



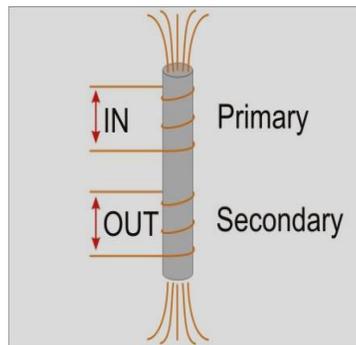
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum

Transformator adalah suatu alat yang dapat memindahkan dan mengubah energy listrik dari satu rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi-elektromagnet. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaannya dalam sistem tenaga memungkinkan dipilihnya tegangan yang sesuai dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan; misalnya, kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya listrik jarak jauh.^[1]

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. Dan apabila magnet tersebut dikelilingi oleh suatu belitan maka pada kedua ujung belitan tersebut akan terjadi beda potensial.



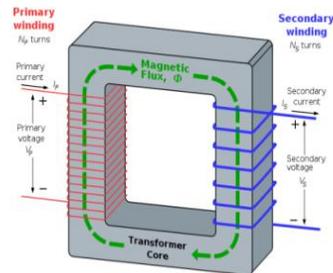
Gambar 2.1. Arus bolak balik mengelilingi inti besi

Arus yang mengalir pada belitan primer akan menginduksi inti besi transformator sehingga didalam inti besi akan mengalir flux magnet dan flux magnet

^[1]”Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya.Zuhal.1992”



ini akan menginduksi belitan sekunder sehingga pada ujung belitan sekunder akan terdapat beda potensial .^[2]



Gambar 2.2 Transformator dengan kumparan primer dan sekunder

2.2 Komponen Transformator

Suatu transformator terdiri atas beberapa bagian yang mempunyai fungsi masing-masing antara lain :

2.2.1 Electromagnetic circuit (inti besi)

Inti besi digunakan sebagai media jalannya flux yang timbul akibat induksi arus bolak balik pada kumparan yang mengelilingi inti besi sehingga dapat menginduksi kembali ke kumparan yang lain. Dibentuk dari lempengan – lempengan besi tipis berisolasi yang di susun sedemikian rupa.



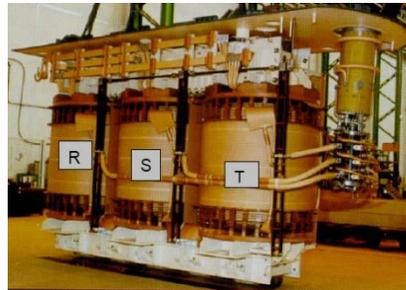
Gambar 2.3 Inti besi

^[2] Buku Petunjuk Transformator Tenaga.PT PLN.2012”



2.2.2 Current carrying circuit (winding)

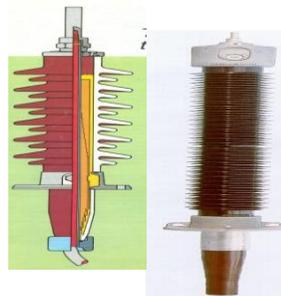
Belitan terdiri dari batang tembaga berisolasi yang mengelilingi inti besi, dimana saat arus bolak balik mengalir pada belitan tembaga tersebut, inti besi akan terinduksi dan menimbulkan flux magnetic



Gambar 2.4 Kumbaran trafo

2.2.3 Bushing

Bushing merupakan sarana penghubung antara belitan dengan jaringan luar. Bushing terdiri dari sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator. Isolator tersebut berfungsi sebagai penyekat antara konduktor bushing dengan body main tank transformator



Gambar 2.5 Bushing

2.2.4 Pendingin transformator

Pada transformator yang sedang beroperasi akan dipengaruhi oleh kualitas tegangan jaringan, losses pada trafo itu sendiri dan suhu lingkungan. Suhu operasi yang tinggi akan mengakibatkan rusaknya isolasi kertas pada transformator. Oleh karena itu pendinginan yang efektif sangat diperlukan.



Minyak isolasi transformator selain merupakan media isolasi juga berfungsi sebagai pendingin. Pada saat minyak bersirkulasi, panas yang berasal dari belitan akan dibawa oleh minyak sesuai jalur sirkulasinya dan akan didinginkan pada sirip – sirip radiator. Adapun proses pendinginan ini dapat dibantu oleh adanya kipas dan pompa sirkulasi guna meningkatkan efisiensi pendinginan.



Gambar 2.6 Pendingin transformator

2.2.5 Oil preservation & expansion (konservator)

Saat terjadi kenaikan suhu operasi pada transformator, minyak isolasi akan memuai sehingga volumenya bertambah. Sebaliknya saat terjadi penurunan suhu operasi, maka minyak akan menyusut dan volume minyak akan turun. Konservator digunakan untuk menampung minyak pada saat transformator mengalami kenaikan suhu.



Gambar 2.7 Konservator

Seiring dengan naik turunnya volume minyak di konservator akibat pemuaian dan penyusutan minyak, volume udara didalam konservator pun akan bertambah dan berkurang. Penambahan atau pembuangan udara didalam konservator akan



berhubungan dengan udara luar. Agar minyak isolasi transformator tidak terkontaminasi oleh kelembaban dan oksigen dari luar, maka udara yang akan masuk kedalam konservator akan difilter melalui silicagel.



Gambar 2.8 Silica gel

2.2.6 Dielectric (minyak isolasi transformator & isolasi kertas)

2.2.6.1 Minyak isolasi trafo

Minyak isolasi trafo merupakan minyak mineral yang secara umum terbagi menjadi tiga jenis, yaitu parafinik, naphthanik dan aromatik. Antara ketiga jenis minyak dasar tersebut tidak boleh dilakukan pencampuran karena memiliki sifat fisik maupun kimia yang berbeda. Fungsi minyak isolasi yang Ada di Dalam Trafo :Sebagai insulator (mengisolasi komponen/kumparan di dalam trafo agar tidak terjadi loncatan bunga api listrik akibat tegangan/beban tinggi), Sebagai pendingin (menggambil panas yang ditimbulkan saat trafo dibebani lalu melepaskannya), Sebagai pelindung (melindungi isolator padat/komponen dalam trafo dari korosif dan oksidasi).



