

BAB II

MEKANISME TRANSFORMATOR

2.1. DEFINISI

Transformator adalah salah satu jenis mesin listrik statis dimana asal kata *transformator* tersebut berasal dari kata *transformasi* yang berarti perubahan. Jadi *trafo* adalah mesin listrik statis yang meneruskan tenaga listrik dari suatu rangkaian ke rangkaian lain dengan frekwensi yang sama dan tegangan juga arus yang berubah. Pada umumnya *transformator* terdiri dari dua bagian/sisi yaitu primer dan sekunder, tetapi ada juga yang memiliki tiga bagian/sisi dimana sisi ketiga disebut sisi tertier.

Maksud dari perubahan arus dan tegangan dapat dijelaskan melalui beberapa alasan sebagai berikut :

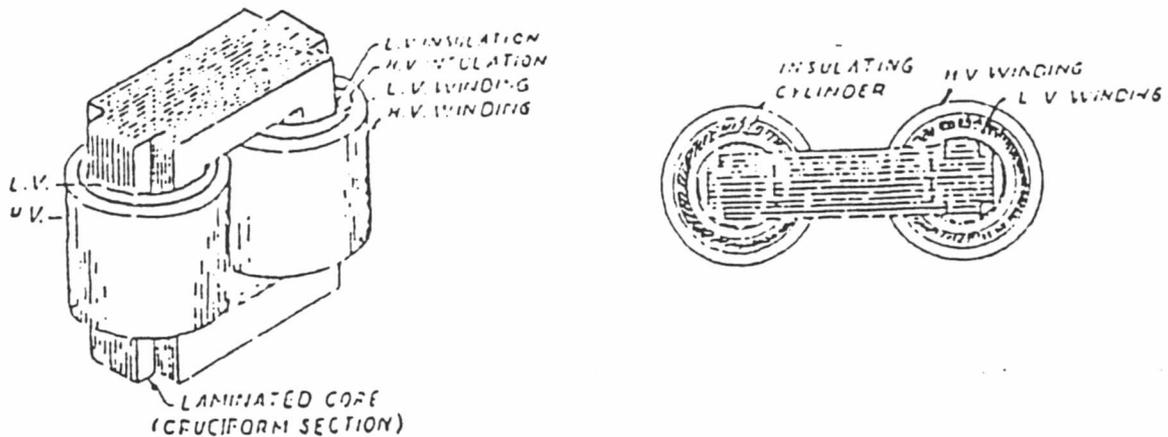
- a. Kegunaan terbesar adalah untuk sistem tenaga listrik, karena dengan adanya transformator memungkinkan meneruskan tenaga listrik pada jarak yang cukup jauh. Pada jarak yang jauh, kerugian transmisi I^2R adalah besar. maka untuk memperkecil kerugian tersebut dapat dilakukan dengan menaikkan sehingga arus yang mengalir akan kecil dan kerugian transmisi akan kecil juga.
- b. Untuk mengadakan pengukuran dari beberapa listrik. Misalkan bila kita akan mengukur tegangan 500 KV maka kita tidak dapat menghubungkan alat ukur secara langsung pada tegangan 500 KV. Cara untuk mengatasi

kondisi seperti ini adalah dengan menggunakan transformator pengukuran, dalam hal ini adalah transformator tegangan.

2.2. KONSTRUKSI TRANSFORMATOR

Elemen dasar dari transformator adalah belitan (*coil*) dan inti besi yang berlapis-lapis. Belitan-belitan tersebut dilapisi isolator sehingga antara belitan dan juga belitan terhadap inti tidak terjadi kontak. Bagian-bagian lain yang penting adalah *bejana/bak transformator* yang berfungsi sebagai tempat dari inti dan belitan. Isolator yang berfungsi sebagai media isolasi antara inti dan belitan terhadap bejana, biasanya digunakan minyak, *bushing* yang biasanya terbuat dari porselen dan berfungsi sebagai isolator dari konduktor yang disalurkan keluar bejana.

Secara umum konstruksi transformator ada dua jenis, yaitu jenis inti (*core type*) dan jenis cakang (*shell type*). Untuk jenis inti, belitan dari trafo ini mengelilingi inti sedangkan untuk jenis cakang, inti besi mengelilingi belitan. Untuk lebih jelasnya dari perbedaan ini dapat kita lihat pada gambar 2.1



