

BAB II

TRANSFORMATOR

2.1. Transformator GI

Transformator Tenaga adalah peralatan penyaluran sistem tenaga listrik yang mengubah sumber tegangan bolak balik melalui dua atau lebih belitan menggunakan metode induksi elektromagnetik untuk transformasi tegangan atau arus yang berbeda pada frekuensi yang sama. Dengan kata lain, transformator merupakan peralatan dalam sistem penyaluran energi listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik lain melalui gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektro magnetik.

Penggunaan transformator dalam bidang tenaga listrik memungkinkan pemilihan tegangan yang sesuai dan ekonomis untuk tiap tiap keperluan, dalam hal ini yaitu kebutuhan akan tegangan tinggi dalam proses penyaluran baik di sistem transmisi atau sistem distribusi. Cara kerja transformator yang berdasarkan induksi elektromagnetik menghendaki adanya gandengan magnet antara belitan. Gandengan magnet ini biasanya berupa inti besi berlaminasi sebagai sarana untuk memungkinkan terjadinya fluks magnet.

Transformator Tenaga dibedakan atas dua macam yaitu Transformator GI dan Transformator Distribusi, sedangkan Transformator GI dibedakan menjadi :

1. Transformator gardu induk transmisi dengan tegangan 500/150 kV

Transformator gardu induk transmisi 500/150 kV digunakan untuk sistem transmisi dengan tegangan ekstra tinggi 500kV atau dikenal juga sistem saluran udara tegangan ekstra tinggi (SUTET).Transformator ini termasuk

salah satu transformator daya yang memiliki efisiensi yang sangat tinggi yang digunakan sebagai penyuplai daya sekunder untuk menurunkan tegangan. Transformator ini tidak dapat digunakan langsung untuk mensuplai beban. Hal ini disebabkan sisi tegangan rendahnya masih lebih tinggi dari tegangan beban, sedangkan sisi tegangan tingginya merupakan tegangan transmisi. Transformator daya akan berfungsi sebagai step up bila berperan sebagai transformator pengirim daya dan akan berfungsi sebagai step down bila berperan sebagai transformator penerima daya.

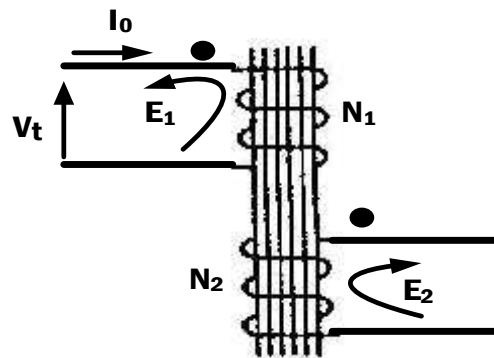
2. Transformator gardu induk distribusi dengan tegangan 150/20 kV

Pada dasarnya transformator distribusi sama dengan transformator daya hanya saja fungsinya berbeda. Tegangan transformator distribusi biasanya lebih kecil dengan tegangan transformator transmisi atau transformator daya. Transformator distribusi biasanya digunakan untuk proses penyaluran distribusi energi listrik dari saluran distribusi tersier kepada pusat – pusat beban.

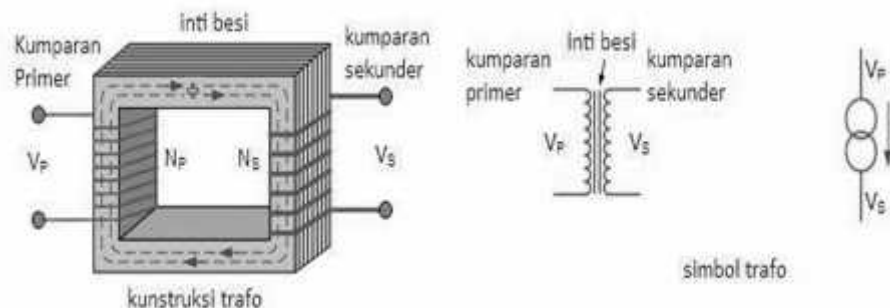
2.2. Prinsip Kerja Transformator

Transformator terdiri atas dua buah kumparan (primer dan sekunder) yang bersifat induktif. Kedua kumparan ini terpisah secara elektris namun berhubungan secara magnetis melalui jalur yang memiliki reluktansi rendah. Apabila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik maka fluks bolak-balik akan muncul di dalam inti yang dilaminasi, karena kumparan tersebut membentuk jaringan tertutup maka mengalirlah arus primer. Akibat adanya fluks di kumparan primer maka di kumparan primer terjadi induksi