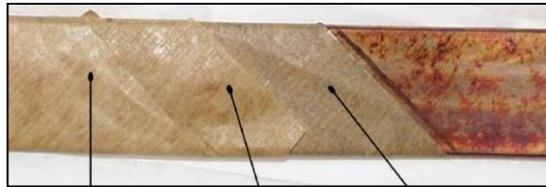
Gambar 2.9 Minyak isolasi transformator



Didalam standar IEC 60422 telah dicantumkan parameter-parameter minyak isolasi dengan batasan-batasan minimum untuk minyak isolasi yang baru dimasukan kedalam peralatan sebelum energize.

2.2.6.2 Kertas isolasi trafo

Isolasi kertas berfungsi sebagai isolasi, pemberi jarak, dan memiliki kemampuan mekanis.



Gambar 2.10 Kertas isolasi trafo

2.2.7 NGR (Neutral grounding resistant)

Salah satu metoda pentanahan adalah dengan menggunakan NGR. NGR adalah sebuah tahanan yang dipasang serial dengan neutral sekunder pada transformator sebelum terhubung ke ground/tanah. Tujuan dipasangnya NGR adalah untuk mengontrol besarnya arus gangguan yang mengalir dari sisi neutral ke tanah.



Gambar 2.11 Neutral grounding resistance (NGR)



2.2.8 Proteksi transformator

Rele Bucholz merupakan salah satu alat proteksi transformator untuk mendeteksi dan mengamankan terhadap gangguan di dalam trafo yang menimbulkan gas. [2]



Gambar 2.12 Rele Bucholz

2.2.9 Tap changer pada transformator

Tap changer adalah Alat bantu utama dari sebuah transformator yang berfungsi untuk mendapatkan ratio yang efektif dengan cara mengurangi atau menambah jumlah belitan/winding primer atau sekunder. [3]

2.2.9.1 Bagian-bagian tap changer

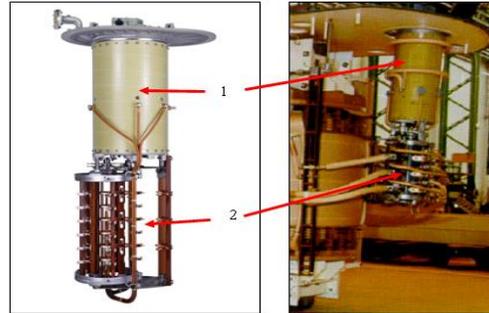
Secara umum bagian-bagian dari tap changer dapat dibedakan menjadi sebagai berikut :

1. Selector switch merupakan rangkaian mekanis yang terdiri dari terminal terminal untuk menentukan posisi tap atau ratio belitan primer.
2. Diverter switch merupakan rangkaian mekanis yang dirancang untuk melakukan kontak atau melepaskan kontak dengan kecepatan yang tinggi.

[2]” Petunjuk Transformator Tenaga.PT PLN.2012”

[3]” Alam,Mirza Fata . PengenalandanPemeliharaanTap changer pada Transformator Tenaga 150/20kv di P3B RJTD, <http://makalah.seminar.ac.id/makalah/98/detail/>,16 April 2015 pukul 10.30”

3. Tahanan transisi merupakan tahanan sementara yang akan dilewati arus primer pada saat perubahan tap.



Gambar 2.13 OLTC pada transformator

Keterangan :

1. Kompartemen Diverter Switch
2. Selektor Switch

Media pendingin atau pemadam proses switching pada diverter switch yang dikenal sampai saat ini terdiri dari dua jenis, yaitu media minyak dan media vaccum. Jenis pemadaman dengan media minyak akan menghasilkan energi arcng yang membuat minyak terurai menjadi gas C_2H_2 dan karbon sehingga perlu dilakukan penggantian minyak pada periode tertentu. Sedangkan dengan metoda pemadam vaccum proses pemadaman arcng pada waktu switching akan dilokalisir dan tidak merusak minyak.^[2]



Gambar 2.14 kontak switching pada diverter switch

[2]” Petunjuk Transformator Tenaga.PT PLN.2012”

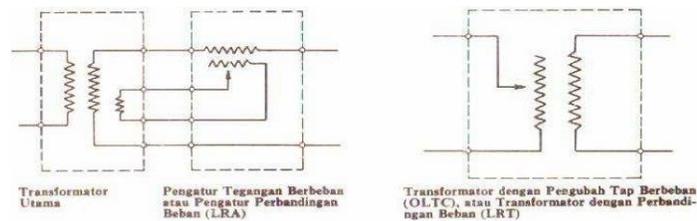
2.2.9.2 Pengubah tap tidak berbeban

Pengubahan tap tidak berbeban atau yang sering disebut off load tap changer adalah pengubahan tap yang hanya bisa dioperasi secara manual dan tidak bisa dilakukan secara otomatis. Pengubahan ini bertujuan agar tegangan skunder stabil sesuai dengan tegangan kerja yang diinginkan.^[4]

2.2.9.3 Pengubahan tap berbeban

Ada dua cara mengubah tegangan transformator dalam keadaan berbeban:

1. Memasang pengatur tegangan berbeban (On Load Voltage Regulator) secara seri dan terpisah dari transformator utama.
2. Memasang transformator dengan pengubah tap (On Load Tap Changer) yang dapat dioperasikan secara otomatis dan manual



Gambar 2.15 Cara Mengubah Tegangan Transformator.