Gambar 2.1
Transformator Jenis Inti¹⁾

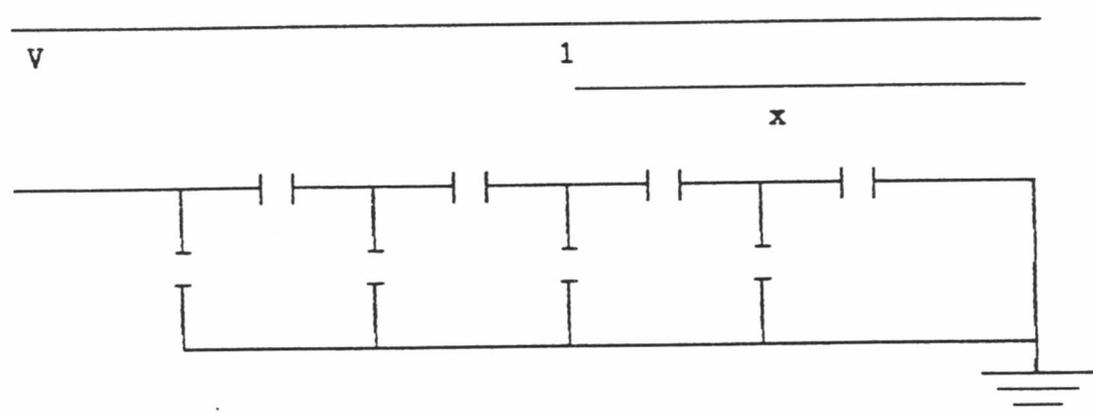
2.3. KONSTRUKSI TRANSFORMATOR TEGANGAN TINGGI

Pada dasarnya konstruksi dari *transformator tegangan tinggi* adalah sama dengan konstruksi *transformator tegangan rendah*. Hanya saja kumparan-kumparan pada *transformator tegangan tinggi* biasanya disusun berbentuk silinder dan kemudian dihubungkan seri atau berbentuk seperti piringan (*disc*) yang kemudian juga dihubungkan seri.

Secara sederhana kumparan *transformator* ini dapat dinyatakan sebagai rangkaian induktansi seri dan kapasitor seri dan paralel. Bila suatu rangkaian implus diberikan pada terminal maka distribusi tegangan hanya tergantung

¹⁾ B.L. Theraja. Electrical Technology, Nirja Construction & Development

pada kapasitasnya saja seperti terlihat pada gambar 2.2 dibawah ini.



Gambar 2.2
Rangkaian Ekuivalen Kapasitas Seri dan Pararel

Keterangan :

- 1 = panjang kumparan seluruhnya
- C_{ground} (C_g) = kapasitas total ke tanah
- C_{seri} (C_s) = kapasitas dari ujung kumparan ke ujung akhir.

Tegangan pada titik berjarak x dari netral diberikan oleh persamaan :

$$e_x = \frac{E \sinh \frac{\alpha x}{1}}{\sinh \alpha}$$

dimana :

$$\alpha = \frac{C_g}{C_s} \dots \dots \dots (2.1)$$

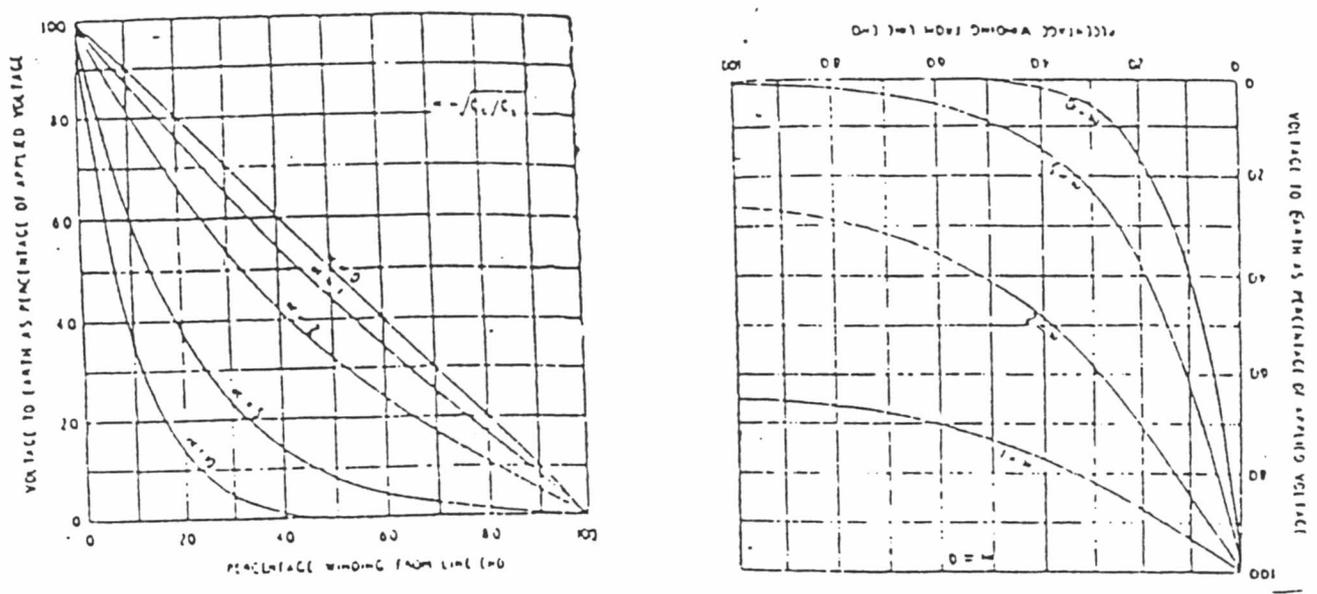
Distribusi tegangan pada saat-saat pertama tergantung dari perbandingan antara C_g dan C_s seperti terlihat pada

gambar 2.3. dengan bermacam-macam harga α . Dari sini terlihat bahwa untuk nilai α yang besar maka tegangan tidak terdistribusikan secara merata dan akibatnya ujung kumparan paling jauh dengan netral akan terkena tegangan paling tinggi. Kondisi seperti ini hanya berlaku untuk tegangan implus seperti petir atau surja hubung.