(*self induction*) dan terjadi pula induksi di kumparan sekunder karena pengaruh induksi dari kumparan primer atau disebut sebagai induksi bersama yang menyebabkan timbulnya fluks magnet di kumparan sekunder, maka mengalirlah arus sekunder jika rangkaian sekunder di bebani, sehingga energi listrik dapat ditransfer keseluruhan (secara magnetisasi).



Gambar 2.1. Inti Transformator dengan dua Kumparan



Gambar 2.2. Transformator fasa tunggal tanpa beban

Transformator diatas dikatakan tanpa beban jika kumparan sekundernya tidak terhubung dengan beban (seperti pada gambar 2.2. diatas). Bila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan V_1 yang sinusoidal, akan mengalirlah arus primer I_0 yang juga sinusoidal dan dengan menganggap belitan N_1 reaktif murni, I_0 akan tertinggal 90° fluks (Φ) yang sefasa.

$$\Phi = \Phi_{\text{maks}} \sin(\omega t) \dots\dots\dots (2.1)$$

dimana Φ : Fluks (Weber)

Φ_m : Fluks maksimum (Weber)

Fluks yang sinusoidal akan menghasilkan tegangan induksi e_1 (Hukum Faraday) :

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana : e = gaya gerak listrik (volt)

N = jumlah lilitan

$\frac{d\Phi}{dt}$ = Perubahan fluks magnet

$$e_1 = -N_1 \frac{d(\Phi_{\text{maks}} \sin(\omega t))}{dt}$$

$$e_1 = -N_1 \cdot \omega \cdot \Phi_{\text{maks}} \cos(\omega t)$$

Harga Efektifnya:

$$E_1 = \frac{N_1 2\pi f \Phi_{\text{maks}}}{\sqrt{2}} = 4,44 N_1 \cdot f \cdot \Phi_{\text{maks}} \dots\dots\dots (2.3)$$

Pada kumparan sekunder. Fluks (Φ) menimbulkan tegangan induksi e_2 :

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

$$e_2 = -N_2 \cdot \omega \cdot \Phi_{\text{maks}} \cos(\omega t)$$

$$E_2 = \frac{N_2 2\pi f \Phi_{\text{maks}}}{\sqrt{2}} = 4,44 N_2 \cdot f \cdot \Phi_{\text{maks}} \dots\dots\dots (2.4)$$

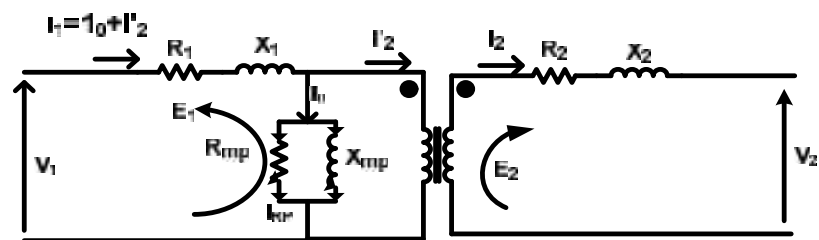
Pada persamaan (2.2) dan (2.3) didapatkan :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dengan mengabaikan rugi tahanan dan adanya fluks bocor :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana: N_1 :Jumlah belitan pada sisi primer
 N_2 :Jumlah belitan pada sisi sekunder
 f : Frekuensi Gelombang Listrik
 Φ : Fluks Maksimum
 e_1 : Tegangan induksi pada kumparan primer
 e_2 : Tegangan induksi pada kumparan sekunder
 E_1 : Tegangan efektif sisi primer (V)
 E_2 : Tegangan efektif sisi sekunder (V)
 a : Perbandingan transformasi



Gambar 2.3. Sirkuit ekivalen transformator dengan dua kumparan

Transformator Diatas dikatakan berbeban apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban Z , arus I_2 mengalir pada kumparan sekunder, dimana $I_2 = \frac{V_2}{Z}$; ϕ_2 = Sudut beda fasa beban.

