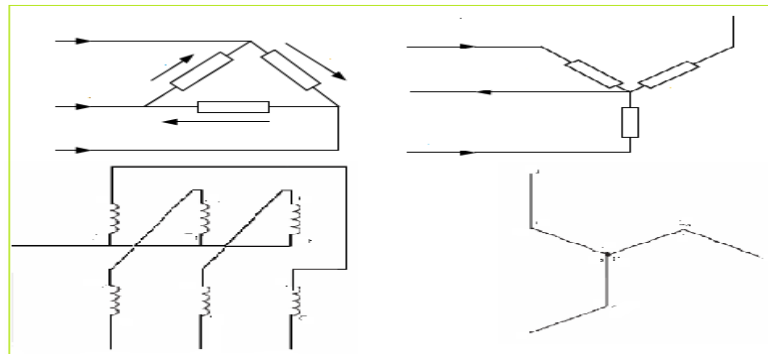
### **2.9.2 Kapasitas dan tegangan**

Berdasarkan kapasitas dan tegangannya transformator terdiri dari :

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

## **2.10 Transformator Tiga Fasa**

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 ( $\Delta$ ).



Gambar 2.19 transformator 3 fasa

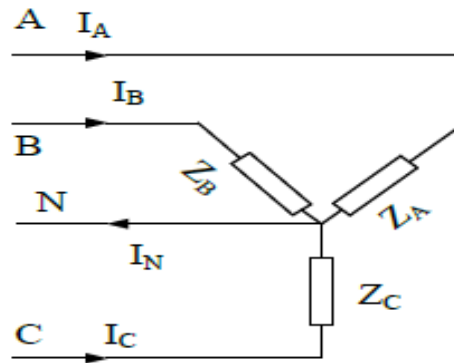
Ciri-ciri transformator 3 fasa,yaitu:

1. Kumbaran 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 samd 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 Fasa

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

### 2.11.1 Hubungan bintang (Y)



Gambar 2.20 Rangkaian hubungan bintang

Hubungan bintang ialah hubungan transformator tiga fasa, dimana ujungujung awal atau akhir lilitan disatukan. Titik dimana tempat penyatuan dari ujungujung lilitan merupakan titik netral. Arus transformator tiga fasa dengan kumparan yang dihubungkan bintang yaitu:  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  masing-masing berbeda  $120^\circ$ .

Transformator tiga fasa hubungan bintang. Dari gambar tersebut 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)

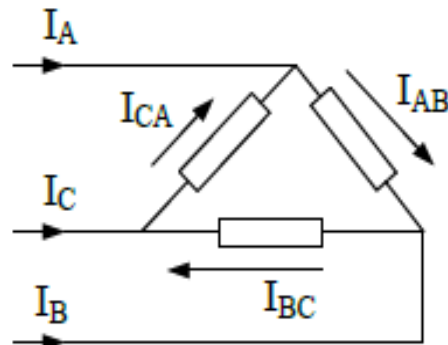
$I_{ph}$  = arus fasa (Ampere)

$$V_A = 3 V_p I_p$$

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

### 2.11.2 Hubungan segitiga/delta ( $\Delta$ )





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, VA, VB, VC masingmasing berbeda 120°.

Transformator tiga fasa hubungan segitiga/delta. Dari gambar tersebut 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)

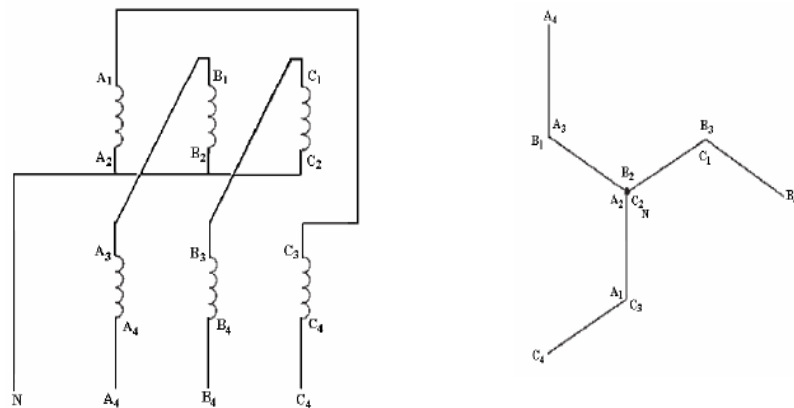
$I_L$  = arus line (Ampere)

$I_{ph}$  = arus fasa (Ampere)

$$VA = V_p I_p$$

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

### 2.11.3 Hubungan zig-zag



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.