Kekurangan dari on load Voltage regulator adalah keandalannya rendah, harus selalu diperiksa dan dipelihara. Dengan membaiknya keandalan dari on load tap changer, maka kebanyakan dipakai adalah on Load tap changer sekaligus sebagai pengganti dari on load Voltage regulator. On Load Tap Changer mempunyai mekanisme penghubung yang terdiri dari:

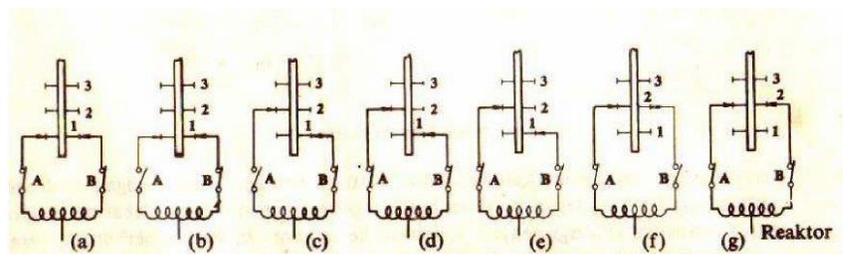
1. Pemilih tap (Tap Selector/Selector Switch)
2. Saklar pengalih (Diverter Switch)

^[4] <http://www.scribd.com/doc/54978846/Bag-III-Tap-Changer#download> Diakses 17 April 2015

3. Peralatan pendukung (Auxiliary Device)

Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 2.16

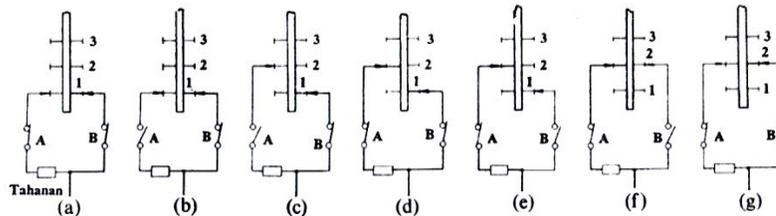
- Keadaan (a) adalah keadaan kerja normal, dimana arus mengalir melalui kumparan dengan posisi tap ditengah, kedua bagian kumparan di kedua sisi tap tergulung pada inti besi yang identik, sehingga fluks magnetnya sama besar dan saling meniadakan, dan sudah barang tentu impedansi reaktornya mendekati 0.
- Keadaan (b) saklar peng-alih membuka, arus mengalir pada satu sisi kumparan
- Keadaan (c) Pemilih tap berpindah pada tap berikutnya
- Keadaan (d) Saklar peng-alih menutup kembali, 2 tap yang berbeda saling terhubung, dan arus sirkulasi karena adanya beda tegangan antara kedua tap kemudian dibatasi oleh reactor
- keadaan (e) dan (f) saklar peng-alih dan pemilih tap bekerja pada sisi tap yang lain
- Keadaan (g) pemindahan pada satu tap dianggap selesai



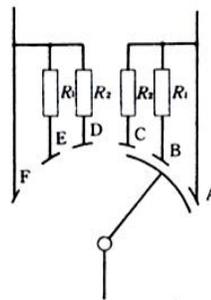
Gambar 2.16 Cara Kerja OLTC Jenis Reactor

Selain OLTC Jenis reactor, ada juga jenis tahanan dimana arus sirkulasi dibatasi oleh tahanan (Gambar 2.16). Kemudian ada pula tahanan ganda (multi

resistor type), dimana fluktuasi tegangan pada waktu perpindahan tap dan tugas buka dan tutup saklar pengalih diperingan (Gambar 2.16).^[5]



Gambar 2.17 cara kerja pengubah tap berbeban (OLTC) jenis tahanan



Gambar 2.18 saklar pengalih jenis 6-tahanan

2.2.9.4 Kelebihan dan kekurangan tap changer

Adapun untuk kelebihan dari tap changer adalah :

1. Sebagai media untuk mengatur nilai tegangan pada sisi keluaran sekunder.
2. Tap changer terdiri dari beberapa tipe yang dapat dipilih sesuai dengan penggunaannya
3. Penerapan pemilihan tap changer biasanya, telah disesuaikan dengan winding transformator.

Sedangkan kekurangan tap changer adalah :

^[5]Teknik Tenaga Listrik jilid III, Artono.Susumo Kuwahara Arismundar1997



1. Sering terjadi kerusakan pada beberapa bagian mekanik tap changer. Hal ini disebabkan karena pengaruh tap changer yang senantiasa selalu bergerak.
2. Fenomena-fenomena yang terjadi sering menyebabkan kerentanan tap changer terhadap beberapa permasalahan, sehingga tap changer memerlukan sistem pengaman yang lebih.

changer, maka perbaikan terhadap tap changer akan cenderung susah untuk dilakukan bahkan mungkin tap changer harus diganti dengan yang baru. Harga tap changer cenderung lebih mahal.

2.3 Jenis-Jenis Transformator

2.3.1 Step-up

Transformator step-up adalah transformator yang memiliki lilitan sekunder lebih banyak daripada lilitan primer, sehingga berfungsi sebagai penaik tegangan. Transformator ini biasa ditemui pada pembangkit tenaga listrik sebagai penaik tegangan yang dihasilkan generator menjadi tegangan tinggi yang digunakan dalam transmisi jarak jauh.

2.3.2 Step-down

Transformator step-down memiliki lilitan sekunder lebih sedikit daripada lilitan primer, sehingga berfungsi sebagai penurun tegangan. Transformator jenis ini sangat mudah ditemui, terutama dalam adaptor AC-DC.

2.3.3 Autotransformator

Transformator jenis ini hanya terdiri dari satu lilitan yang berlanjut secara listrik, dengan sadapan tengah. Dalam transformator ini, sebagian lilitan primer juga merupakan lilitan sekunder. Fasa arus dalam lilitan sekunder selalu berlawanan dengan arus primer, sehingga untuk tarif daya yang sama lilitan sekunder bisa dibuat



dengan kawat yang lebih tipis dibandingkan transformator biasa. Keuntungan dari autotransformator adalah ukuran fisiknya yang kecil dan kerugian yang lebih rendah daripada jenis dua lilitan. Tetapi transformator jenis ini tidak dapat memberikan isolasi secara listrik antara lilitan primer dengan lilitan sekunder. Selain itu, autotransformator tidak dapat digunakan sebagai penaik tegangan lebih dari beberapa kali lipat (biasanya tidak lebih dari 1,5 kali).

2.3.4 Transformator isolasi

Transformator isolasi memiliki lilitan sekunder yang berjumlah sama dengan lilitan primer, sehingga tegangan sekunder sama dengan tegangan primer. Tetapi pada beberapa desain, gulungan sekunder dibuat sedikit lebih banyak untuk mengkompensasi kerugian. Transformator seperti ini berfungsi sebagai isolasi antara dua kalang. Untuk penerapan audio, transformator jenis ini telah banyak digantikan oleh kopling kapasitor.