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 kumparan arus yang mengalir pada kumparan primer.

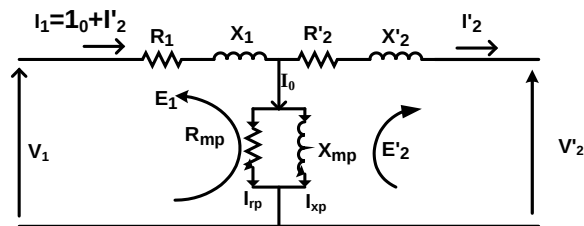
Berdasarkan hukum sirkuit listrik magnet amper dapat ditulis :

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \hat{A} N \cdot \mathbf{I} \quad \text{atau} \quad \oint \hat{A} N \cdot \mathbf{I}$$

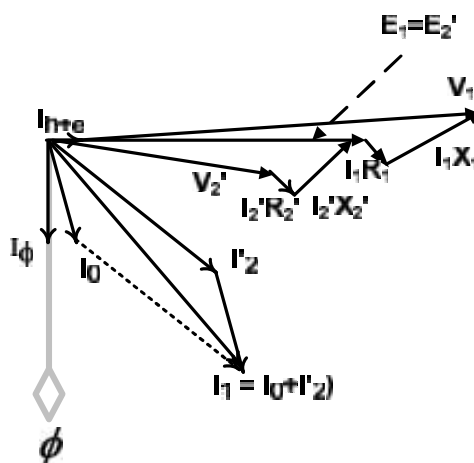
$\oint$ ialah MMF (magneto motive force) yang besarnya digambarkan oleh Φ bersama atau E_1 atau E_2 yang tergantung besar V_1 atau besar I_0 , $\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a$.

Jadi dapat ditulis $I_1 \cdot N_1 = I_2 \cdot N_2$ atau $I_2' = \frac{N_2}{N_1} \times I_2 = \frac{1}{a} \times I_2$ dan $I_1 = I_0 + I_2'$.

Tidak semua flux I_2 menghasilkan flux bersama yang menghasilkan I_1 ada flux bocor pada sisi sekunder dan flux bocor tersebut menimbulkan X_2 . Demikian pula dengan mengalirnya I_1 dalam kumparan primer menyebabkan X_1 . Jelaskan dengan gambar Φ yang menyebabkan X_2 dan X_1 .



Gambar 2.4. Sirkuit ekivalen terhadap sisi primer



Gambar 2.5. Diagram fasor untuk sirkuit ekivalen terhadap tegangan tinggi

Keterangan :

I_o : arus maknetisasi

I_ϕ : komponen I_o yang menghasilkan flux ϕ .

I_{h+e} : komponen I_o yang menghasilkan rugi-rugi histerisis dan rugi-rugi arus pusar. Sub huruf ϕ juga ditulis x_{mp} , demikian pula i_{h+e} juga ditulis R_{mp} .

E_1 : tegangan yang timbul (induced electromotive force) yang ditimbulkan flux ϕ . Besarnya $= V_1 - I_1 R_1 - I_1 X_1$ (besaran vektor). E_1 mendahului $90^\circ \phi$.

Tujuan utama menggunakan inti besi pada transformator adalah untuk mengurangi reluktansi (tahanan magnetis) dari rangkaian magnetis (*common magnetic circuit*). Dasar teori dari transformator adalah apabila ada arus listrik 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 tegangan mengelilingi magnet, sehingga akan menimbulkan Gaya Gerak Listrik.

