

BAB I

PENDAHUUAN

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 pemamfaatannya.

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 bekurangnya efisiensi pada transformator.

Efisiensi transformator merupakan perbandingan daya keluaran(output) dan daya masukan (input), dimana besar kecilnya efisiensi yang dihasilkan 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 semakin besar daya yang hilang pada transformator tersebut.

1.2 Perumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari tulisan ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh perubahan beban terhadap rugi-rugi transformator daya.
2. Bagaimana pengaruh perubahan beban terhadap efisiensi transformator daya.
3. Bagaimana pengaruh perubahan beban pada transformator daya terhadap output.

1.3 Batasan Masalah

Mengingat luasnya tentang pembahasan tentang transformator, maka untuk itu penulis membatasi permasalahannya 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 transformator pada saat pembebanan.
4. Hanya membahas transformator daya 2 dan transformator daya 3.

1.4 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.

1.5 Metodologi Penelitian

1. Studi literature.
Yaitu dengan mempelajari buku-buku referensi yang tersedia dari media cetak maupun internet dan juga buku maupun catatan kuliah yang mendukung untuk penulisan tugas akhir ini.

2. Pengambilan data.

Adapun pengambilan data dilakukan dengan mengambil data-data transformator dari gardu induk P.Siantar PT.PLN (persero).

3. Studi bimbingan.

Yaitu dengan diskusi atau konsultasi dengan dosen pembimbing tugas akhir

1.6 Sistematika Penulisan

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

BAB I : PENDAHULUAN

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

Bab ini menjelaskan perhitungan efisiensi transformator dan analisisnya.

BAB II

Transformator Daya

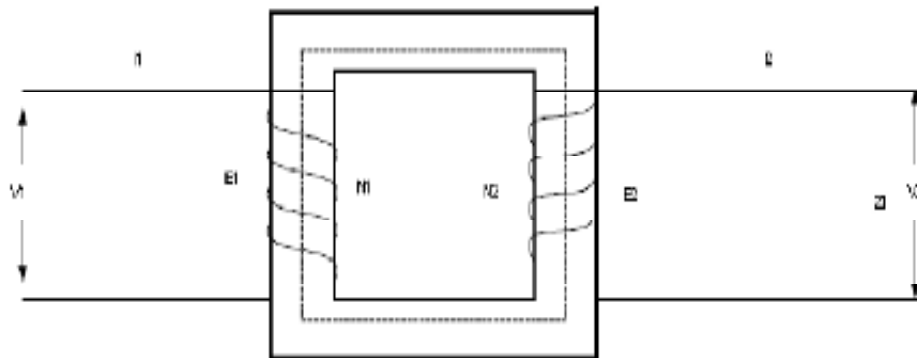
2.1 Umum

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 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 pembangkit
2. Transformator distribusi
3. Transformator gardu induk/penyaluran

Kerja transformator yang berdasarkan induksi elektromagnet, menghendaki adanya gandengan magnet antara rangkaian 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 gambar 2.1. Dimana jika tegangan pada sisi primer lebih besar dari sisi sekunder maka disebut transformator penurun tegangan. sebaliknya bila tegangan pada sisi sekunder lebih besar dari pada sisi primer, maka dinamakan transformator penaik tegangan.



Gambar 2.1 Rangkaian Transformator

Keterangan gambar 2.1 :

N_1 = Jumlah lilitan primer

N_2 = Jumlah lilitan sekunder

V_1 = Tegangan input (volt)

V_2 = Tegangan output (volt)

E_1 = GGL efektif sisi primer (volt)

E_2 = GGL efektif sisi sekunder (volt)

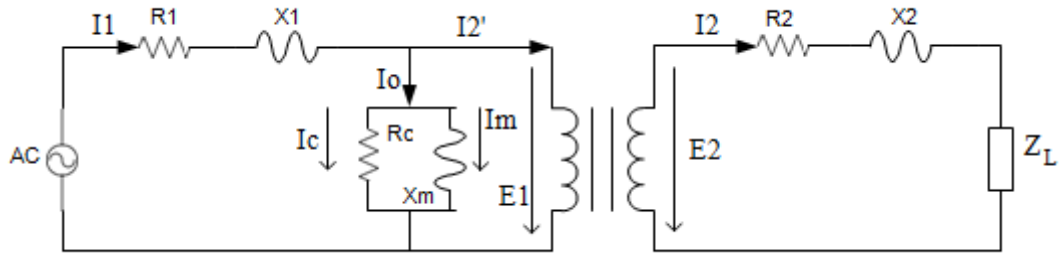
ϕ = Fluksi magnet

2.2 Prinsip Kerja Transformator

Transformator terdiri atas dua buah kumparan (primer dan sekunder) yang bersifat induktif, yang terpisah secara elektrik namun berhubungan secara magnetik melalui jalur yang memiliki reluktansi (*reluctance*) rendah. Apabila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak balik, maka fluks bolak balik akan muncul dalam inti (*core*) yang dilaminasi, karena kumparan tersebut membentuk jaringan tertutup, maka mengalirlah arus primer.

