

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Listrik merupakan energi yang sangat dibutuhkan dalam kehidupan bermasyarakat. Kebutuhan akan energi listrik saat ini semakin lama semakin meningkat, sedangkan sumber daya yang dibutuhkan untuk menghasilkan energi ini semakin berkurang. Oleh sebab itu sangat diperlukan penghematan dalam pemanfaatannya.

Untuk mengkonversikan energi listrik diperlukan peralatan listrik pendukung, diantaranya adalah transformator (transformer). Transformator adalah komponen yang sangat penting dalam sistem tenaga listrikan. Keberadaan transformator merupakan penemuan besar yang sangat penting dalam kemajuan tenaga listrikan.

Dalam dunia industri, transformator sangat besar peranannya. Transformator digunakan sebagai alat penurun tegangan (transformator step down) dan sebagai alat penaik tegangan (transformator step up). Pada transformator terdapat rugi rugi, baik rugi yang disebabkan arus mengalir pada kawat tembaga, rugi yang disebabkan fluks bolak balik pada inti besi yang mengakibatkan berkurangnya efisiensi pada transformator.

Efisiensi transformator merupakan perbandingan daya keluaran (output) dan daya masukan (input), dimana besar kecilnya efisiensi pada transformator dipengaruhi besar kecilnya pembebanan. Efisiensi juga dipengaruhi oleh rugi – rugi yang terdapat pada transformator.

Rugi-rugi yang terdapat pada transformator adalah rugi-rugi inti dan rugi-rugi tembaga, rugi-rugi pada transformator ini menyebabkan perbedaan daya masukan dan daya keluaran, semakin besar rugi-rugi yang dihasilkan pada transformator maka akan semakin besar daya yang hilang pada transformator tersebut.

1.2 Batasan Masalah

Mengingat luasnya pembahasan tentang transformator, maka untuk itu penulis perlu membatasi masalah yang dibahas. Dalam skripsi ini penulis membatasi permasalahan yaitu :

1. Besar daya output yang dihasilkan oleh transformator saat beban tertinggi dan terendah.
2. Rugi-rugi yang dihasilkan transformator pada saat beban tertinggi dan terendah.
3. Efisiensi yang dihasilkan transformator pada saat pembebanan.
4. Hanya membahas transformator daya 1, transformator 2 dan transformator daya 3.

1.3 Tujuan Penulisan

Adapun tujuan pembuatan tugas akhir ini adalah agar mengenal dan memahami prinsip kerja transformator, mampu memperhitungkan besarnya rugi-rugi transformator, serta memperhitungkan besarnya efisiensi transformator.

1.4 Metodologi Penelitian

1. Studi literature.

Yaitu dengan mempelajari buku –buku referensi yang tersedia dari media cetak maupun internet dan juga buku ataupun catatan kuliah yang mendukung untuk penulisan tugas akhir ini.

2. Pengambilan Data.

Adapun pengambilan data dilakukan dengan mengambil data-data transformator dari PLTA PT. Wampu Electric Power (WEP).

3. Studi bimbingan.

Yaitu dengan diskusi atau konsultasi dengan dosen pembimbing tugas akhir.

1.5 Sistematika Penulisan

Untuk mempermudah pembahasan, maka Tugas Akhir ini akan dibagi menjadi lima bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut:

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini merupakan pendahuluan yang berisikan tentang latar belakang masalah, tujuan penulis, batasan masalah, metodologi penulisan, dan sistematika penulisan.

BAB II : TRANSFORMATOR DAYA

Bab ini menjelaskan tentang teori umum transformator dan dasar-dasar perhitungan efisiensi transformator.

BAB III : PEMBEBANAN HARIAN TRAFU DAYA PLTA PT. WAMPU ELECTRIC POWER (WEP)

Bab ini menerangkan keadaan umum transformator di PT. PLTA Wampu Electric Power dan data-data yang diperlukan untuk perhitungan efisiensi transformator.

BAB IV : PERHITUNGAN EFISIENSI TRANSFORMATOR DAN ANALISA PERHITUNGAN

Bab ini menjelaskan perhitungan efisiensi transformator dan analisisnya.

BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN

Berisikan tentang kesimpulan dan saran dari penulisan Tugas Akhir ini.

BAB II

TRANSFORMATOR DAYA

2.1 Umum

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian ke rangkaian listrik yang lain, melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnet. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun bidang elektronika.

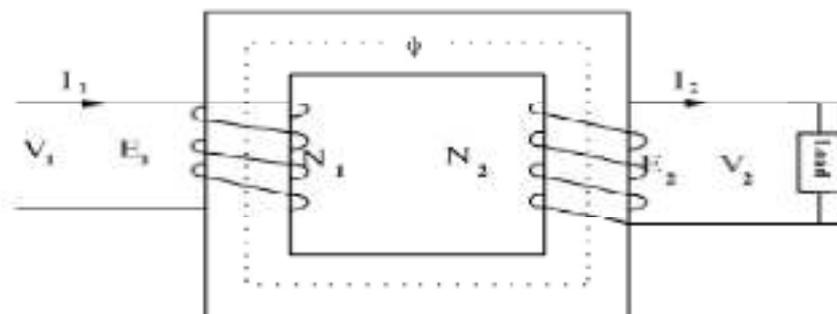
Transformator satu fasa mempunyai satu sisi masukan dan satu sisi keluaran. Sisi masukan disebut sisi primer, dan sisi keluaran disebut sisi sekunder. Sedangkan transformator tiga fasa mempunyai tiga buah sisi masukan dan tiga buah sisi keluaran, Transformator tiga fasa dapat dibentuk dari tiga buah transformator satu fasa ataupun dari bentuk konstruksi transformator tiga fasa satu inti. Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi tiga jenis yaitu sebagai berikut :

1. Transformator daya, transformator ini biasanya digunakan di pembangkit tenaga listrik, untuk menaikkan tegangan pembangkit menjadi tegangan transmisi.
2. Transformator distribusi, transformator ini pada umumnya digunakan pada sub distribusi tenaga listrik, yaitu untuk menurunkan tegangan transmisi menjadi tegangan distribusi.
3. Transformator instrument, transformator ini gunanya digunakan sebagai alat instrument pengukuran yang terdiri dari transformator arus (current transformer) dan transformator tegangan (potential transformer).

Suatu sistem tenaga listrik terdiri dari tiga bagian utama yaitu pusat pembangkit listrik, saluran transmisi dan sistem distribusi. Suatu sistem distribusi yang

menghubungkan semua beban terjadi pada stasiun pembantu atau substation, dimana dilaksanakan transformasi tegangan.

Kerja transformator yang berdasarkan induksi electromagnet, menghendaki adanya gandengan magnet antara rangkain dan sekunder. Gandengan magnet ini berupa inti besi tempat melakukan fluks bersama. Secara umum transformator terdapat dua sisi kumparan, yaitu sisi primer (N_1) dan sisi sekunder (N_2), seperti terlihat pada Gambar 2. 1 dibawah ini. Dimana jika tegangan pada sisi primer lebih besar dari pada sisi sekunder maka disebut transformator penurun tegangan pada sisi sekunder lebih besar pada sisi primer, maka dinamakan transformator penaik tegangan.