2.3. Komponen Transformator

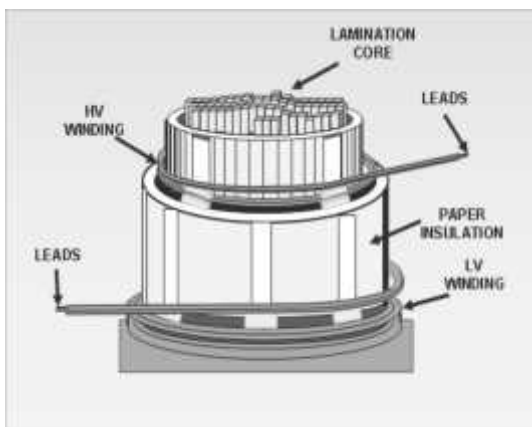
1. Inti Besi

Inti besiberfungsi untuk mempermudah jalan fluksi,magnetik 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.

2. Kumparan Transformator

Kumparan transformator adalah beberapa lilitan kawat berisolasi yang membentuk suatu kumparan atau gulungan. 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.

Umumnya pada Transformator terdapat kumparan primer dan kumparan sekunder. Bila kumparan primer dihubungkan dengan tegangan/arus bolak balik maka pada kumparan tersebut timbul fluksi. Fluksi ini akan menginduksikan tegangan, dan bila pada rangkaian sekunder ditutup maka akan menghasilkan arus pada kumparan ini. Jadi kumparan sebagai alat transformasi tegangan dan arus.



Gambar 2.6. Gambar fisik belitan
Transformator tenaga



Gambar 2.7. Komponen Internal
Transformator

3. Minyak Transformator

Minyak transformator merupakan salah satu bahan isolasi cair yang dipergunakan sebagai isolasi dan pendingin pada transformator. Sebagai bagian dari bahan isolasi, minyak harus memiliki kemampuan untuk menahan tegangan

tembus, sedangkan sebagai pendingin minyak transformator harus mampu meredam panas yang ditimbulkan, sehingga dengan kedua kemampuan ini maka minyak diharapkan akan mampu melindungi transformator dari gangguan.

Untuk itu minyak transformator harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

1. Kekuatan Isolasi Tinggi.
2. penyalur panas yang baik berat jenis yang kecil, sehingga partikel-partikel 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.

4. Bushing

Hubungan antara kumparan Transformator ke jaringan luar melalui sebuah busing yaitu sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator, yang sekaligus berfungsi sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan tangki Transformator.

5. Tanki Konservator

Pada umumnya bagian-bagian dari Transformator yang terendam minyak Transformator berada (ditempatkan) dalam tangki. Untuk menampung pemuaian minyak Transformator, tangki dilengkapi dengan konservator.

6. Peralatan Bantu

a. Pendingin

Pada inti besi dan kumparan-kumparan akan timbul panas akibat rugi-rugi besi dan rugi-rugi tembaga. Bila panas tersebut mengakibatkan kenaikan suhu yang berlebihan, akan merusak isolasi di dalam Transformator, maka untuk mengurangi kenaikan suhu yang berlebihan tersebut Transformator perlu dilengkapi dengan sistem pendingin untuk menyalurkan panas keluar Transformator.

Media yang digunakan pada sistem pendingin dapat berupa udara/gas, minyak dan air. Pengalirannya (sirkulasi) dapat dengan cara :

1. Alamiah (*natural*)
2. Tekanan/paksaan (*forced*).

Macam-macam sistem pendingin transformator berdasarkan media dan cara pengalirannya dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

Tabel 2.1. Macam-macam sistem pendingin pada transformator

No	Macam Sistem Pendingin *)	Media			
		Dalam Transformator		Diluar Transformator	
		Sirkulasi Alamiah	Sirkulasi Paksa	Sirkulasi Alamiah	Sirkulasi Paksa
1	AN	-	-	Udara	-
2	AF	-	-	-	Udara
3	ONAN	Minyak	-	Udara	-
4	ONAF	Minyak	-	-	Udara
5	OFAN	-	Minyak	Udara	-
6	OFAF	-	Minyak	-	Udara
7	OFFW		Minyak		Air
8	ONAN/ONAF	Kombinasi 3 dan 4			
9	ONAN/OFAN	Kombinasi 3 dan 5			
10	ONAN/OFAF	Kombinasi 3 dan 6			
11	ONAN/OFWF	Kombinasi 3 dan 7			

b. Tap Changer (perubah tap)