2.3.5 Transformator pulsa

Transformator pulsa adalah transformator yang didesain khusus untuk memberikan keluaran gelombang pulsa. Transformator jenis ini menggunakan material inti yang cepat jenuh sehingga setelah arus primer mencapai titik tertentu, fluks magnet berhenti berubah. Karena GGL induksi pada lilitan sekunder hanya terbentuk jika terjadi perubahan fluks magnet, transformator hanya memberikan keluaran saat inti tidak jenuh, yaitu saat arus pada lilitan primer berbalik arah.^[6]

2.4 Prinsip Kerja Transformator

Dalam bentuknya yang paling sederhana transformator terdiri atas dua kumparan dan satu induktansi, dan kumparan sekunder tersambung pada beban. Kedua kumparan dibelit pada suatu inti yang terdiri atas material magnetic berlaminasi

^[6]<https://TeknikElektronikaIndustriSmkn1Cikpoes/posts.April 2015 pukul 11.00>



Landasan fisik transformator adalah induktansi mutual (timbang balik) antara kedua rangkaian yang dihubungkan oleh suatu fluks magnetik bersama melewati suatu jalur dengan reluktansi rendah (Gambar 2.19). Kedua kumparan memiliki induktansi mutual yang tinggi .Jika suatu kumparan disambung pada suatu sumber tegangan bolak balik , suatu fluks bolak-balik terjadi didalam inti yang berlaminasi, yang sebagian besar akan mengait pada kumparan lainnya, dan di dalamnya akan terinduktansi suatu gaya gerak listrik (ggl) sesuai dengan hokum induksi elektromagnetik faraday, yaitu :

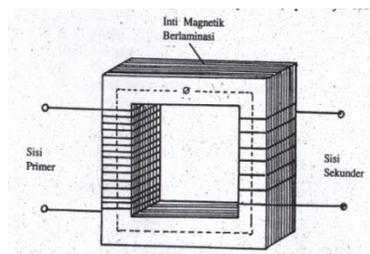
$$e = M \frac{di}{dt} \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan:

e = gaya gerak listrik yang diinduksikan

M = induktansi mutual

Bilamana rangkaian sekunder ditutup, suatu arus akan mengalir dan dengan energi listrik dipindah (sepenuhnya secara magnetik) dari kumparan primer ke kumparan sekunder .



Gambar 2.19 Skema prinsip transformator denagn kumparan – kumparan primer dan sekunder serta rangkaian magnetik .^[7]

^[7]Transmisi Tenaga Listrik, Abdul Kadir1993

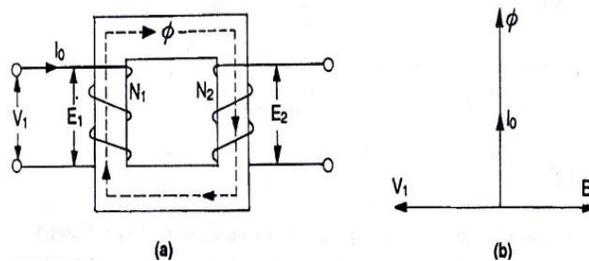


2.4.1 Transformator keadaan tanpa beban

Bila kumparan primer suatu transformator dihubungkan dengan sumber tegangan V_1 yang sinusoid, akan mengalirlah arus primer I_0 yang juga sinusoid dan dengan mengangggap belitan N_1 reaktif murni, I_0 akan tertinggal 90° dari V_1 (lihat gambar 2.20). Arus primer I_0 menimbulkan fluks (ϕ) yang sefasa dan juga berbentuk sinusoid.

$$\phi = \phi_{maks} \sin wt \dots\dots\dots(2.2)$$

Fluks yang sinusoid ini akan menghasilkan tegangan induksi e_1 (Hukum Faraday).



Gambar 2.20 Transformator tanpa beban

Keterangan gambar 2.20 :

- E_1 : Tegangan belitan primer
- E_2 : Tegangan belitan sekunder
- N_1 : Belitan primer
- N_2 : Belitan sekunder
- I_0 : Arus primer
- V_1 : Tegangan primer
- ϕ : fluks

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots(2.3)$$

$$e_1 = -N_1 \frac{d(\phi_{maks} \sin wt)}{dt} = -N_1 \phi_{maks} \cos wt \dots\dots\dots(2.4)$$

Harga efektifnya



$$E_1 = \frac{N_1 2\pi f \phi_{maks}}{\sqrt{2}} = 4,44 N_1 f \phi_{maks} \dots\dots\dots(2.5)$$

Pada rangkaian sekunder, fluks (f) bersama tadi menimbulkan

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

$$e_2 = -N_2 \omega \phi_m \cos \omega t \dots\dots\dots(2.7)$$

$$E_2 = 4,44 N_2 f \phi_{maks} \text{ Sehingga } \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \dots\dots\dots(2.8)$$

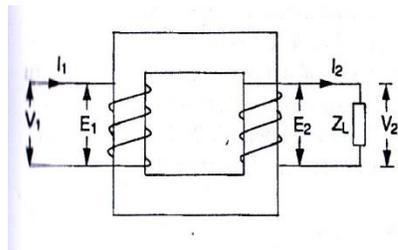
Dengan mengabaikan rugi tahanan dan adanya fluks bocor,

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \dots\dots\dots(2.9)$$

a = perbandingan transformasi

Dalam hal ini tegangan E₁ mempunyai kebesaran yang sama tetapi berlawanan arah dengan tegangan sumber V₁.