Gambar 2. 1 Skema Transformator

Keterangan gambar 2. 1 yaitu :

N_2 = Jumlah lilitan sisi primer

V_1 = Tegangan input (volt)

V_2 = Tegangan output (volt)

N_1 = Jumlah lilitan sisi sekunder

E_1 = GGL efektif sisi primer (volt)

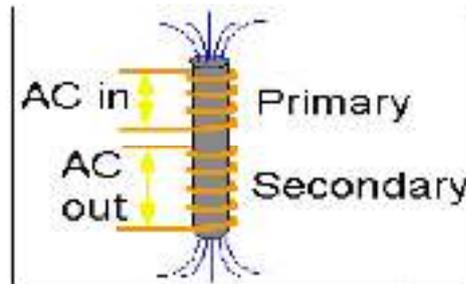
E_2 = GGL efektif sisi sekunder (volt)

Φ = Fluksi magnet

2.2 Prinsip Kerja Transformator

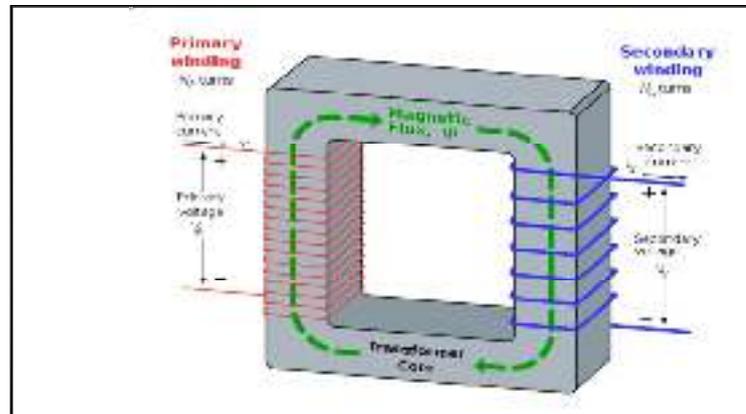
Transformator menggunakan prinsip induksi faraday dan hukum Lorentz dalam menyalurkan daya, dimana arus bolak balik yang mengalir mengelilingi suatu inti besi maka inti besi itu akan berubah menjadi magnet. Dan apabila magnet tersebut

dikelilingi oleh suatu belitan maka pada kedua ujung belitan tersebut akan terjadi beda potensial (Gambar 2.2).



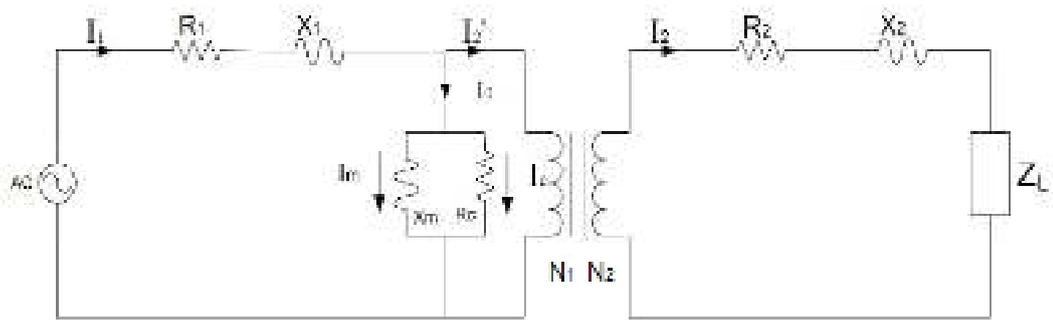
Gambar 2. 2 Arus Bolak Balik Mengelilingi Inti Besi

Arus yang mengalir pada belitan primer akan menginduksi inti besi transformator sehingga didalam inti besi akan mengalir flux magnet dan flux magnet ini akan menginduksi belitan sekunder sehingga pada ujung belitan sekunder akan terdapat beda potensial (GGL induksi) sesuai dengan hukum Faraday (Gambar 2. 3).



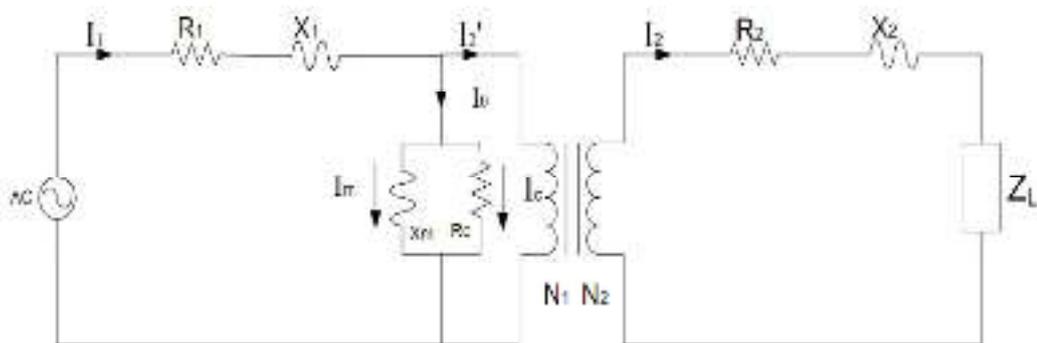
Gambar 2. 3 Prinsip Kerja Transformator

Berdasarkan Hukum Faraday diketahui bahwa apabila terdapat suatu medan magnet yang berubah-ubah terhadap waktu, akibat adanya arus bolak-balik yang mengalir pada suatu kumparan maka akan diinduksikan suatu medan listrik dan Hukum Lenz yang menyatakan bahwa arah dari medan magnet berlawanan dengan arah fluks sebagai reaksi perlawanan dari perubahan fluks.



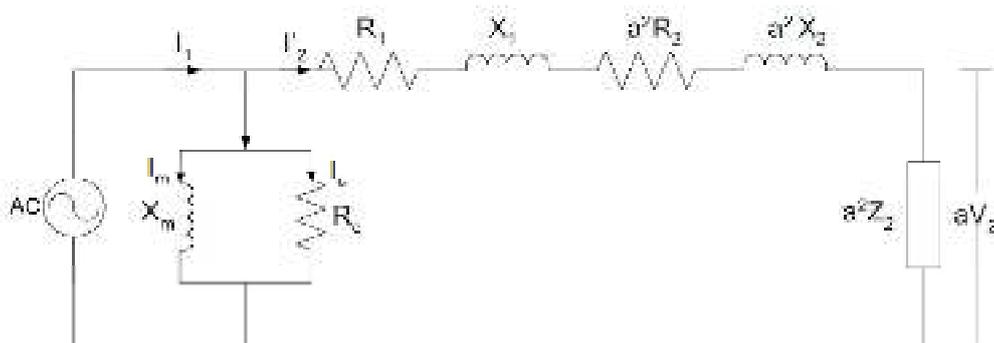
Gambar 2.4 Rangkaian Pengganti Transformator

Apabila semua parameter sekunder dinyatakan dalam harga rangkain primer, harganya perlu dikalikan dengan faktor a^2 , dimana $a = E_1/E_2$. Rangkaian ekivalen transformator dapat dibuat sebagai berikut:



Gambar 2.5 Rangkaian Ekivalen Transformator

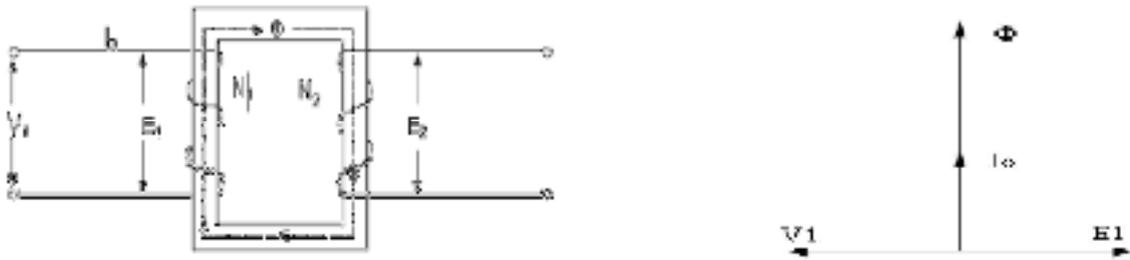
Untuk memudahkan perhitungan, maka dibuat rangkaian sebagai berikut:



Gambar 2.6 Rangkaian Ekivalen Transformator Dari Sisi Primer

2.2.1 Transformator Tanpa Beban.

Bila kumparan primer suatu transformator dihubungkan dengan sumber tegangan V_1 yang sinusoid, akan mengalirkan arus primer I_0 yang juga sinusoid dan dengan menganggap belitan N_1 reaktif murni, I_0 akan tertinggal 90° dari V_1 (gambar 2.7b).