Agar distribusi tegangan karena tegangan implus dapat merata maka dapat dilakukan dengan cara menghilangkan kapasitas ke ground (C_g) atau menaikkan kapasitansi seri. Untuk menghilangkan C_g dapat dilakukan dengan memasang pelindung elektrostatik pada ujung kumparan, sedangkan untuk menaikkan nilai C_s dapat ditempuh dengan menggunakan konstruksi kumparan berbentuk disk dengan interleaved.

2.4. PRINSIP-PRINSIP ANALISA TRANSFORMATOR

Seperti dijelaskan terdahulu bahwa transformator berfungsi untuk merubah besarnya tegangan dan arus listrik melalui gandingan magnet. Untuk itu bagaimana terjadinya tegangan induksi ini akan dibahas berikut ini.



Gambar 2.3
 Distribusi Tegangan Tergantung Cg DAN Cs²⁾

2.4.1. Terbangkitnya Tegangan Industri

Untuk lebih memajukan pemahaman tentang bagaimana terbangkitnya tegangan industri ini kita mengambil asumsi-asumsi sebagai berikut :

- Rugi besi (hysterisis dan arus Eddy) diabaikan, sehingga I dan O sefasa.

²⁾ R.T Lythall. The J & P Transformer Hand Book. 11th Edition. Hal. 366.

- Dianggap tidak ada kejenuhan besi (I dan O linier).
- Belitan-belitannya dianggap tidak ada hambatan.
- Semua fluksi yang dihasilkan arus primer seluruhnya dilingkupi oleh belitan primer dan sekunder.
- Semua arus dan tegangan dianggap sinusoidal murni.

Kemudian bila kita memasang tegangan sinus $V = V_m \sin \omega t$ pada salah satu belitan transformator, maka akan mengalir arus I_0 dan I_0 ini membangkitkan fluks dalam besi kemudian terbangkit tegangan induksi yang oleh Faraday dirumuskan sebagai berikut :

$$e = - N \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots (2.2)$$

Bila $\phi = \phi_m \sin \omega t$. maka bila kita masukkan persamaan 2.2. diatas adalah :

$$e = - N \frac{d(\phi_m \sin \omega t)}{dt} \dots\dots\dots (2.3)$$

Bila persamaan 2.3. diturunkan dan diambil harga maksimumnya maka :

$$e_{\max} = -N \omega \phi_m = -N 2\pi f \phi_m \dots\dots\dots (2.4)$$

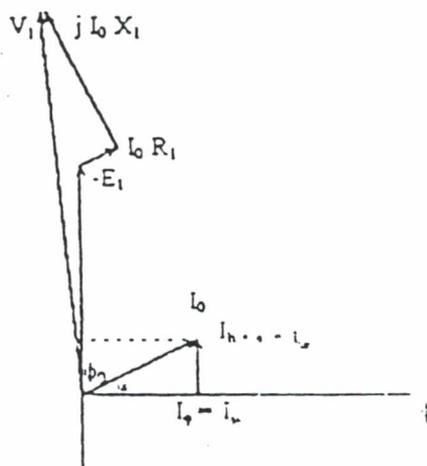
Sedangkan harga efektifnya adalah :

$$e_{\text{eff}} = - \frac{N 2\pi f \phi_m}{\sqrt{2}} = - 4,44 f \phi N \text{ volt} \quad (2.5)$$

Bila rugi-rugi tidak diabaikan maka akan berlaku ketentuan :

- Rugi besi mengakibatkan arus I_0 berbeda fase sebesar α dengan ϕ_m . sehingga I_0 merupakan resultante dari I_0 yang

- sefase dengan ϕ_m dan I_{h+0} yang merupakan komponen rugi besi (rugi hysteresis dan arus Eddy)
- Adanya kebocoran fluksi ϕ_1 yang sefase dengan I_0 akan menimbulkan drop tegangan sebesar $I_0 X_1$ yang mendahului 90° terhadap I_0
 - Adanya rugi tembaga menghasilkan drop tegangan sebesar $I_0 R_1$ yang sefase dengan I_0
- Dengan demikian tegangan total V_1 adalah merupakan penjumlahan vektor antara komponen emf lawan ($-E_1$), $I_0 X_1$ dan $I_0 R_1$ seperti diperlihatkan pada gambar 2.4.