2.4.2 Transformator keadaan transformator berbeban



Gambar 2.21 Transformator beban

Keterangan gambar 2.21:

Z_L : Impedansi

I₁ : Arus primer



I_2 : Arus sekunder

Apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban Z_L , I_2 mengalir pada kumparan sekunder, di mana $I_2 = V_2/Z_L$. Arus beban I_2 ini akan menimbulkan gaya gerak magnet (ggm) $N_2 I_2$ yang cenderung menentang fluks (ϕ) bersama yang telah ada akibat arus pemagnetan I_M . Agar fluks bersama itu tidak berubah nilainya, pada kumparan primer harus mengalir arus I'_2 , yang menentang fluks yang dibangkitkan oleh arus beban I_2 , hingga keseluruhan arus yang mengalir pada primer menjadi.

$$I_1 = I_o + I'_2 \dots\dots\dots(2.10)$$

$$I_o = I_1 - I'_2 \dots\dots\dots(2.11)$$

Bila rugi besi diabaikan (I_c diabaikan) maka $I_o = I_M$

$$I_1 = I_M + I'_2 \dots\dots\dots(2.12)$$

Untuk menjaga agar fluks tetap tidak berubah sebesar ggm yang dihasilkan oleh arus pemagnetan I_M saja, berlaku hubungan :

$$N_1 I_M = N_1 I_1 - N_2 I_2 \dots\dots\dots(2.13)$$

$$N_1 I_M = N_1 (I_M + I'_2) - N_2 I_2 \dots\dots\dots(2.14)$$

Sehingga

$$N_1 I'_2 = N_2 I_2 \dots\dots\dots(2.15)$$

Karena nilai I_M dianggap kecil maka $I'_2 = I_1$

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \dots\dots\dots(2.16)$$

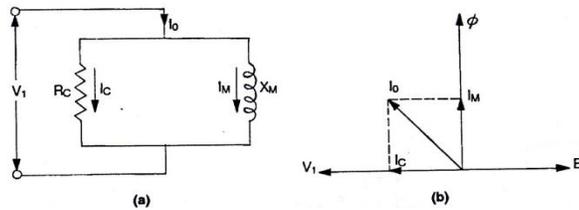
atau

$$I_1/I_2 = N_2/N_1 \dots\dots\dots(2.17)$$



2.5 Arus Penguat

Arus primer I_0 yang mengalir pada saat kumparan sekunder tidak dibebani disebut arus penguat. Dalam kenyataannya arus primer I_0 bukanlah merupakan arus induktif murni, hingga ia terdiri atas dua komponen:



Gamabar 2.22 Arus penguat

Keterangan gambar 2.22:

I_M : Arus pemagnetan

R_C : Hmabatan inti

X_M : Reaktansi pemagnitan

I_0 : Arus tembaga

- a. Komponen arus pemagnetan I_M , yang menghasilkan fluks (Φ).
- b. Komponen arus rugi tembaga I_C , menyatakan daya yang hilang akibat adanya rugi histeris dan ‘arus eddy’. I_C sefasa dengan V_1 , dengan demikian hasil perkaliannya ($I_C \times V_1$) merupakan daya (watt) yang hilang dalam watt.^[8]

2.6 Impedansi Transformator

Impedansi sebuah alat atau unsur merupakan ratio antara fasor tegangan dan fasor arus pada alat atau unsur itu sebgai berikut:

$$Z = \frac{V}{I} \dots \dots \dots (2.18)$$

^[8]Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya.Zuhal.1991



Garis diatas simbol menandakan sifat fasor atau vektor. Salah satu sifat yang menarik dari sebuah transformator adalah bahwa ia merubah ratio dari tegangan maupun ratio dari arus. Dengan demikian juga merubah ratio antara tegangan dan arus sehingga mempengaruhi impedansi samarnya. Bila arus sekunder i_s pada sisi sekunder transformator ideal adalah I_s dan tegangan sekunder v_s adalah maka impedansi beban adalah

$$Z_s = \frac{v_s}{I_s} \dots\dots\dots(2.19)$$

Dilihat dari sisi primer, maka impedansinya adalah :

$$Z_p = a^2 Z_s \dots\dots\dots(2.20)$$

Keterangan :

Z = Impedansi

Z_p = Impedansi primer

Z_s = Impedansi sekunder

Dari persamaan di atas dapat dicatat, bahwa dengan sebuah transformator adalah mungkin untuk menyesuaikan besar impedansi beban pada suatu sumber impedansi cukup dengan pemilihan yang tepat dari angka perbandingan a .^[9]

2.7 Hubungan Transformator Tiga Fasa

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

2.7.1 Hubungan delta

Tegangan transformator tiga fasa dengan kumparan yang dihubungkan secara delta yaitu V_{AB} , V_{BC} , V_{AC} , masing-masing berada fasa 120 derajat.

^[9] Dasar Teknik Tenaga Listrik Dan Elektronika Daya. Adul Kadir 1993



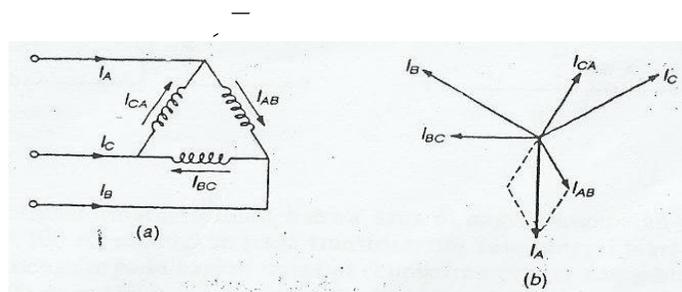
$$V_{AB} + V_{BC} + V_{AC} = 0 \dots\dots\dots (2.21)$$

Untuk beban seimbang

$$I_A = I_{AB} = I_{CA} \dots\dots\dots (2.22)$$

$$I_B = I_{BC} = I_{AB} \dots\dots\dots (2.23)$$

$$I_C = I_{CA} = I_{BC} \dots\dots\dots (2.24)$$



Gambar 2.23 Hubungan Delta Transformator

Keterangan Gambar 2.23:

I_A : Arus jala jala

I_{AB} : Arus fasa

Dari Vektor diagram diketahui bahwa I_A (arus jala-jala) adalah $3 \times I_{AB}$ (arus fasa). Tegangan jala-jala dalam hubungan delta sama dengan tegangan fasanya.