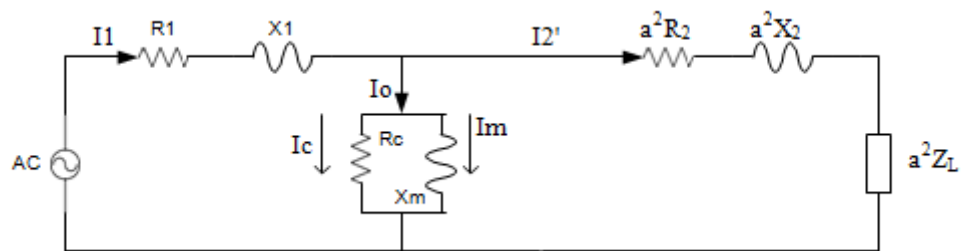
Akibat adanya fluks di kumparan primer, maka dikumparan primer terjadi induksi (*self induction*) dan terjadi pula induksi dikumparan sekunder karena pengaruh induksi dari kumparan primer (*mutual induction*) yang menyebabkan timbulnya fluks magnet dikumparan sekunder, serta arus sekunder jika rangkaian sekunder dibebani, sehingga energi listrik dapat ditransfer keseluruhan (secara

magnetik). Secara umum, rangkaian pengganti sebuah transformator ditunjukkan seperti pada gambar 2.2 :



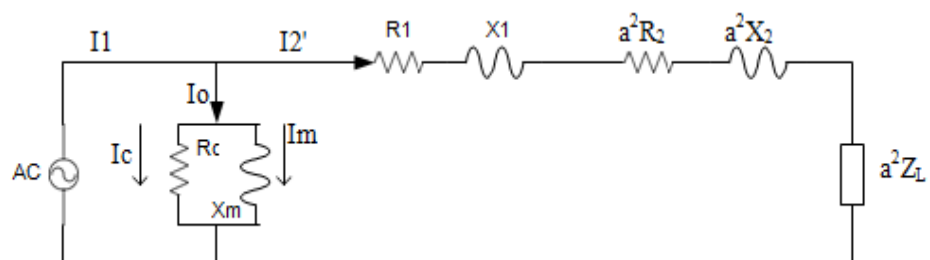
Gambar 2.2 Rangkaian Pengganti Transformator

Apabila semua parameter sekunder dinyatakan dalam harga rangkaian primer, harganya perlu dikalikan dengan faktor a^2 , dimana $a = E1/E2$. Rangkaian ekivalen transformator dapat dibuat sebagai berikut:



Gambar 2.3 Rangkaian Ekivalen Transformator

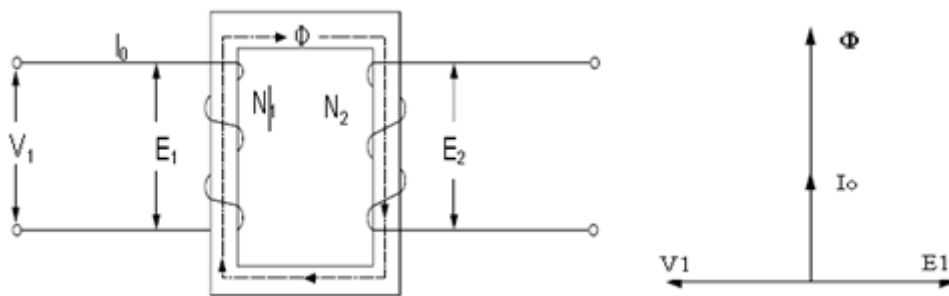
Untuk memudahkan perhitungan, maka dibuat rangkaian sebagai berikut:



Gambar 2.4 Rangkaian Ekuivalen 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 .