(a) Transformator tanpa beban

(b) vektor transformator tanpa beban

Gambar 2.7 Transformator Tanpa Beban

Arus primer I_0 menimbulkan fluks (Φ) yang sefasa dan juga berbentuk sinusoid.

$$\Phi = \Phi_{\max} \sin \omega t$$

Fluks yang sinusoid ini akan menghasilkan tegangan induksi e_1

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$e_1 = -N_1 \frac{d(\Phi_{\max} \sin \omega t)}{dt} = N_1 \cdot \omega \cdot \Phi_{\max} \cdot \cos \omega t \text{ (tertinggal } 90^\circ \text{ dari } \Phi \text{)}$$

Harga efektifnya

$$E_1 = \frac{N_1 \cdot 2\pi f \Phi_{\max}}{\sqrt{2}} = 4,44 N_1 \Phi_{\max}$$

Pada rangkaian sekunder, fluks (Φ) bersama tadi menimbulkan :

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

$$e_2 = N_2 \cdot \omega \cdot \Phi_{\max} \cdot \cos \omega t$$

$$E_2 = 4,44 N_2 \Phi_{\max}$$

Sehingga: $\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$

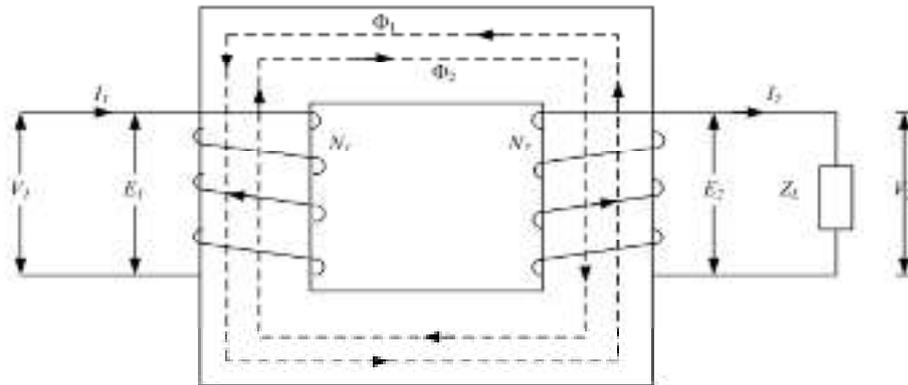
Dengan mengabaikan rugi tahanan dan adanya fluks bocor

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \text{ dimana } a = \text{ perbandingan transformasi(2.1)}$$

Dalam hal ini tegangan induksi E_1 mempunyai besaran yang sama tetapi berlawanan arah dengan tegangan sumber V_1 .

2.2.2 Transformator Dengan Beban

Apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban Z_L , I_2 mengalir pada kumparan sekunder, dimana $I_2 = V_2 / Z_L$, dengan $\theta_2 =$ faktor kerja beban.



Gambar 2.8 Transformator Berbeban

Arus beban I_2 ini menimbulkan Gaya Gerak Magnet (ggm) $N_2 I_2$ yang cenderung menentang fluks 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 arus yang dibangkitkan oleh beban I_2 , sehingga keseluruhan arus yang mengalir pada kumparan primer menjadi :

$$I_1 = I_0 + I_2$$

Bila rugi besi diabaikan, maka $I_0 = I_M$

$$I_1 = I_M + I_2$$

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

$$N_1 I_M = N_1 I_1 - N_2 I_2$$

$$N_1 I_M = N_1 (I_M + I_2) - N_2 I_2$$

Sehingga : $N_1 I_1 = N_2 I_2$

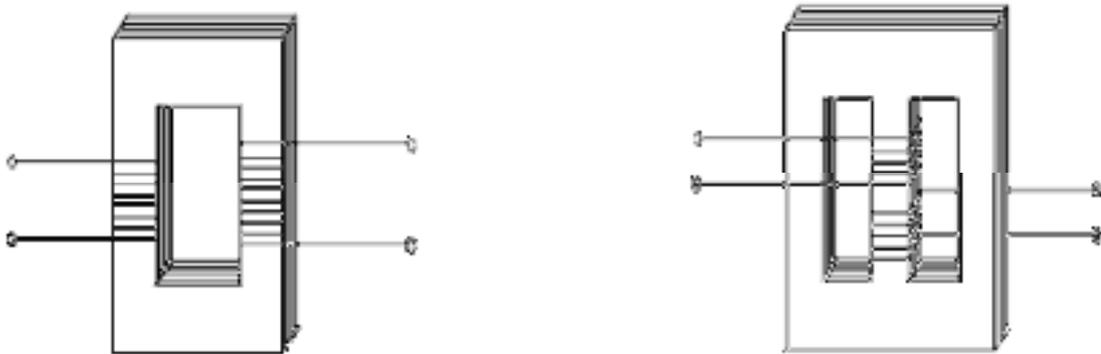
Karena nilai I_M dianggap kecil, maka $I_2 = I_1$, jadi

$$N_1 I_1 = N_2 I_2$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \dots\dots\dots(2.2)$$

2.3 Konstruksi Transformator

Kerja transformator yang berdasarkan induksi elektromagnet, menghendaki adanya gandingan magnet antara rangkaian primer dan sekunder. Gandingan magnet ini berupa *inti besi* tempat melakukan *fluks* bersama. Berdasarkan cara melilitkan kumparan pada inti, dikenal dua macam transformator, yaitu tipe inti (*core*) dan tipe cangkang (*shell*).



(a) Tipe Inti (*Core Type*)

(b) Tipe Cangkang (*Shell Type*)

Gambar 2.9 konstruksi transformator

2.3.1 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. Inti besi dibentuk dari lempengan – lempengan besi tipis berisolasi yang di susun sedemikian rupa untuk mengurangi panas yang ditimbulkan oleh rugi arus eddy.



Gambar : 2.10 inti besi transformator

2.3.2 Winding/ Kumparan

Pada suatu transformator terdapat lilitan kawat berisolasi yang membentuk suatu kumparan. Kumparan transformator terdiri dari kumparan primer dan kumparan sekunder yang diisolasi baik terhadap inti besi maupun terhadap antar kumparan dengan isolasi padat. Kumparan transformator digunakan sebagai alat transformasi tegangan dan arus. Kumparan 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 magnetik.



Gambar 2.11 Kumparan Transformator

Kerja transformator yang berdasarkan induksi elektromagnet, menghendaki adanya gandengan magnet antara rangkaian primer dan sekunder. Gandengan magnet ini berupa inti besi tempat melakukan fluks bersama. Berdasarkan cara melilitkan kumparan pada inti, dikenal dua macam transformator, yaitu tipe inti (core) dan tipe cangkang (shell).