$$V_A \text{ hubungan delta} = V_p I_p = 3 \dots\dots\dots (2.25)$$

2.7.2 Hubungan bintang

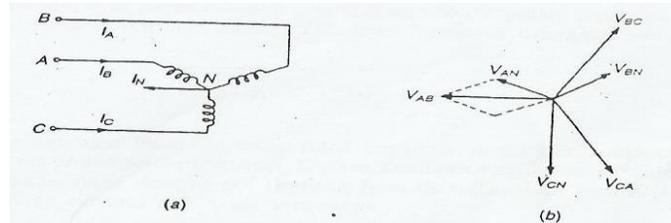
Arus transformator tiga fasa dengan kumparan yang dihubungkan secara bintang I_A, I_B, I_C , masing masing berbeda fasa 120 derajat. Untuk beban seimbang:

$$I_N = I_A + I_B + I_C \dots\dots\dots (2.26)$$

$$V_{AB} = V_{AN} + V_{BN} = V_{AN} + V_{BN} \dots\dots\dots (2.27)$$

$$V_{BC} = V_{BN} - V_{CN} \dots\dots\dots (2.28)$$

$$V_{CA} = V_{CN} - V_{AN} \dots \dots \dots (2.29)$$

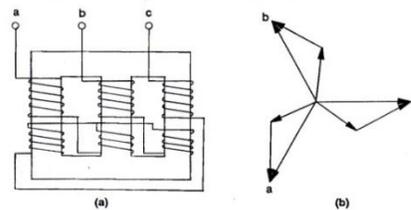


Gambar 2.24 Hubungan Bintang Transformator

Dari gambar 2.24(a) dan gambar 2.24(b) diketahui bahwa untuk hubungan bintang mberlaku hubungan.

2.7.3 Hubungan zig-zag

Masing masing lilitan tiga fasa pada sisi tegangan rendah dibagi menjadi dua bagian dan masing masing dihubungkan pada kaki yang lainan.

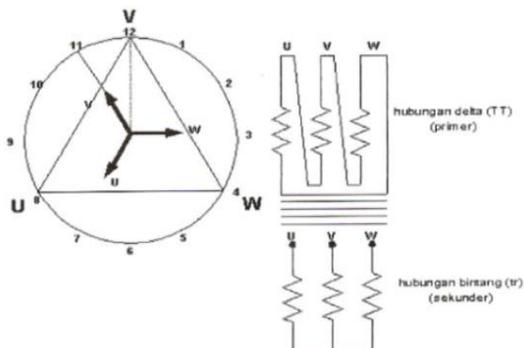


Gambar 2.25 hubungan zig-zag

Hubungan silang atau zig-zag digunakan untuk keperluan khusus seperti distribusi dan transformator.

2.7.4 Kelompok hubungan

Vektor tegangan primer dan sekunder sebuah transformator sangat tergantung pada cara melilit kumparannya. Pada transformator 3 fasa arah tegangan menimbulkan perbedaan fasa. Arah dan besar perbedaan fasa tersebut menyebabkan adanya berbagai kelompok hubungan pada transformator.



Gambar 2.26 Contoh Kelompok Hubungan Transformator

Selain itu juga ditunjukkan beberapa kelompok hubungan transformator yang mengacu pada standarisasi. Standarisasi yang banyak diikuti adalah menurut peraturan jerman, yaitu VDE 053.

Tabel 2.1 Kelompok Hubungan Menurut VDE 0532

Tanda		Gambar		Hubungan Kumparan		Perbandingan lilitan
Ang Jam	Golongan Hub.	TT	Tr	TT	Tr	N
0	Dd0					$\frac{N_1}{N_2}$
	Yy0					$\frac{N_1}{N_2}$
	Dz0					$\frac{2N_1}{3N_2}$

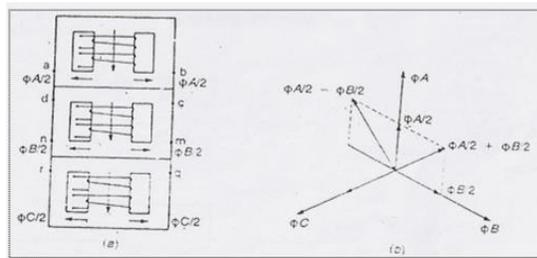


5	Dy5					$\frac{N_1}{\sqrt{3}N_2}$
	Yd5					$\frac{\sqrt{3}N_1}{N}$
	Yz5					$\frac{2N_1}{\sqrt{3}N_2}$
6	Dd6					$\frac{N_1}{N_2}$
	Yy6					$\frac{N_1}{N_2}$
	Dz6					$\frac{2N_1}{3N_2}$
11	Dy11					$\frac{N_1}{\sqrt{3}N_2}$
	Yd11					$\frac{N_1}{\sqrt{3}N_2}$
	Yz11					$\frac{2N_1}{\sqrt{3}N_2}$



2.7.5 Analisa transformator tiga fasa

Transformator tiga fasa digunakan karena pertimbangan ekonomi. Dari pembahasan ini akan terlihat bahwa pemakaian inti besi pada transformator tiga fasa akan jauh lebih sedikit dibandingkan dengan pemakaian tiga buah transformator fasa tunggal Gambar 2.15a menunjukkan tiga buah transformator fasa tunggal tipe cangkang disusun ke atas sedangkan gambar 2.15b menunjukkan hubungan vektornya.



Gambar 2.27 Transformator tiga fasa

Keterangan gambar 2.27:

φ_A : Fluks A

φ_B : Fluks B

Pada bidang a b c d gambar hanya diperlukan aliran fluks sebesar

$$\frac{\varphi_A}{2} - \frac{\varphi_B}{2} \dots\dots\dots(2.30)$$

Dan dari gambar vektornya Gambar 2.8b diketahui bahwa kebesaran vektor tersebut adalah sebesar

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \varphi_A \dots\dots\dots(2.31)$$

Apabila digunakan transformator fasa tunggal pada bagian tersebut akan mengalir fluks sebesar $\frac{1}{2} \varphi_A$ dan $\frac{1}{2} \varphi_B$ atau sebesar φ_A . Demikian juga halnya untuk bidang n m q r. Jadi pemakaian inti besi jelas menunjukkan penghematan pada transformator tiga fasa. Penghematan tersebut akan lebih terasa lagi bila kini kita