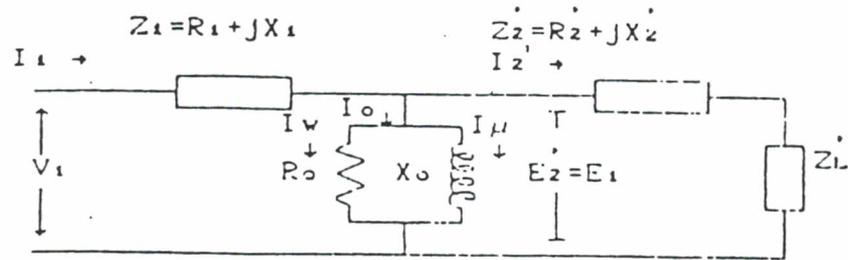


Gambar 2.4

Phasor Diagram Trafo Beban Nol

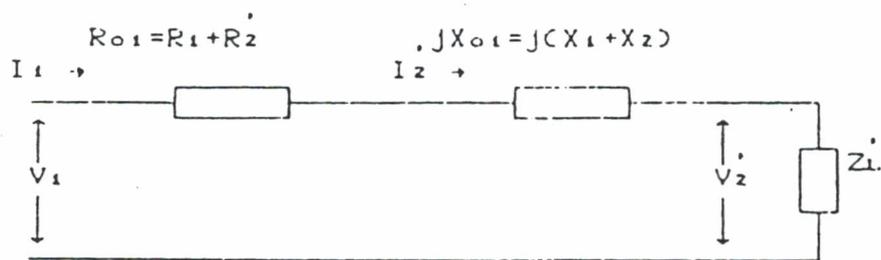
2.4.2. Rangkaian Ekuivalen

Transformator dapat digambarkan dalam rangkaian ekuivalen seperti gambar 2.5 dan 2.6.



Gambar 2.5

Rangkaian Ekuivalen Tanpa Mengabaikan R_o DAN X_o



Gambar 2.6

Rangkaian Ekuivalen Trafo Mengabaikan R_o DAN X_o

Karena besarnya Z_o (R_o/X_o) sehingga arus I_o sangat kecil, oleh karena itu bagian ini dapat diabaikan dan rangkaian ekivalennya seperti pada gambar 2.5.

2.4.3. Rugi-Rugi Pada Transformator

Pada transformator tidak terdapat rugi gesekan dan rugi angin. Disini yang mungkin terjadi adalah :

a. Rugi Inti atau Rugi Besi

Rugi ini terdiri dari dua komponen yaitu rugi hysteresis dan rugi Eddy.

Rugi hysteresis dirumuskan sebagai berikut :

$$P_h = \frac{M}{\delta} f B_m^x = k_h f B_m^x \quad \text{Watt} \dots \quad (2.6)$$

Rugi arus Eddy dirumuskan :

$$P_e = \frac{M}{\delta} t^2 \epsilon f^2 B_m^2 = k_e f^2 B_m^2 \quad \text{Watt} \dots \quad (2.7)$$

Sehingga rugi inti besi adalah :

$$\text{Rugi besi} = P_h + P_e \quad \text{Watt} \dots \quad (2.8)$$

dimana :

= konstanta yang tergantung dari bahan inti

M = massa inti

δ = density

f = frekwensi kerja dari fluke

B_m = kerapatan fluks maksimum

x = 1.7 - 2

t = tebal laminasi inti besi

$$\epsilon = \frac{\pi^2}{8}$$

b. Rugi tembaga

Rugi ini diakibatkan oleh resistansi dari belitan.

Total rugi tembaga dirumuskan sebagai berikut :

$$P_{\text{loss}} = (I_1)^2 R_1 + (I_2)^2 R_2 \quad \text{Watt} \dots\dots (2.9)$$

Disini terlihat bahwa rugi tembaga sebanding dengan I^2 atau KVA^2 atau dengan kata lain rugi tembaga pada setengah beban penuh sama dengan seperempat rugi tembaga beban penuh.

2.4.4. Testing Transformator

Untuk mencari parameter-parameter resistansi ekivalen R_{O1} (primer sebagai referensi), reaktansi bocor ekivalen X_{O1} (primer sebagai referensi), core loss conductance G_o (atau resistansi R_o) dan magnetising susceptance B_o (atau reaktansi X_o) dapat dilakukan dengan testing dibawah ini.

a. Open-Circuit Test (*Test Beban Nol*)

Tujuan dari pengetesan ini adalah untuk menghitung rugi beban nol atau rugi inti dan juga arus beban nol I_o yang mana sangat membantu dalam mencari R_o dan X_o .

Pada test ini, salah satu belitan dari transformator (biasanya sisi tegangan tinggi) dibiarkan terbuka, sedang pada belitan yang lain dipasang alat ukur seperti ampere meter, volt meter dan watt meter. Setelah itu pada sisi yang terdapat alat ukur disupplay

oleh tegangan nominal transformator.

Harga yang ditunjukkan oleh watt meter adalah rugi-rugi besi dari transformator, sedang yang ditunjukkan oleh ampere meter adalah rugi besi (I_o) dan arus rugi tembaga yang cukup kecil (diabaikan).

Dalam menurunkan persamaan untuk menentukan arga dari R_o dan X_o kita berpedoman pada gambar 2.4. dan pembacaan dari alat ukur yang digunakan.

Dari pembacaan alat ukur dapat diperoleh :

$$P_o = V_1 I_o \cos \phi_o \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

$$\phi_o = \cos^{-1} \frac{P_o}{\sqrt{(1 I_o)}}$$

$$I_u = I_o \sin \phi_o \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

$$X_o = \frac{V_1}{I_u}$$

$$I_w = I_o \cos \phi_o \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

$$R_o = \frac{V_1}{I_w}$$

b. Short Circuit Test (Test Hubung Singkat)

Pada test hubung singkat, salah satu belitannya (biasanya sisi tegangan rendah) dihubung singkatkan. Kemudian pada sisi yang lainnya disupply tegangan sekitar 5-10 % tegangan nominal dan dinaikkan perlahan-lahan hingga diperoleh harga arus beban penuh.