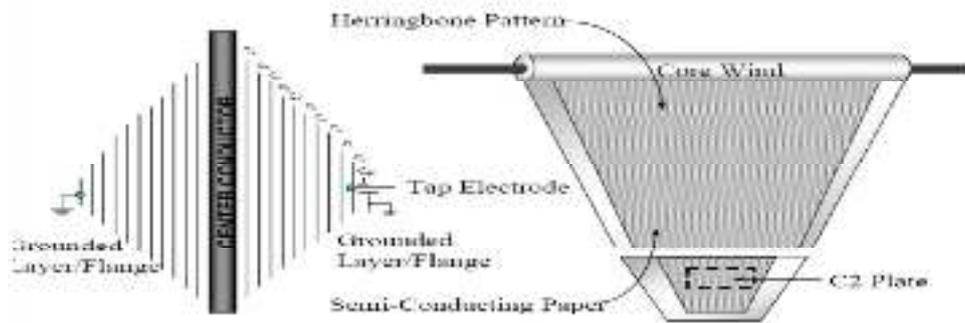
2.3.3 Bushing

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 2.12 Bushing Transformator

Secara garis besar bushing dapat dibagi menjadi empat bagian utama yaitu isolasi, konduktor, klem koneksi, dan asesoris. Isolasi pada bushing terdiri dari dua jenis yaitu oil impregnated paper dan resin impregnated paper. Pada tipe oil impregnated paper isolasi yang digunakan adalah kertas isolasi dan minyak isolasi sedangkan pada tipe resin impregnated paper isolasi yang digunakan adalah kertas isolasi dan resin.



Gambar 2.13 Kertas Isolasi pada Bushing



Gambar 2.14 Konduktor Bushing Dilapisi Kertas Isolasi

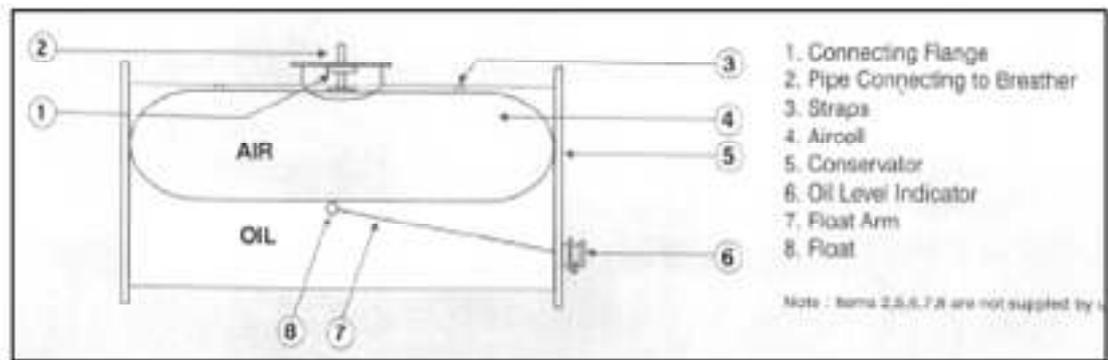
Terdapat jenis-jenis konduktor pada bushing yaitu hollow conductor dimana terdapat besi pengikat atau penegang ditengah lubang konduktor utama, konduktor pejal dan flexible lead. Klem koneksi merupakan sarana pengikat antara stud bushing dengan konduktor penghantar diluar bushing. Asesoris bushing terdiri dari indikasi minyak, seal atau gasket dan tap pengujian. Seal atau gasket pada bushing terletak dibagian bawah mounting flange.



Gambar 2.15 Indikator Level Minyak Bushing

2.3.4 Tangki 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 turun. Konservator digunakan untuk menampung minyak pada saat transformator mengalami kenaikan suhu. 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. Untuk menghindari agar minyak trafo tidak berhubungan langsung dengan udara luar, maka saat ini konservator dirancang dengan menggunakan brether bag/rubber bag, yaitu sejenis balon karet yang dipasang didalam tangki konservator.



Gambar 2.16 konstruksi kosenvator dengan Rubber Bag

2.3.5 Minyak & Kertas Isolasi

Minyak isolasi pada transformator berfungsi sebagai media isolasi, pendingin dan pelindung belitan dari oksidasi. Minyak isolasi trafo merupakan minyak mineral yang secara umum terbagi menjadi tiga jenis, yaitu parafinik, napthanik dan aromatik. Antara ketiga jenis minyak dasar tersebut tidak boleh dilakukan pencampuran karena memiliki sifat fisik maupun kimia yang berbeda. Sedangkan kertas isolasi berfungsi sebagai pemberi jarak dan memiliki kemampuan mekanis.

2.3.6 Pendingin

Sebagai instalasi tenaga listrik yang dialiri arus maka pada transformator akan terjadi panas yang sebanding dengan arus yang mengalir serta temperatur udara disekeliling transformator tersebut. Jika temperatur luar cukup tinggi dan beban transformator juga tinggi maka transformator akan beroperasi dengan temperatur yang tinggi pula. Untuk mengatasi hal tersebut transformator perlu dilengkapi dengan sistim pendingin yang bisa memanfaatkan sifat alamiah dari cairan pendingin dan dengan cara mensirkulasikan secara teknis, baik yang menggunakan sistem radiator, sirip-sirip yang tipis berisi minyak dan dibantu dengan hembusan angin dari kipas-kipas sebagai pendingin yang dapat beroperasi secara otomatis berdasarkan pada setting rele temperatur dan sirkulasi air yang bersinggungan dengan pipa minyak isolasi panas.

Tabel 2.1 Macam-Macam Pendingin pada Transformaotor

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.	OFWF	-	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			

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 2.17 radiator

2.3.7 Tap Changer

Tap changer merupakan peralatan bantu pada transformator yang digunakan untuk mengatur tegangan keluaran yang sesuai dengan kebutuhan. Tap changer transformator terdiri dari dua jenis yaitu:

1. OffLoad Tap Changer

Tipe tap changer yang dapat beroperasi hanya pada saat keadaan tidak berbeban. Tipe off load tap changer hanya bisa dioperasikan secara manual.

2. On Load Tap Changer

Tipe tap changer yang dapat beroperasi pada saat keadaan berbeban. Tipe on load tap changer dapat dioperasikan secara manual dan otomatis.

Data tap changer dapat dilihat pada Tabel 2.2

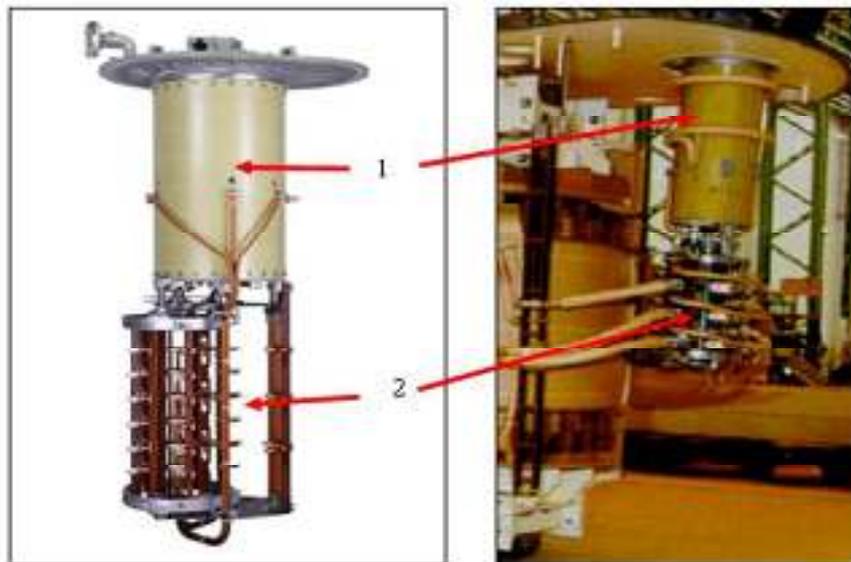
Tabel 2.2 Data Tap Changer Transformator Daya