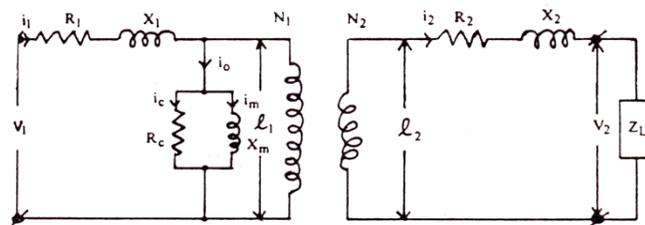
mengubah polaritas transformator sedemikian rupa sehingga arah φ_B keatas . Dengan arah φ_B ke atas, fluks yang mengalir pada bidang abcd menjadi.

$$\frac{\varphi_A}{2} + \frac{\varphi_B}{2} \dots\dots\dots(2.32)$$

Dan besar vektor ini hanya sebesar $\frac{1}{2} \times \varphi_A$ Apabila ditambah lagi dengan sistem pendingin yang maju, transformator tiga fasa menjadi lebih ekonomis.^[8]

2.8 Rangkain Ekivalen Transformator

Flux magnet bersama yang akan dihsilkan oleh arus pemagnet i_M , tidak seluruhnya tercakup oleh kumparan primer maupun kumparan sekunder. Dengan kata lain, terjadi flux magnet baik pada kumparan primer maupun pada kumparan sekunder. Adapun flux magnet bocor pada kumparan dinyatakan oleh hambatan primer dan reaktansi primer, sedangkan pada kumparan sekunder dinyatakan oleh hambatan sekunder dan reaktansi sekunder. Dengan demikian rangkain ekivalen trafo dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 2.28 Rangkain ekivalen transformator

Keterangan gambar :

- R_1 = Hambatan primer
- X_1 = Reaktansi primer
- R_2 = Hambatan sekunder
- X_2 = reaktansi sekunder
- R_C = Hambatan inti
- X_M = Reaktansi magnet



Jika ditinjau pada bagian primer dari gambar , maka:

$$V_1 = i_1 \cdot R_1 + i_1 \cdot j \cdot X_1 + e_1 \dots \dots \dots (2.33)$$

Atau dalam bentuk amplitude ditulis:

$$V_1 = i_1 \cdot R_1 + i_1 \cdot X_1 + E_1 \dots \dots \dots (2.34)$$

2.9 Efisiensi Transformator

Efisiensi trafo adalah perbandingan antara daya output dengan daya input. Secara matematis ditulis:

$$\eta = \frac{(P_o)_{\text{aktif}}}{(P_{in})} \times 100\% \dots \dots \dots (2.35)$$

Atau :

$$\eta = \frac{(P_o)_{\text{aktif}}}{(P_o)_{\text{aktif}} + \sum \text{rugi}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.36)$$

keterangan :

\sum rugi : $P_c + P_{cu}$

P_c : Power core loss = $P_h + P_e$

P_{cu} : Total power copper loss = $I_1^2 \cdot R_{eq1} = I_2^2 \cdot R_{eq2} = W_{ac}$

P_o : $V_2 \cdot I_2 = (P_o)_{\text{aktif}} + (P_o)_{\text{reaktip}}$

P_o : $V_2 \cdot I_2 \cdot \cos \theta + V_2 \cdot I_2 \cdot \sin \theta$

2.10 Persentasi Regulasi

Sebagai trafo berbeban, maka tegangan sekunder mungkin turun (PF Leading). Supaya tegangan sekunder besarnya tetap, maka tegangan primer harus dinaikkan. Kenaikan tegangan primer perlu panjangan harga tegangan dari beban penuh. Hal ini perlu pengaturan. Kalau tegangan primer berubah dari harga batasnya V_1 ke V_1 , maka

$$\% \text{ Regulasi} = \frac{V_1 - V_1}{V_1} \times 100 \leq 40 \dots \dots \dots (2.37)$$



keterangan :

$$V_1 = V_{pp}$$

Keadaan kritis % Regulasi =40%. ^[10]

2.11 Kuantitas Per Unit

Saluran transmisi tenaga dioperasikan pada tingkat tegangan dimana kilovolt merupakan unit yang sangat memudahkan untuk menyatakan tegangan. Karena besarnya daya yang harus disalurkan, kilowatt atau megawatt dan kilovoltampere atau megavoltampere adalah istilah-istilah yang sudah biasa dipakai. Tetapi, kuantitas-kuantitas tersebut diatas bersama-sama dengan ampere dan ohm sering juga dinyatakan sebagai suatu persentase atau per unit dari suatu nilai dasar atau referensi yang ditentukan untuk masing-masing (spesifik). Misalnya jika sebagai tegangan dasar dipilih 20 kV maka tegangan-tegangan sebesar 108,120, dan 126 kV berturut-turut menjadi 0,90 ; 1,00 ; dan 1,05 per unit atau 90, 100, dan 105%.

Definisi nilai per unit untuk suatu kuantitas ialah perbandingan kuantitas tersebut terhadap nilai dasarnya yang dinyatakan dalam desimal. Perbandingan (rasio) dalam persentase adalah 100 kali nilai dalam per unit. Kedua metode perhitungan tersebut, baik dengan persentase maupun dengan per unit lebih sederhana menggunakan langsung nilai-nilai ampere, ohm dan volt yang sebenarnya.

Metode per unit mempunyai sedikit kelebihan dari metode persentase karena hasil perkalian dari dua kuantitas yang dinyatakan dalam per unit sudah langsung diperoleh dalam per unit juga, sedangkan hasil perkalian dari dua kuantitas yang dinyatakan dalam persentase masih harus dibagi dengan 100 untuk mendapatkan hasil dalam persentase. Tegangan arus, kilovoltampere dan impedansi mempunyai hubungan sedemikian rupa sehingga pemilihan nilai dasar untuk dua saja dari dua kuantitas-kuantitas tersebut sudah dengan sendirinya menentukan nilai dasar untuk kedua kuantitas yang lainnya. Jika nilai dasar dari arus atau tegangan sudah dipilih,

^[10]Dasar Teknik Tenaga Listrik. Yon Rijono.1997



maka nilai dasar dari impedansi dan kilovoltampere dapat ditentukan.