Tap Changer adalah perubah perbandingan transformator untuk mendapatkan tegangan operasi sekunder sesuai yang diinginkan dari tegangan jaringan/primer yang berubah-ubah. Tap changer dapat dilakukan baik dalam keadaan berbeban (on-load) atau dalam keadaan tak berbeban (off load), tergantung jenisnya.

c. Alat pernapasan

Karena pengaruh naik turunnya beban Transformator maupun suhu udara luar, maka suhu minyakpun akan berubah-ubah mengikuti keadaan tersebut. Bila suhu minyak tinggi, minyak akan memuai dan mendesak udara di atas permukaan minyak keluar dari dalam tangki, sebaliknya bila suhu minyak turun, minyak menyusut maka udara luar akan masuk ke dalam tangki.

Kedua proses di atas disebut pernapasan Transformator. Permukaan minyak Transformator akan selalu bersinggungan dengan udara luar yang menurunkan nilai tegangan tembus minyak Transformator, maka untuk mencegah hal tersebut, pada ujung pipa penghubung udara luar dilengkapi tabung berisi kristal zat hyangroskopis.

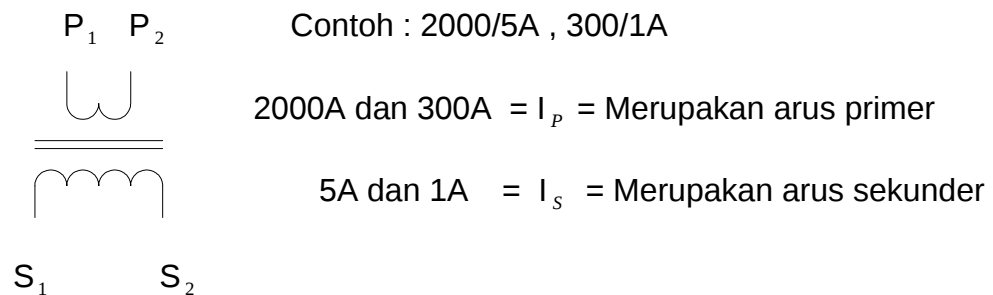
2.4. CT (Current Transformer) dan PT (Potensial Transformer)

Transformator Arus (CT) dan/atau Transformator Tegangan (PT) yaitu untuk meneruskan arus dan/atau tegangan dengan perbandingan tertentu dari kumparan primer ke kumparan sekunder.

2.4.1. Transformator arus (CT)

Fungsi dari Transformator arus adalah sebagai berikut :

- Untuk Mentransformasikan dari arus yang besar (primer) ke arus yang kecil (sekunder) guna pengukuran atau proteksi.
- Sebagai isolasi sirkit sekunder dari sisi primernya.
- Memungkinkan penggunaan standar arus pengenal untuk meter atau relai di sisi sekundernya.



Perbandingan belitan CT

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_1}{N_2} = k_{CT} \dots\dots\dots (2.7)$$

Keterangan :

N_1 = jumlah lilitan primer

N_2 = jumlah lilitan sekunder

k_{CT} = perbandingan transformasi merupakan nilai yang konstan ($N_2 \gg N_1$)

2.4.2. Transformator arus interposing

Transformator arus interposing digunakan untuk mengkompensasi ketidak-seimbangan arus jala yang keluar dari Transformator arus, jadi Transformator arus Bantu (Aux CT, Interposing CT) dipergunakan untuk :

- Mencocokkan (membalance) arus yang akan masuk ke relai differensial dari masing-masing pihak.
- Mencocokkan perkisaran fasa dari arus-arus yang akan masuk ke relai differensial.

Sebagai petunjuk untuk mencocokkan dapat dipergunakan tabel di bawah ini.