High Voltage						
VOLTAGE		CURRENT A	SELECTOR			TAPPING POSITION
TAPPING %	V		R	S	T	
+5,0	315000	476,5	A2-A3	B2-B3	C2-C3	I
+2,5	307500	488,2	A3-A4	B3-B4	C3-C4	II
RATE	300000	500,4	A4-A5	B4-B5	C4-C5	III
-2,5	292500	513,2	A5-A6	B5-B6	C5-C6	IV
-5,0	285000	526,7	A6-A7	B6-B7	C6-C7	V
LOW VOLTAGE						
VOLTAGE (V)				CURRENT (A)		
15750				9530,8		

Tap changer terdiri dari :

- ❖ Selector Switch
- ❖ Diverter Switch
- ❖ Tahanan transisi

Dikarenakan aktivitas tap changer lebih dinamis dibanding dengan belitan utama dan inti besi, maka kompartemen antara belitan utama dengan tap changer dipisah. Selector switch merupakan rangkaian mekanis yang terdiri dari terminal-terminal untuk menentukan posisi tap atau ratio belitan primer. Diverter switch merupakan rangkaian mekanis yang dirancang untuk melakukan kontak atau melepaskan kontak dengan kecepatan yang tinggi. Tahanan transisi merupakan tahanan sementara yang akan dilewati arus primer pada saat perubahan tap.



Gambar 2.18 OLTC pada Transformator

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 arcing yang membuat minyak terurai menjadi gas C_2h_2 dan karbon, sehingga perlu dilakukan penggantian minyak periode tertentu. Sedangkan dengan metode pemadaman vaccum, proses pemadaman arcing pada waktu switching akan dilokalisir dan tidak merusak minyak.



(a)

(b)

Gambar 2.19 kontak switching pada diverter switch

(a). Media pemadam arcing menggunakan minyak,

(b). Media pemadam arcing menggunakan kondisi vacum.

2.3.8 Indikator

Pada transformator terdapat indiator yang digunakan untuk mengawasi transformator selama beroperasi. Beberapa indikator yang terdapat pada transformator yaitu:

a. Temperatur minyak.

Temperatur minyak digunakan untuk mengetahui besar suhu panas yang di alami minyak transformator. Temperatur minyak juga berfungsi sebagai indikator untuk menghentikan sistem pendingin ONAF.

b. Temperatur belitan Temperatur minyak digunakan untuk mengetahui besar suhu panas yang di alami belitan transformator. Temperatur belitan juga berfungsi sebagai indikator untuk mengaktifkan sistem pendingin ONAF.

2.3.9 NGR (Neutral Grounding Resistance)

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.

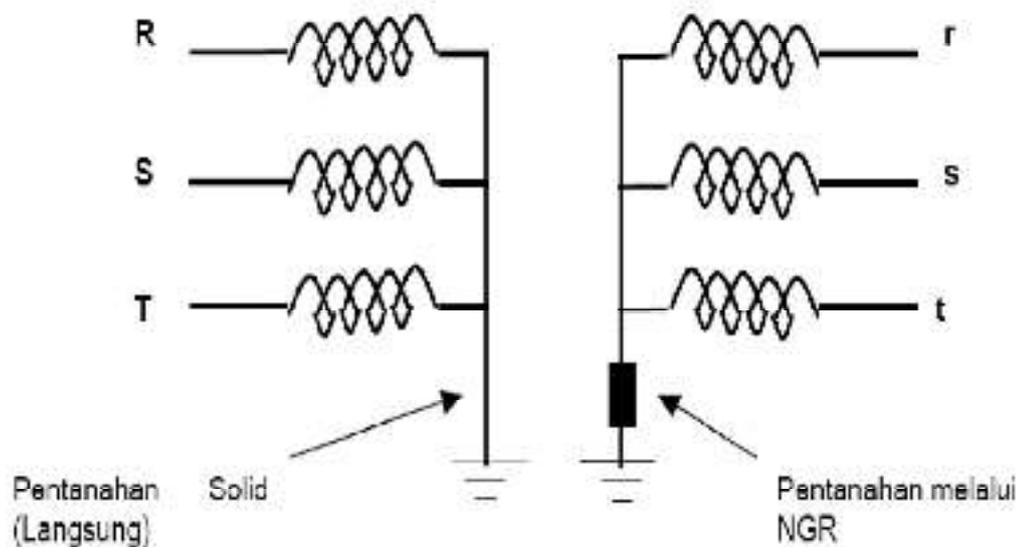
Ada dua jenis NGR, Liquid dan Solid

1. Liquid

Berarti resistornya menggunakan larutan air murni yang ditampung didalam bejana dan ditambahkan garam (NaCl) untuk mendapatkan nilai resistansi yang diinginkan.

2. Solid

Sedangkan NGR jenis padat terbuat dari Stainless Steel, FeCrAl, Cast Iron, Copper Nickel atau Nichrome yang diatur sesuai nilai tahanannya.



Gambar 2.20 Rangkaian NGR (*Neutral Grounding Resistance*)

2.4 Rugi-Rugi & Efisiensi Transformator

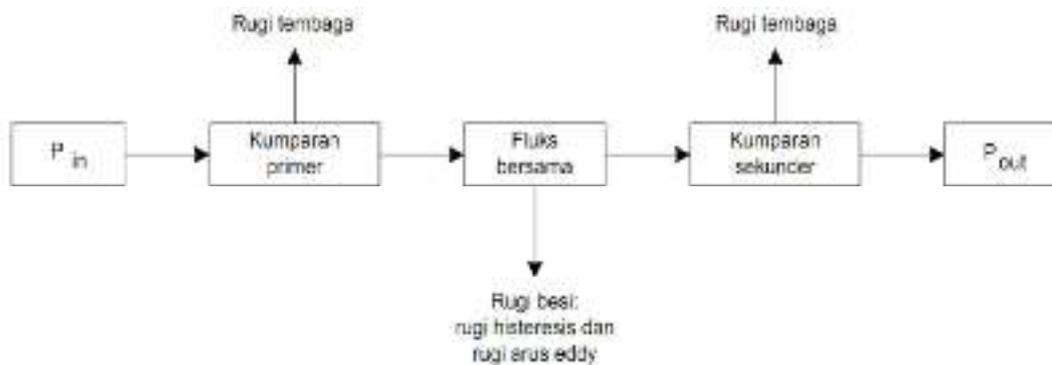
Rugi-rugi daya transformator berupa rugi inti atau rugi besi dan rugi tembaga yang terdapat pada kumparan primer maupun kumparan sekunder. Untuk memperkecil rugi-rugi tembaga harus diambil kawat tembaga yang penampangnya cukup besar untuk mengalirkan arus listrik yang diperlukan. Pada keadaan tanpa beban, besarnya daya adalah :

$$P = V I \cos \varphi \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana $\cos \varphi$ = faktor kerja

Dari persamaan (2.3) diatas juga didapat $S = V \cdot I$

$$\text{Maka } \cos \varphi = \frac{P(W)}{S(VA)} \dots\dots\dots(2.4)$$



Gambar 2.21 Diagram rugi-rugi dan efisiensi transformator

2.4.1 Rugi Tembaga (P_{cu})

Rugi tembaga adalah rugi yang disebabkan karena adanya arus beban yang mengalir pada kawat tembaga. Besarnya rugi tembaga yang dihasilkan adalah sebesar:

$$P_{cu} = I^2 R \dots\dots\dots(2.5)$$

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

$$P = I^2 \cdot R$$

$$P_1 = I_1^2 \cdot R$$

$$P_2 = I_2^2 \cdot R$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{I_1^2 \cdot R_{CU}}{I_2^2 \cdot R_{CU}}$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{I_1^2}{I_2^2}$$

$$S_1 = V \cdot I_1$$

$$S_2 = V \cdot I_2$$

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{V \cdot I_1}{V \cdot I_2}$$