Tujuan dari short circuit test adalah untuk mengetahui besarnya impedansi ekivalen (Z_{O1} atau Z_{O2}), reaktansi bocor (X_{O1} atau X_{O2}), total resistansi (R_{O1} atau R_{O2}) dan juga rugi tembaga pada beban penuh seperti yang ditunjukkan pada watt meter.

Dari pembacaan alat ukur dapat diturunkan persamaan :

$$R_{O1} = \frac{P}{(I_1)^2} \dots\dots\dots (2.13)$$

$$Z_{O1} = \frac{V_{ac}}{I_1} \dots\dots\dots (2.14)$$

$$X_{O1} = (Z_{O1})^2 - (R_{O1})^2 \dots\dots\dots (2.15)$$

Dalam desain transformator biasanya $X_1 = X_2$, sedang untuk mencari harga R_1 dan R_2 dapat diukur dengan metode volt ampere menggunakan tegangan DC.

2.5. ARUS DAN TEGANGAN HARMONISA

Jika suatu elemen tidak linier mendapat eksitasi tegangan AC, maka akan dihasilkan suatu arus dengan bentuk suatu arus dengan bentuk tidak sinusoida. Dengan menggunakan analisa fourier pada bentuk gelombang arus yang diserap oleh komponen atau beban harmonisa maka dapat ditentukan komponen-komponen harmonisa yang ditimbulkannya.

Dalam sistem tenaga listrik, harmonisa dapat ditimbulkan oleh beban dan komponen jaringan yang mengandung karakteristik tak linier, antara lain adalah transformator, mesin-mesin listrik dan kompensator statis. Sedangkan beban-beban yang dapat menimbulkan harmonisa adalah konverter arus searah dan tanur busur listrik. Berikut ini akan diuraikan arus dan tegangan harmonisa yang disebabkan oleh komponen transformator saja.

Bentuk gelombang arus dari transformator ini sebetulnya tidak berbentuk sinus murni, jika diuraikan menurut deret fourier maka akan didapatkan arus yang mengandung komponen harmonisa ganjil dan dalam bentuk matematis dapat ditulis :

$$I = i_1 \sin wt + i_3 \sin 3wt + i_5 \sin 5wt + i_7 \sin 7wt + \dots \quad (2.16)$$

Tidak adanya harmonisa genap pada transformator dikarenakan gelombang yang dihasilkan oleh transformator berbentuk simetris antara gelombang positif dan negatifnya. Hal ini sesuai dengan salah satu ciri dari gelombang kompleks itu sendiri, yaitu bila gelombang kompleks berbentuk simetris antara gelombang positif dan negatifnya maka dapat disimpulkan bahwa gelombang tersebut mengandung gelombang fundamental (sinusoidal murni) dan gelombang harmonisa ganjil saja.

Jika proses terjadinya harmonisa tersebut terjadi pada transformator tiga phasa maka besar arus ketiga phasanya adalah :

$$I_A = i_{A1} \sin w + i_{A3} \sin 3wt + i_{A5} \sin 5wt + \dots \quad (2.17.a)$$

$$I_b = i_{B1} \sin \left(wt - \frac{2\pi}{3} \right) + i_{B3} \sin 3 \left(wt - \frac{2\pi}{3} \right) + \\ i_{B5} \sin 5 \left(wt - \frac{2\pi}{3} \right) + \dots \quad (2.17.b)$$

$$I_c = i_{C1} \sin \left(wt - \frac{4\pi}{3} \right) + i_{C3} \sin 3 \left(wt - \frac{4\pi}{3} \right) + \\ i_{C5} \sin 5 \left(wt - \frac{4\pi}{3} \right) + \dots \quad (2.17.c)$$

Selanjutnya diasumsikan bahwa beban yang terpasang adalah seimbang. maka berlaku :

$$i_{A1} = i_{B1} = i_{C1} = i_1 \quad \dots \quad (2.18.a)$$

$$i_{A3} = i_{B3} = i_{C3} = i_3 \quad \dots \quad (2.18.b)$$

$$i_{A5} = i_{B5} = i_{C5} = i_5 \text{ dan seterusnya} \quad \dots \quad (2.18.c)$$

Setelah asumsi tersebut dimasukkan kedalam persamaan (2.17), maka :