Tabel 2.2. Hubungan Transformator-arus (TA)

dan TA Bantu untuk pengaman differensial

Hubungan Transformator Daya	Transformator arus (TA)	Transformator arus bantu	
		Primer	Sekunder
Y	Y	Y	Δ
Δ	Y	Y	Y

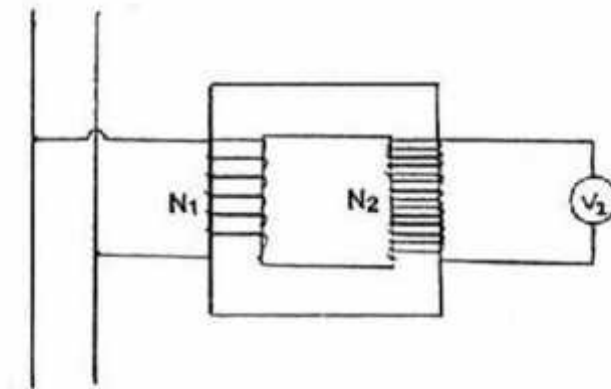
Tabel 2.3. Hubungan TA untuk relai differensial

Hubungan Transformator-Daya	TA Sekunder
Y	Δ
Δ	Y

2.4.3. Transformator tegangan (PT)

Fungsi dari Transformator tegangan adalah :

- Memperkecil besaran tegangan pada sistem tenaga listrik menjadi besaran tegangan untuk sistem pengukuran.
- Mengisolasi rangkaian sekunder terhadap rangkaian primer.
- Memungkinkan standar arus pengenal pada sisi sekunder



Gambar 2.8. Rangkaian transformator tegangan

Persamaan Transformator Tegangan

$$V_1 = \frac{N_1}{N_2} \times V_2 \dots\dots\dots (2.8)$$

Keterangan :

N_1 = Jumlah belitan primer

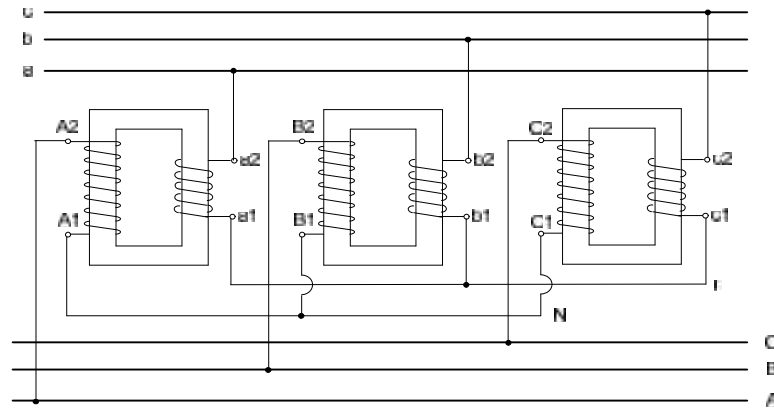
E_1 = Tegangan Primer

N_2 = Jumlah belitan sekunder

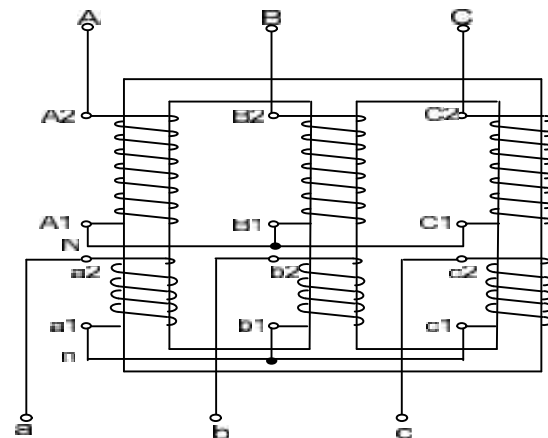
E_2 = Tegangan sekunder

2.5. Transformator Fasa Tiga

Transformator fasa tiga dapat berupa : 1 unit transformator fasa tiga atau 3 unit dari transformator fasa tunggal.