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{I_1}{I_2}$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{I_1}{I_2}\right)^2 = \left(\frac{I_1}{I_2}\right)^2 = \frac{I_1}{I_2} = \frac{S_1}{S_2}$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2$$

$$P_2 = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2 \times P_1$$

$$P_{t2} = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2 \times P_{t1} \dots \dots \dots (2.6)$$

Keterangan :

P_{t2} = rugi-rugi tembaga pada saat pembebanan tertentu

P_{t1} = rugi-rugi tembaga beban penuh

S_2 = beban yang dioperasikan

S_1 = nilai pengenalan

2.4.2 Rugi Besi (P_i)

Sedangkan untuk rugi-rugi inti (rugi besi) dalam keadaan normal selalu konstan tidak tergantung terhadap besarnya perubahan beban dan rugi ini dapat dikelompokkan dalam dua bagian yaitu :

a. Rugi Histeresis (P_h)

Rugi ini akibat dari inti besi menerima fluksi bolak-balik, yang dinyatakan dengan persamaan :

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{mask}^{1.6} \text{ Watt} \dots \dots \dots (2.7)$$

Keterangan :

P_h = rugi arus pusar [w/kg]

K_h = konstanta material inti

f = frekuensi [Hz]

B_{mask} = nilai puncak medan magnet [T]

b. Rugi Eddy Current (P_e)

Rugi Eddy Current terjadinya disebabkan arus pusar pada inti besi.

Dapat dinyatakan dengan persamaan berikut ini:

$$P_e = K_e \cdot f^2 \cdot B_{mask}^2 \dots \dots \dots (2.8)$$

Keterangan :

P_e = rugi arus pusar [w/kg]

K_e = konstanta material inti

f = frekuensi [Hz]

B_{mask} = nilai puncak medan magnet [T]

2.5 Efisiensi Transformator

Efisiensi menunjukkan tingkat keefisienan kerja suatu peralatan dalam hal ini transformator yang merupakan perbandingan rating output (keluaran) terhadap input (masukan) dan dinyatakan dengan persamaan dibawah ini :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \%$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \Sigma \text{rugi-rugi}} \times 100 \% \dots\dots\dots(2.9)$$

Keterangan :

Pin = Daya input transformator

Pout = Daya output transformator

Σ rugi-rugi = Pcu + Pi

Jika misalkan daya keluaran adalah $V_2 I_2 \cos \theta$ dan rugi-rugi adalah rugi besi (Pi) sedangkan rugi tembaga (Pcu) dinyatakan dengan $I_2 R_{2ek}$, maka efisiensi dapat dinyatakan :

$$\eta = \frac{V_2 I_2 \cos \Phi}{V_2 I_2 \cos \Phi + V_2^2 R_{2ek} + P_i}$$

$$\eta = \frac{V_2 \cos \Phi}{V_2 \cos \Phi + V_2^2 R_{2ek} + \frac{P_i}{I_2}}$$

Agar efisiensi maksimum

$$\frac{d}{dl_2} (I_2 R_{2ek} + \frac{P_i}{I_2}) = 0$$

$$\text{Jadi } R_{2ek} = \frac{P_i}{I_2}$$

$$P_i = I_2^2 R_{2ek} = P_{cu} \dots\dots\dots(2.10)$$

Artinya :

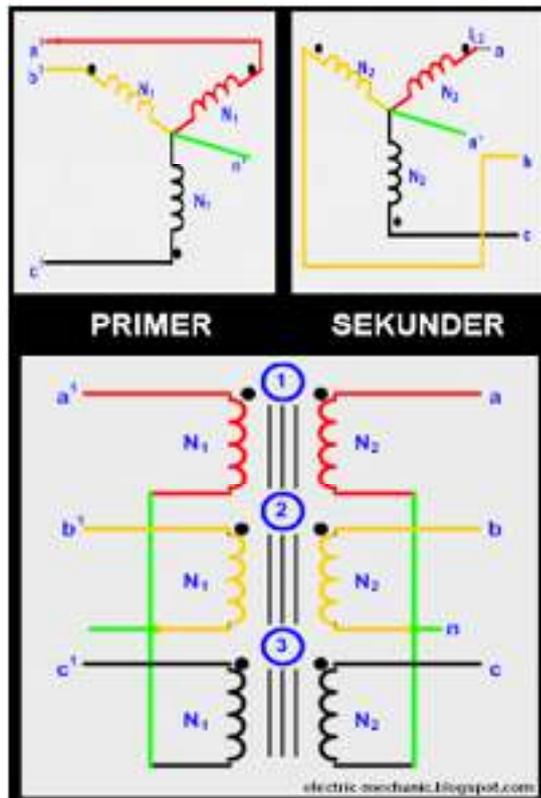
Untuk beban tertentu, efisiensi maksimum terjadi ketika rugi tembaga = rugi inti.

2.6 Transformator Tiga Fasa

Trafo tiga fasa banyak dipergunakan untuk distribusi listrik kapasitas besar terutama untuk industri yang menggunakan listrik di atas 10 KW. Ada beberapa macam hubungan antar fasa pada trafo tiga fasa yaitu :

2.6.1 Trafo Hubungan Bintang - Bintang (Y-Y)

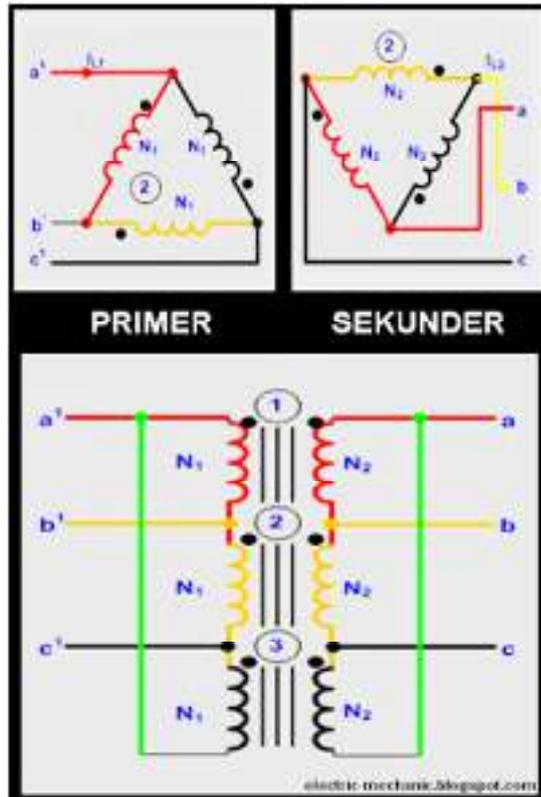
Pada jenis ini ujung ujung pada masing masing terminal dihubungkan secara bintang. Titik netral dijadikan menjadi satu. Hubungan dari tipe ini lebih ekonomis untuk arus nominal yang kecil pada transformator tegangan tinggi.



Gambar 2.22 Trafo Hubungan Bintang-Bintang

2.6.2 Trafo Hubung Delta- Delta ($\Delta - \Delta$)

Pada jenis ini ujung fasa dihubungkan dengan ujung netral kumparan lain yang secara keseluruhan akan terbentuk hubungan delta/ segitiga. Hubungan ini umumnya digunakan pada sistem yang menyalurkan arus besar pada tegangan rendah dan yang paling utama saat keberlangsungan dari pelayanan harus dipelihara meskipun salah satu fasa mengalami kegagalan.