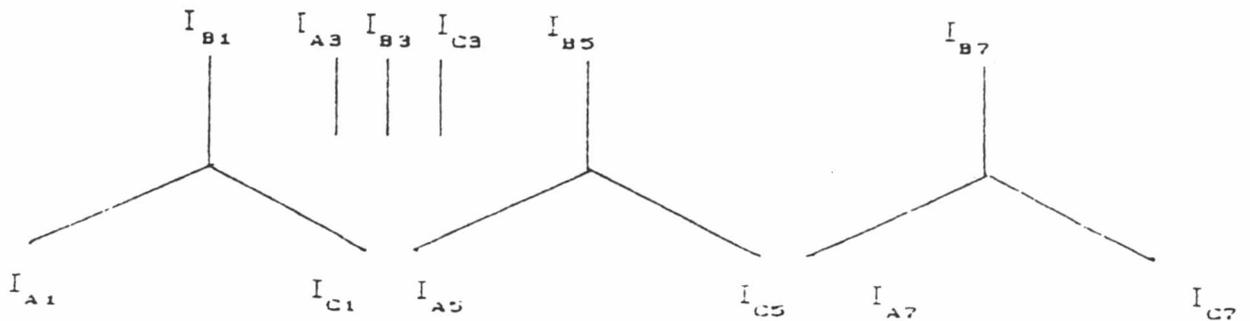
$$I_A = i_1 \sin wt + i_3 \sin 3wt + i_5 \sin 5wt + \dots \quad (2.19.a)$$

$$I_B = i_1 \sin \left(wt - \frac{2\pi}{3} \right) + i_3 \sin 3 \left(wt - \frac{2\pi}{3} \right) + \\ i_5 \sin 5 \left(wt - \frac{2\pi}{3} \right) + \dots \quad (2.19.b)$$

$$I_C = i_1 \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) + i_3 \sin 3 \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) + i_5 \sin 5 \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) + \dots \dots \dots (2.19.c)$$

Dari persamaan (2.19) diatas dapat dilihat hubungan antar ketiga fasa dan tegangannya. dimana untuk tiap-tiap komponen hamonisa terdapat hubungan sebagai berikut :

- a. Komponen harmonisa pertama untuk ketiga fasa mempunyai arah dan berbeda sudut 120°. sehingga resultannya pada titik netral adalah nol.
- b. Komponen harmonisa ketiga fasa mempunyai arah yang sama (sephasa), sehingga komponen harmonisa ketiga ini akan selalu ada dan mempunyai arah.
- c. Komponen harmonisa kelima untuk ketiga fasa mempunyai arah yang berbeda sudut 120° sehingga resultannya pada titik netral adalah nol. Begitu juga untuk harmonisa ke tujuh.

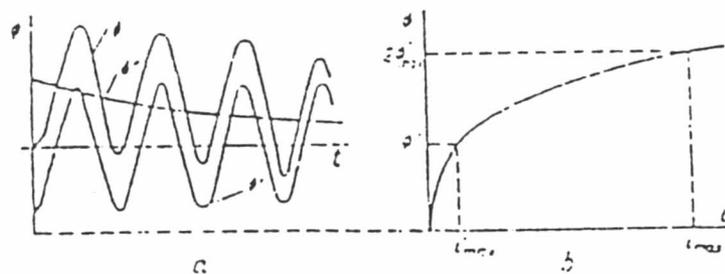


Gambar 2.7
Arah Komponen Harmonisa

2.6. ARUS INRUSH

Peristiwa arus *inrush* adalah merupakan keadaan transient yang terjadi ketika transformator diberi tegangan (*energized*). Kondisi ini bukanlah suatu gangguan, oleh karena itu peralatan pengamanan tidak perlu beroperasi selama siklus ini.

Bila transformator diberi supply tegangan (*energized*) maka akan muncul fluksi magnetik pada inti transformator dan besarnya melebihi kondisi normal. Hal ini dikarenakan dapat dijelaskan dengan dua alasan. Pertama karena fluks resultan pada inti transformator tertinggi 90° terhadap tegangan supply. Bila saat saklar ditutup siklus tegangan pada kondisi nol maka fluksi maksimum akan terjadi (gambar 2.8)



Gambar 2.8
Karakteristik Fluksi Dari Transformator³⁾

Keterangan :

- a. Fluktuasi dari fluksi magnetik saat transformator dicatu
- b. Kurva magnetisasi transformator

³⁾ M. Tilarenko, I Naskov-Dukelsky, Protective Relaying In Electric Power System, Foreign Language Publishing House, Moscow, Hal. 278

Pada kondisi transien ini muncul komponen DC (ϕ''), jumlah antara fluks steady-state dan fluks transien (ϕ dan ϕ'') akan menghasilkan fluks resultan (ϕ) yang mana akan mencapai harga maksimum pada setengah cycle pertama setelah saklar dimasukkan.

Harga fluks maksimum ini mencapai dua kali harga fluks steady-state dan fluks remanensi diperhitungkan maka harga fluks pada saat itu akan menjadi lebih besar.

$$\phi_{\max} = 2\phi_{\max} + \phi_0 \dots\dots\dots (2.20)$$

Transformator biasanya dirancang untuk beroperasi pada kerapatan fluks yang terletak didaerah lengkung kejenuhan (gambar 2.8.b). Pada gambar ini juga terlihat bahwa bila harga ϕ mencapai $2\phi_{\max}$ mengakibatkan naiknya arus pada belitan secara tiba-tiba (curam) dan kondisi demikian ini mengakibatkan arus inrush yang terjadi mencapai 5-10 dari arus normal.