(a) transformator tanpa beban (b) vektor transformator tanpa beban

Gambar 2.5 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

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

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

$$N_1 \cdot \omega \cdot \phi_{\max} \cdot \cos \omega t \text{ (tertinggal } 90^\circ \text{ dari } \Phi)$$

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

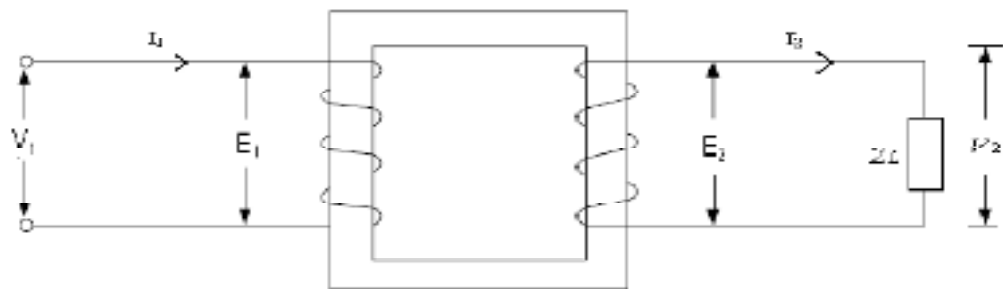
Dengan mengabaikan rugi tahanan dan adanya fluks bocor

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

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 2.6 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_1 , 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 :

$$I_M = N_1 I_1 - N_2 I_2$$

$$I_1 I_M = N_1(I_M + I_2) - N_2 I_2$$

$$\text{Sehingga : } N_1 I_2 = N_2 I_2$$

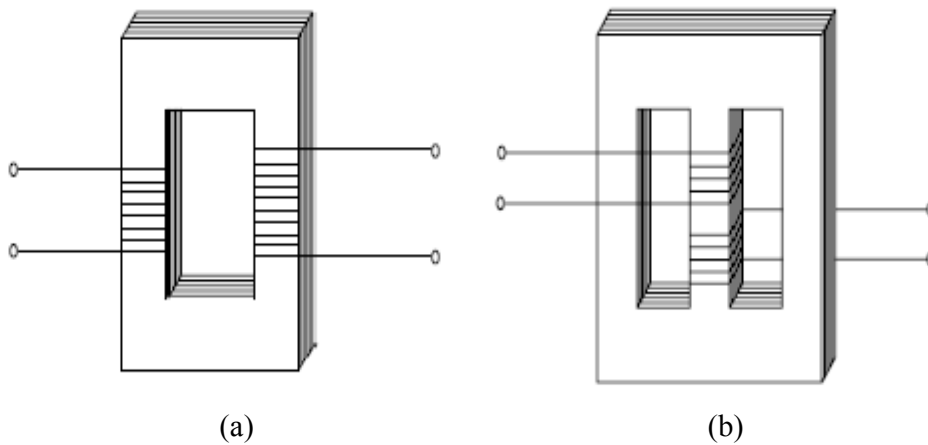
Karena nilai I_M dianggap kecil maka $I_2 = I_1$, jadi

$$N_1 I_1 = N_2 I_2$$

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

2.3 Konstruksi Transformator

Kerja transformator yang berdasarkan induksi elektromagnet, menghendaki adanya 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*).

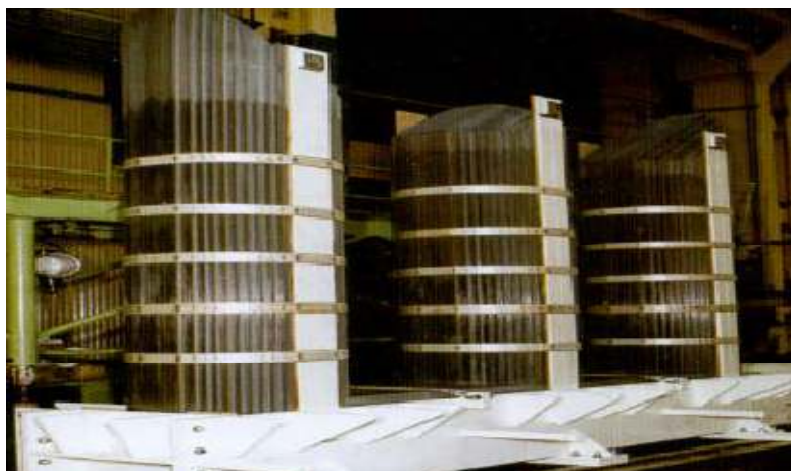


Gambar 2.7. (a) Tipe Inti (*Core Type*)

(b) Tipe Cangkang (*Shell Type*)