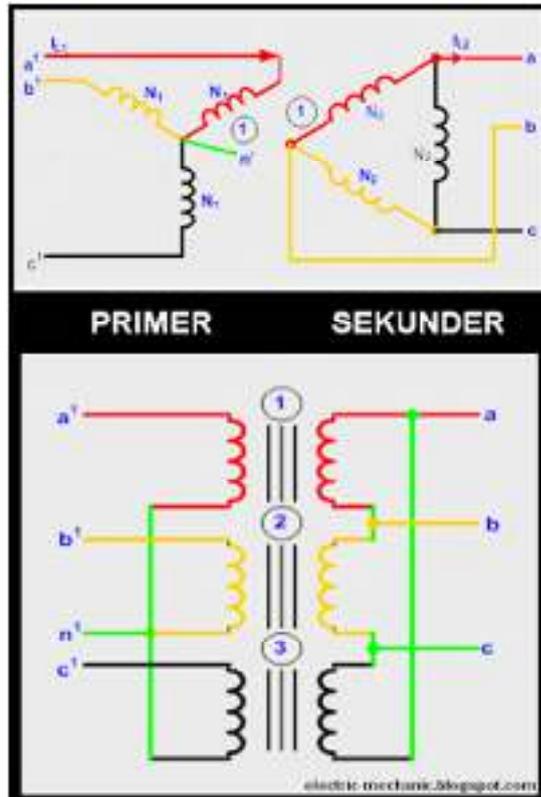


Gambar 2.23 Trafo Hubungan Delta-Delta

2.6.3 Trafo Hubung Bintang - Delta (Y - Δ)

Pada hubung ini, kumparan pafa sisi primer dirangkai secara bintang (wye) dan sisi sekundernya dirangkai delta. Umumnya digunakan pada trafo untuk jaringan transmisi dimana tegangan nantinya akan diturunkan (Step- Down).

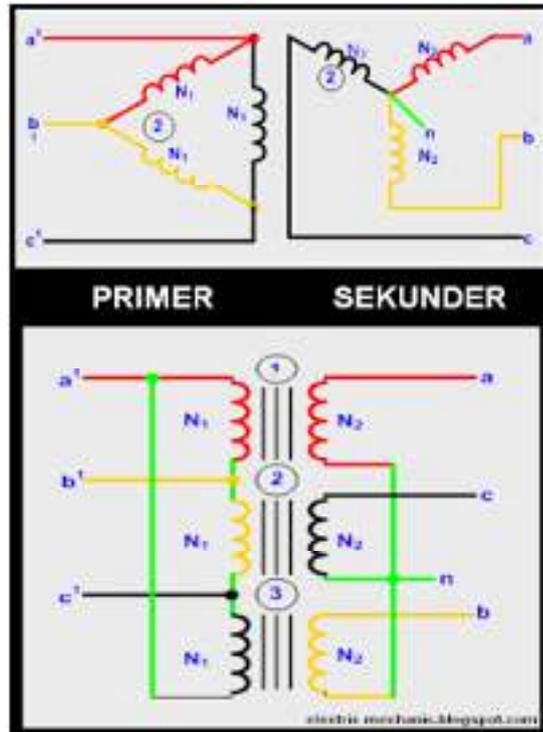
Perbandingan tegangan jala- jala $1/\sqrt{3}$ kali perbandingan lilitan transformator. Tegangan sekunder tertinggal 300 dari tegangan primer.



Gambar 2.24 Trafo Hubungan Bintang - Delta

2.6.4 Trafo Hubungan Delta-Bintang (Δ - Y)

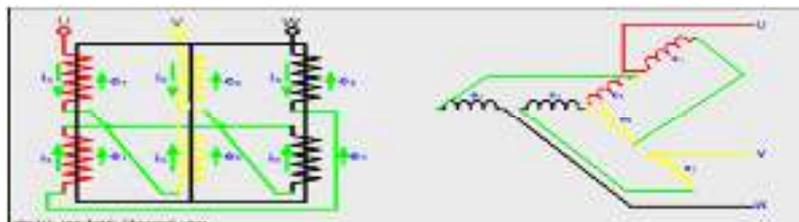
Pada hubung ini, sisi primer trafo dirangkai secara delta sedangkan pada sisi sekundernya merupakan rangkaian bintang sehingga pada sisi sekundernya terdapat titik netral. Biasanya digunakan untuk menaikkan tegangan (Step -up) pada awal sistem transmisi tegangan tinggi. Dalam hubungan ini perbandingan tegangan 3 kali perbandingan lilitan transformator dan tegangan sekunder mendahului sebesar 30° dari tegangan primernya.



Gambar 2.25 Trafo Hubungan Delta-Bintang

2.6.5. Trafo Hubungan Zig Zag

Kebanyakan transformator distribusi selalu dihubungkan bintang, salah satu syarat yang harus dipenuhi oleh transformator tersebut adalah ketiga fasanya harus diusahakan seimbang. Apabila beban tidak seimbang akan menyebabkan timbulnya tegangan titik bintang yang tidak diinginkan, karena tegangan pada peralatan yang digunakan pemakai akan berbeda-beda. Untuk menghindari terjadinya tegangan titik bintang, diantaranya adalah dengan menghubungkan sisi sekunder dalam hubungan Zigzag.



Gambar 2.26 Trafo Hubungan Zig-Zag

BAB III

PLTA WAMPU ELECTRIC POWER

3.1 Pendahuluan

Pembangkit listrik PT. Wampu Electric Power, merupakan pembangkit listrik tenaga air. yang bertempat didesa rih tengah, kecamatan kuta buluh kabupaten karo. Pembangkit ini mempunyai dua aliran sungai yaitu sungai biang dan sungai mbelin. daya yang dihasilkan pembangkit ini adalah $3 \times 15 \text{ MW} = 45 \text{ MW}$.

PLTA yang ada di PT.Wampu Electric Power menggunakan air sebagai penggerak turbin. Di WEP tegangan yang dibangkitkan oleh PLTA sebesar 11000 V (11 KV) kemudian masuk menuju LIP (Locak Isolator Panel), dan akan dinaikkan oleh trafo step up dari 11 KV menjadi 150 KV serta ditransmisikan ke garduk induk berastagi.

3.2 Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) PT. WEP

Pembangkit listrik tenaga air adalah pembangkit yang mengandalkan energi pontensial (dari dam atau air terjun) menjadi energi mekanik (dengan bantuan turbin air) dan dari energi mekanik menjadi energi listrik (dengan bantuan generator) Pembangkit listrik tenaga air konvensional bekerja dengan cara mengalirkan air dari dam ke turbin setelah itu air dibuang. PLTA ini pertama kali beroperasi tahun 2016 dan menggunakan 3 turbin air dengan kapasitas masing-masing 15 MW. PLTA yang ada di PT.Wampu Electric Power adalah untuk digunakan sebagai pasokan listrik kerumah-rumah warga yang berada di SUMUT melalui gardu induk berastagi. Karena daya yang dihasilkan PLTA yang ada di PT.Wampu Electric Power akan ditransmisikan ke gardu induk berastagi.

Disamping untuk memenuhi kebutuhan pasokan listrik , PLTA ini juga memiliki beberapa keuntungan dalam pembangunannya antara lain :

1. Memanfaatkan 2 aliran sungai.
2. Waktu starting PLTA tidak membutuhkan waktu yang lama.
3. Ramah lingkungan.

4. Tidak menyebabkan polusi lingkungan.

Akan tetapi disamping keuntungannya, PLTA juga memiliki kerugian yaitu :

1. Letaknya jauh dari pusat beban atau jauh dari permukiman.
2. Memerlukan lahan yang luas.
3. Biaya pembangunannya mahal.