Faktor-faktor yang mempengaruhi besar dan lamanya arus inrush adalah :

- Ukuran dari transformator
- Jenis bahan magnetik dari inti
- Fluks sisa (residual fluks) yang ada saat saklar masuk

2.7. TRANSFORMATOR TIGA PHASA

Dalam sistem pembangkit tenaga listrik skala besar, biasanya dibangkitkan tegangan 3 fasa. Sedangkan untuk transmisi tenaga listrik biasanya menggunakan tegangan 70, 150, dan 500 KV yang mana untuk tujuan ini diperlukan transformator 3 fasa untuk menaikkan tegangan.

Ada beberapa macam cara untuk menghubungkan transformator tiga fasa, tetapi yang umum digunakan adalah hubungan Y-Y, Δ - Δ , Y- Δ , Δ -Y.

2.7.1. Transformator Hubungan Y-Y

Transformator jenis ini akan beroperasi memuaskan bila beban yang ditanggungnya simetris. Bila beban tidak simetris mengakibatkan tegangan pada masing-masing fasa tidak sama. Juga bila terjadi hubung singkat satu fasa ketanah, misalnya pada fasa a sisi sekunder maka tegangan E_{an} mengecil mendekati nol (karena penggesekan titik netral), sedang E_{bn} dan E_{cn} akan naik. Demikian juga pada sisi primer, E_{AN} juga mendekati nol sedangkan E_{BN} dan E_{CN} naik hingga mendekati tegangan liniernya. ??

Fenomena lain yang penting adalah komponen harmonisa ke-3. Pada trafo hubungan Y-Y yang titik netralnya tidak diketanahkan, komponen harmonisa ke-3 tidak dapat mengalir ke tanah sehingga mengakibatkan kecacatan pada gelombang tegangannya. tetapi bila titik

netral ditanahkan maka komponen harmonisa ke-3 akan mengalir melalui titik netral ke tanah. Cara lain adalah dengan memasang belitan ke-3 (tertier) yang terhubung dimana komponen harmonisa ke-3 akan bersirkulasi pada belitan ini.

2.7.2. Transformator Hubungan $\Delta - \Delta$

Keuntungan dari penggunaan transformator dengan hubungan dapat dijelaskan sebagai berikut :

- Komponen harmonisa ke-3 akan bersirkulasi pada sisi belitan primer sehingga tidak mengalir pada line sisi sekunder.
- Tidak ada kesulitan dalam hal beban tidak simetris, karena tegangan ketiga phasanya relatif konstan.
- Bila salah satu belitannya rusak, maka transformator masih dapat beroperasi dengan hubungan *open-delta* (V-V) walaupun kapasitasnya berkurang hingga 58%.

2.7.3. Transformator Hubungan Y - Δ

Hubungan ini banyak digunakan pada substantion penurun tegangan. Sisi netral yang terhubung Y titik netralnya ditanahkan. Rasio tegangan line antara sisi sekunder dengan sisi primer adalah $1/\sqrt{3}$ kali rasuo transformator. Tegangan line antara phase sebesar 30° . Juga komponen harmonisa ke-3 akan dieliminir pada

transformator dengan hubungan ini.

2.7.4. Transformator Hubungan Δ - Y.

Hubungan ini banyak digunakan pada substation untuk menaikkan tegangan sebelum ditransmisikan. Titik netral dari sisi sekunder ditanahkan. Tegangan dan arus line antara sisi primer dengan sekunder memiliki perbedaan phase sebesar 30° . Komponen ini juga di eliminir.

2.7.5. Angka Lonceng Transformator Tiga Phasa

Angka lonceng adalah menandakan bagaimana hubungan dari sutau belitan-belitan transformator atau dapat juga dikatakan sebagai besar pergesekan phase antara kumparan primer dengan sekunder, seperti tampak pada tabel 2.1. berikut :

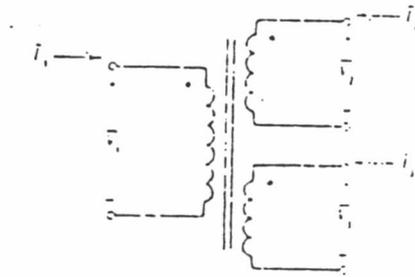
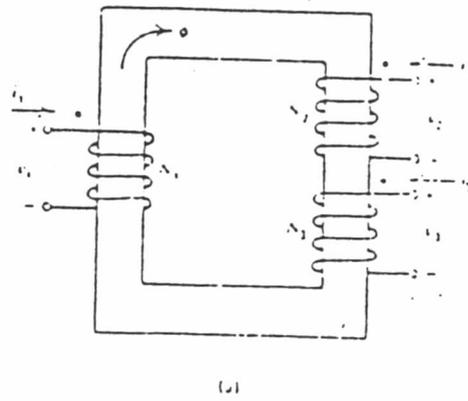
Tabel 2.1
Tabel Angka Lonceng Transformator Tiga Phasa⁴⁾

Δ	Δ	III	III	000
Δ	Δ	II	III	100
Δ	Δ	III	II	010
Δ	∇	III	II	016
Δ	∇	II	III	106
Δ	∇	III	II	026
Δ	∇	II	III	126
Δ	∇	III	II	075
Δ	∇	II	III	175
Δ	∇	III	II	077
Δ	∇	II	III	177
Δ	∇	III	II	025
Δ	∇	II	III	125
Δ	∇	III	II	0y11
Δ	∇	II	III	1y11
Δ	∇	III	II	1211
Δ	∇	II	III	1211
∇	Δ	III	II	131
∇	Δ	II	III	0y1

2.8. TRANSFORMATOR TIGA BELITAN

Kita tinjau tiga buah coil yang mengelilingi sebuah ini seperti terlihat pada gambar 2.9.