Impedansi dasar adalah impedansi yang akan menimbulkan jatuh tegangan (voltage drop) padanya sendiri sebesar tegangan dasar jika arus yang mengalirinya sama dengan arus dasar. Kilovoltampere dasar pada sistem fasa tunggal adalah hasil perkalian tegangan dasar dalam kilovolt dan arus dasar dalam ampere. Biasanya megavoltampere dasar dan tegangan dasar dalam kilovolt adalah kuantitas yang dipilih untuk menentukan dasar atau referensi. Jadi untuk sistem fasa tunggal atau sistem tiga fasa dimana istilah arus berarti arus saluran, istilah tegangan berarti tegangan ke netral, dan istilah kilovoltampere berarti kilovoltampere per fasa, berlaku rumus-rumus berikut bermacam-macam kuantitas.

$$\text{Arus dasar} = \frac{\text{dasar kVA}_{1\phi}}{\text{Tegangan dasar, kv}_{LN}} \dots\dots\dots(2.38)$$

$$\text{Impedansi dasar} = \frac{\text{tegangan dasar, V}_{LN}}{\text{arus dasar, A}} \dots\dots\dots(2.39)$$

$$\text{Impedansi dasar} = \frac{(\text{tegangan dasar, kv}_{LN})^2 \times 1000}{\text{dasar kv}_{LN}} \dots\dots\dots(2.40)$$

$$\text{Impedansi dasar} = \frac{(\text{tegangan dasar, kv}_{LN})^2}{\text{dasar MVA}_{1\phi}} \dots\dots\dots(2.41)$$

$$\text{Daya dasar, kW}_{1\phi} = \text{dasar kVA}_{1\phi} \dots\dots\dots(2.42)$$

$$\text{Daya dasar, MW}_{1\phi} = \text{dasar MVA}_{1\phi} \dots\dots\dots(2.43)$$

Impedansi per-unit dari suatu elemen rangkain :

$$= \frac{\text{impedansi sebenarnya, } \Omega}{\text{impedansi dasar, } \Omega} \dots\dots\dots(2.44)$$



Dalam persamaan-persamaan diatas, subkrip 1Φ dan LN berturut-turut menunjukkan “per fasa” dan “ saluran-ke-netral-“, untuk persamaan-persamaan yang berkalu bagi rangkaian tiga-fasa. Jika persamaan-persamaan tersebut dipakai untuk rangkaian berfasa-tunggl, KV_{LN} berarti tegangan saluran berfasa-tunggal, atau tegangan saluran-ke-tanah- jika salah satu salurannya diketanahkan. Karena soal-soal rangkain tiga fasa dipecahkan sebagai suatu saluran tunggal dengan suatu pengembalian netral (neural return), dasar-dasar untuk kuantitas pada diagram impedansi adalah kilovoltampere per fasa dan kilovolt dari saluran ke netral. Data –data biasanya diberikan sebaga kilovoltampere total tiga –fasa atau megavoltampere dan kilovolt antar saluran. Karena kebiasaan dalam menyatakan tegangan antar saluran dan kilovoltampere total atau megavoltampere total seperti tersebut diatas mungkin terjadi kesimpangsiuran dalam hubungan antara nilai per-unit dari tegangan saluran dan nilai per-unit dari tegangan fasa. Meskipun tegangan saluran dan saji dipilih sebagai. Dasar untuk rangkaian berfasa-tunggal jawaban yang diperlukan adalah tetep tegangan ke netral.tegangan dasar kenetral adalah tegangan dasar antar-saluran dibagi dengan $\sqrt{3}$. Karena ini adalah juga perbandingan antara tegangan antar saluran dan tegngan saluran ke netral dari sistem tiga fasa yang seimbang , nilai perunit dan suatu tegangan saluran ke netral dari sitem tiga fasa yang seimbang, nilai perunit dan suatu tegangan saluran ke netral dengan tegangan saluran ke pada titik yang sama dengan tegangan antar saluran sebagai dasar jika sistemnya seimbang. Demikian pula, kilovolampere tiga fasa adalah juga tiga kali dari kilovoltampere per fasa, dan kilovolampere dasar tiga fasa adalah juga tiga kali dari kilovoltampere dasar per fasa . karena itu , nilai pet unit dari kilovoltampere tiga-fasa dengan dasar kilovoltampere tiga-fasa indentikdengan nliai per unit dari kilovoltampere per fasa dengan dasar kilovoltampere per fasa. Sudah tentu, nilai megawatt dan megavoltampere dapat saja menggantikan nilai kilovolt dan kilovoltampere untuk seluruh pembahasan di atas. Jika tidak menyatakan lain, suatu nilai dasar tegangan dalam suatu sistem tiga fasa adalah tegangan antar saluran,dan suatu nilai dasar kilovotampere atau megavoltampere adalah nilai dasar untuk total tiga



fasa. Impedansi dasar dan arus dasar dapat langsung dihitung dari nilai-nilai tiga –fasa untuk kilovolt dasar dan kilovoltampere dasar. Jika kita mengartikan bahwa kilovoltampere dasar dan tegangan dasar antar saluran , maka kita peroleh.^[11]

$$\text{arus dasar , } A = \frac{KVA_{3\phi \text{ dasar}}}{\sqrt{3} \times \text{tegangan dasar, } KV_{LL}} \dots\dots\dots(2.45)$$

$$\text{impedansi dasar } \frac{(\text{tegangan dasar, } kv_{LL/\sqrt{3}})^2 \times 1000}{KVA_{3\phi \sqrt{3} \text{ dasar}} \dots\dots\dots(2.46)$$

$$\text{impedansi dasar} = \frac{(\text{tegangan dasar, } kv_{LL})^2 \times 1000}{KVA_{3\phi \sqrt{3} \text{ dasar}} \dots\dots\dots(2.47)$$

$$\text{impedansi dasar} = \frac{(\text{tegangan dasar, } kv_{LL})^2}{KVA_{3\phi \sqrt{3} \text{ dasar}} \dots\dots\dots(2.48)$$

^[11]Analisa Sistem Tenaga Listrik, William D.Stevenson.Jr.1994