3.3 Data PLTA Wampu Electric Power

Pada PLTA ini, terdapat ada tiga buah transformator daya yang digunakan untuk menyalurkan daya 3 x 15 MW dari tegangan 11 kV ke tegangan 150 kV. Untuk itu trafo mempunyai data-data sebagai berikut :

3.3.1 Generator 1

Spesifikasi generator

1. Type :SF 15 6 – 10/3250
2. Rated voltage : 11000 V
3. Rated current : 909,8 A
4. Rated speed : 600 ^r/min
5. Runaway speed : 1060 ^r/min
6. Rated capacity : 17333,3 KVA
7. Rated frequency : 50 Hz

3.3.2 Generator 2

Spesifikasi generator

1. Type :SF 15 6 – 10/3250
2. Rated voltage : 11000 V
3. Rated current : 909,8 A
4. Rated speed : 600 ^r/min
5. Runaway speed : 1060 ^r/min
6. Rated capacity : 17333,3 KVA
7. Rated frequency : 50 Hz

3.3.3 Generator 3

Spesifikasi generator

1. Type :SF 15 6 – 10/3250
2. Rated voltage : 11000 V
3. Rated current : 909,8 A
4. Rated speed : 600 ^r/min
5. Runaway speed : 1060 ^r/min
6. Rated capacity : 17333,3 KVA
7. Rated frequency : 50 Hz

3.3.4 Transformator daya 1 (TD 1)

Spesifikasi transformator 1 :

- | | |
|--------------------------------|-----------------------|
| 1. Manufactor | : HYOSUNG |
| 2. Design standard | : IEC |
| 3. Number of windings | : 2 |
| 4. Rated power, ONAN /ONAF,MVA | : 15/20 |
| 5. Rated frequency, Hz | : 50 |
| 6. Rated voltage | : HV 150 kv. LV 11 kv |
| 7. No load losses | : 21 kw |
| 8. Load losses | : 107 kw |

3.3.5 Transformator Daya 2 (TD 2)

Spesifikasi transformator 2 (TD 2)

- | | |
|--------------------------------|-----------------------|
| 1. Manufactor | : HYOSUNG |
| 2. Design standard | : IEC |
| 3. Number of windings | : 2 |
| 4. Rated power, ONAN /ONAF,MVA | : 15/20 |
| 5. Rated frequency, Hz | : 50 |
| 6. Rated voltage | : HV 150 kv. LV 11 kv |
| 7. No load losses | : 21 kw |

8. Load losses : 107 kw

3.3.6 Transformator Daya 3 (TD 3)

Spesifikasi transformator 3 (TD 3)

1. Manufactor : HYOSUNG
2. Design standard : IEC
3. Number of windings : 2
4. Rated power, ONAN /ONAF,MVA : 15/20
5. Rated frequency, Hz : 50
6. Rated voltage : HV 150 kv. LV 11 kv
7. No load losses : 21 kw
8. Load losses : 107 kw

3.4 Data Pembebanan Generator dan Transformator Daya

3.4.1 Data Generator 1

Tabel 3.1 Data pembebanan Generator 1

TIME	DATA			
	TEGANGAN	DAYA		ARUS
	KV	P (MW)	Q (MVAR)	A
8.00	11	14.65	2.11	796
10.00	11	15.44	2.51	844
12.00	11	15.18	2.11	819
14.00	11	15.58	2.11	836
16.00	11	15.31	1.72	829
18.00	11	9.17	1.72	543
20.00	11	15.18	2.11	810
22.00	11	15.44	1.72	823
0.00	11	15.44	1.58	817
2.00	11	15.18	1.58	806
4.00	11	15.44	2.11	813
6.00	11	15.58	1.32	819

3.4.2 Data Generator 2

Tabel 3.2 Data pembebanan Generator 2

TIME	DATA			
	TEGANGAN	DAYA		ARUS
	KV	P (MW)	Q (MVAR)	A
8.00	11	14.65	2.51	806
10.00	11	15.31	2.51	841
12.00	11	15.18	2.11	823
14.00	11	15.18	1.85	820
16.00	11	15.18	1.85	816
18.00	11	9.77	1.85	536
20.00	11	15.31	2.11	824
22.00	11	15.18	1.72	810
0.00	11	15.58	1.72	819
2.00	11	15.18	1.72	807
4.00	11	15.18	1.82	805
6.00	11	15.58	1.72	824

3.4.3 Data Generator 3

Tabel 3.3 Data pembebanan Generator 3

TIME	DATA			
	TEGANGAN	DAYA		ARUS
	KV	P (MW)	Q (MVAR)	A
8.00	11	15.58	2.11	844
10.00	11	15.18	2.51	831
12.00	11	15.18	1.72	814
14.00	11	15.18	1.72	812
16.00	11	15.18	2.11	818
18.00	11	9.77	1.85	540
20.00	11	15.18	1.32	819
22.00	11	15.18	1.53	816
0.00	11	15.58	1.72	824
2.00	11	15.05	1.58	800
4.00	11	15.18	1.32	805
6.00	11	15.44	1.32	816

3.4.4 Transformator Daya 1

Berikut ini adalah data pembebanan untuk transformator daya 1, yang datanya diamati oleh penulis untuk mendapatkan efisiensi pada transformator.

Tabel 3.4 Data pembebanan trafo 1

TIME	DATA			
	TEGANGAN	DAYA		ARUS
	KV	P (MW)	Q (MVAR)	A
8.00	11	14.18	0.68	56.25
10.00	11	14.85	0.68	60.45
12.00	11	14.85	-0.22	58.20
14.00	11	15.30	0.45	59.85
16.00	11	14.85	0.00	59.25
18.00	11	9.90	1.35	40.05
20.00	11	14.63	0.45	57.90
22.00	11	14.63	0.00	57.65
0.00	11	15.07	-0.22	58.50
2.00	11	14.85	-0.22	57.60
4.00	11	14.85	0.45	58.05
6.00	11	15.30	-0.22	58.65

3.4.5 Transformator Daya 2

Berikut ini adalah data pembebanan untuk transformator daya 2, yang datanya diamati oleh penulis untuk mendapatkan efisiensi pada transformator.

Tabel 3.5 Data pembebanan trafo 2

TIME	DATA			
	TEGANGAN	DAYA		ARUS
	KV	P (MW)	Q (MVAR)	A
8.00	11	13.95	0.68	55.65
10.00	11	15.07	0.68	60.30
12.00	11	14.85	-0.22	58.50
14.00	11	14.85	0.22	58.80
16.00	11	14.40	0.45	56.70
18.00	11	9.90	0.90	40.05
20.00	11	15.07	0.45	58.95
22.00	11	14.63	0.00	57.45
0.00	11	15.07	0.00	58.80
2.00	11	14.85	0.00	57.57
4.00	11	14.85	0.45	57.75
6.00	11	15.30	0.00	58.95

3.4.6 Transformator Daya 3

Berikut ini adalah data pembebanan untuk transformator daya 3, yang datanya diamati oleh penulis untuk mendapatkan efisiensi pada transformator.

Tabel 3.6 Data pembebanan trafo 3

TIME	DATA			
	TEGANGAN	DAYA		ARUS
	KV	P (MW)	Q (MVAR)	A
8.00	11	14.63	0.68	58.80
10.00	11	14.85	0.90	60.30
12.00	11	14.85	0.00	58.80
14.00	11	14.85	0.45	58.95
16.00	11	14.63	0.45	57.90
18.00	11	9.90	1.35	39.60
20.00	11	15.07	-0.68	59.10
22.00	11	15.07	-0.90	59.25
0.00	11	15.30	-0.22	59.70
2.00	11	14.85	-0.22	57.75
4.00	11	14.85	-0.22	58.35
6.00	11	15.07	-0.22	58.80