4) _____, Solid State Transformator Differential Protection. Siemens. Hal. 27



Gambar 2.9.
 Dasar Transformator Tiga Belitan⁵⁾

Untuk mempermudah analisa kita asumsikan bahwa belitan tersebut adalah konduktif murni (tidak memiliki hambatan), maka perlu :

$$V_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots (2.21.a)$$

$$V_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots (2.21.b)$$

$$V_3 = N_3 \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots (2.21.c)$$

⁵⁾ Charles A. Cross. Power System Analysis, Second Edition. Hal. 67.

Harga ϕ pada ketiga persamaan adalah sama dan tidak ada fluks yang dapat meninggalkan inti. Bila kita membagi persamaan (2.21.a) dengan (2.21.b), (2.21.b) dengan (2.21.c) dan (2.21.c) dengan (2.21.a), maka akan kita dapatkan :

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \dots\dots\dots (2.22.a)$$

$$\frac{V_2}{V_3} = \frac{N_2}{N_3} \dots\dots\dots (2.22.b)$$

$$\frac{V_3}{V_1} = \frac{N_3}{N_1} \dots\dots\dots (2.22.c)$$

Bila persamaan diatas dikaitkan dengan penyebut tegangan dan kita bawa kedalam bentuk phasor maka :

$$V_1 = \frac{N_1}{N_2} V_2 \dots\dots\dots (2.23.a)$$

$$V_2 = \frac{N_2}{N_3} V_3 \dots\dots\dots (2.23.a)$$

$$V_3 = \frac{N_3}{N_1} V_1 \dots\dots\dots (2.23.a)$$

2.9. IMPEDANSI PER-UNIT TRANSFORMATOR TIGA BELITAN

Pada transformator dua belitan, antara belitan primer dan sekunder memiliki rating KVA yang sama. tetapi keadaan ini tidak berlaku bagi transformator tiga belitan. Pada transformator tiga belitan, ketiga belitannya memiliki rating KVA yang berbeda. Tiga jenis impedansi

yang diperoleh dari pengujian hubung singkat adalah :

- Z_{PS} = Impedansi bocor yang ukur pada kumparan primer dengan kumparan sekunder terhubung singkat dan kumparan tersier terbuka.
- Z_{PT} = Impedansi bocor yang diukur pada kumparan primer dengan kumparan tersier terhubung singkat dan kumparan sekunder terbuka.
- Z_{ST} = Impedansi bocor yang diukur pada kumparan sekunder dengan kumparan tersier terhubung singkat dan kumparan primer terbuka.

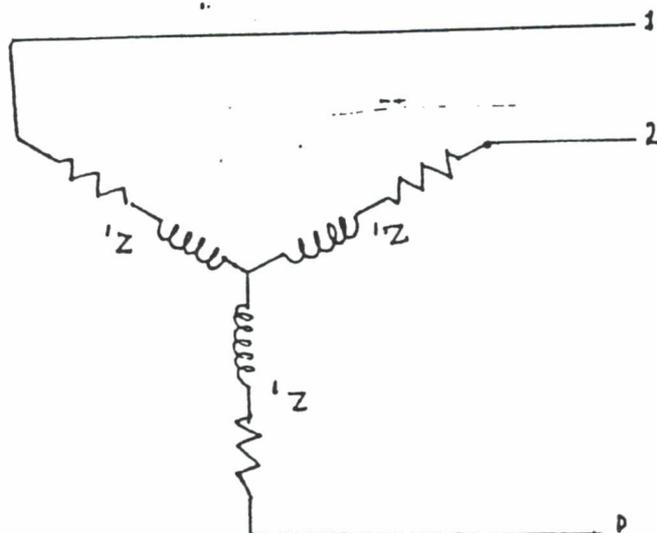
Bila harga-harga impedansi diatas telah didapat maka impedansi kumparan primer, sekunder dan tersier dapat dicari dengan persamaan :

$$Z_P = 1/2 (Z_{PS} + Z_{PT} - Z_{ST}) \dots\dots\dots (2.24.a)$$

$$Z_S = 1/2 (Z_{PS} + Z_{ST} - Z_{PT}) \dots\dots\dots (2.24.b)$$

$$Z_T = 1/2 (Z_{PT} + Z_{ST} - Z_{PS}) \dots\dots\dots (2.24.c)$$

Untuk merepresentasikan transformator tiga belitan dengan mengabaikan arus magnetisasi maka ketiga impedansi pada persamaan 2.24. dapat dihubungkan secara bintang seperti terlihat pada gambar 2.10 berikut :



Gambar 2.10
Rangkaian Ekivalen Transformator
Tiga Kumparan Satu Phasa⁶⁾

⁶⁾ William D. Stevenson, Jr., Analisa Sistem Tenaga Listrik, edisi keempat. Erlangga, Jakarta, 1982, Hal. 168