Gambar 2.9. Transformator fasa tiga yang terdiri dari 3 buah transformator fasa tunggal



Gambar 2.10. Satu Unit Transformator Fasa Tiga

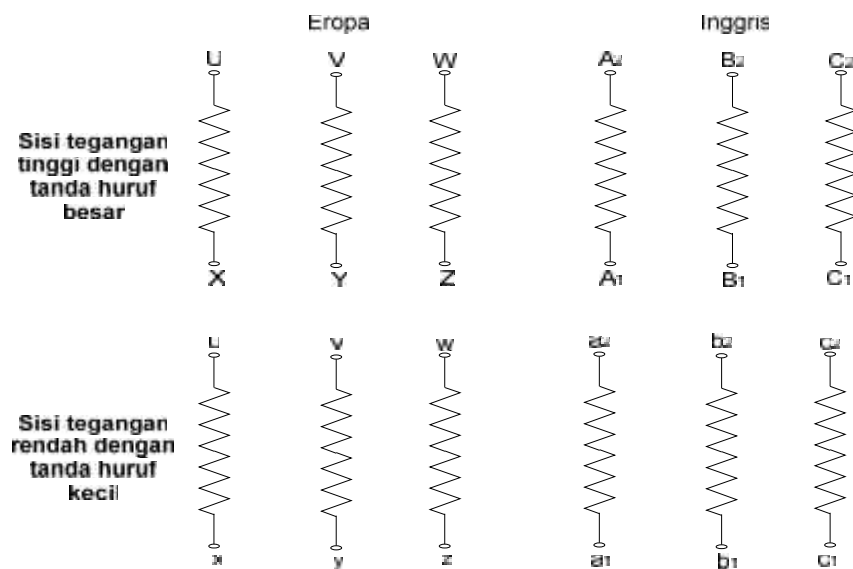
2.6. Polaritas dan Vektor Grup Transformator

2.6.1. Polaritas Transformator Disisi Primer dan Sekunder

Sisi tegangan tinggi pada transformator sebagai sisi primer dan sisi tegangan rendah pada transformator sebagai sisi sekunder. Tetapi dari arah aliran daya sisi primer adalah beban dan sisi sekunder adalah sumber.

Untuk penandaan ujung-ujung belitan pada transformator dilakukan sesuai dengan standar yang dipakai oleh pabrikan dari beberapa negara yaitu :

Negara	Tanda Ujung Belitan					
	Sisi Tegangan Tinggi			Sisi Tegangan Rendah		
Eropa	U	V	W	U	v	W
Inggris	A	B	C	A	b	C
Amerika	H1	H2	H3	X1	X2	X3
IEC	I	II	III	I	ii	lii



Gambar 2.11. Penandaan Ujung-Ujung Belitan Pada Transformator

2.6.2. Vektor Grup Transformator

Jika terminal-terminal primer dan sekunder transformator tiga fasa dihubungkan dengan hubungan Y atau D, maka antara urutan fasa yang sama di primer dan sekunder bisa terjadi perbedaan sudut. Artinya fasa R di primer dan fasa r di sekunder tidak lagi sefasa. Untuk menyatakan pergeseran sudut ini biasanya dilakukan patokan (referensi) penunjukan arah jarum jam. Pergeseran

sudut sebesar 1 jam sama dengan 30° listrik. Berikut adalah tabel vektor group transformator tiga fasa :

Tabel 2.4. Vektor group transformator tiga fasa

1	2	3		4		5
Tanda		Diagram vektor		Hubungan lilitan		Perbandingan Lilitan N
Angka jam	Golongan hubungan	TT	TR	TT	TR	
Transformator-transformator fasa-tiga						
0	Dd0					$\frac{N_1}{N_2}$
	Yy0					$\frac{N_1}{N_2}$
	Dz0					$\frac{2 N_1}{3 N_2}$
5	Dy5					$\frac{N_1}{\sqrt{3} N_2}$
	Yd5					$\frac{\sqrt{3} N_1}{N_2}$
	Yz5					$\frac{2 N_1}{\sqrt{3} N_2}$
6	Dd6					$\frac{N_1}{N_2}$
	Yy6					$\frac{N_1}{N_2}$
	Dz6					$\frac{2 N_1}{3 N_2}$
11	Dy11					$\frac{N_1}{\sqrt{3} N_2}$
	Yd11					$\frac{\sqrt{3} N_1}{N_2}$
	Yz11					$\frac{2 N_1}{\sqrt{3} N_2}$