2.3.1 Inti Besi

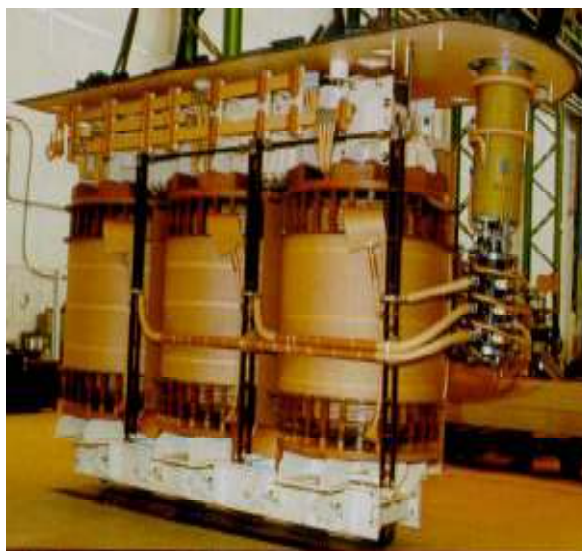
Inti besi digunakan sebagai media jalannya fluks yang timbul akibat induksi arus bolak balik pada kumparan yang mengelilingi inti besi sehingga dapat menginduksi kembali ke kumparan yang lain. Dibentuk dari lempengan – lempengan besi tipis berisolasi yang di susun sedemikian rupa untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh Eddy Current.



Gambar.2.8 inti besi Transformator

2.3.2 Kumbaran Transformator (*Winding*)

Kumbaran transformator adalah beberapa lilitan kawat berisolasi yang membentuk suatu kumbaran. 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 magnetik.



Gambar 2.9 Kumbaran Fasa R-S-T

2.3.3 Minyak Transformator

Sebagian besar kumparan-kumparan dan inti trafo tenaga direndam dalam minyak trafo, terutama trafo-trafo tenaga yang berkapasitas besar, karena minyak trafo mempunyai sifat sebagai isolasi dan media pemindah, sehingga minyak trafo tersebut berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi.

Tabel 2.1 Batasan nilai parameter minyak isolasi

Property	Highest voltage equipment		
	<72,5	72,5 to 170	>170
Appearance	Clear, free from sediment and suspended matter		
Colour (on scale given in ISO 2049)	Max. 2,0	Max. 2,0	Max. 2,0
Breakdown voltage (KV)			
Water content (<i>mg/kg</i>) ^a			
Acidity (mg KOH/g)	Max. 0,03	Max. 0,03	Max. 0,03
Dielectric dissipation factor at 90°C and 40 Hz to 60 Hz ^c	Max. 0,015	Max. 0,015	Max. 0,010
Resistivity at 90°C (GΩm)	Min. 60	Min. 60	Min. 60
Oxidation stability	As specified in IEC 60296		
Interfacial tension (mN/m)	Min. 35	Min. 35	Min. 35
Total PCB content (mg/kg)	Not detectable (< 2total)		
Particles	-	-	See Table B, 1 ^d

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 akan turun. Konservator digunakan untuk menampung minyak pada saat transformator mengalami kenaikan suhu.



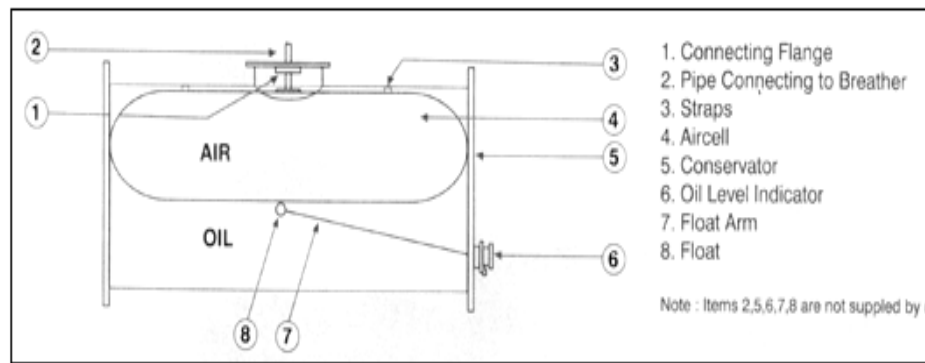
Gambar 2.10 Konservator Minyak Transformator

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 2.11 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 2.12 Konstruksi konservator dengan *rubber bag*

2.3.5 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 2.2 Macam-macam 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.	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			

2.3.6 Tap Changer (On Load Tap Changer).

Kestabilan tegangan dalam suatu jaringan merupakan salah satu hal yang dinilai sebagai kualitas tegangan. Transformator dituntut memiliki nilai tegangan *output* yang stabil sedangkan besarnya tegangan *input* tidak selalu sama. Dengan mengubah banyaknya belitan pada sisi primer, diharapkan dapat mengubah perbandingan antara belitan primer dan sekunder. Dengan demikian tegangan *output* sekunder pun dapat disesuaikan dengan kebutuhan sistem, berapa pun tegangan *input*/primernya. Penyesuaian perbandingan belitan ini disebut *Tap changer*.

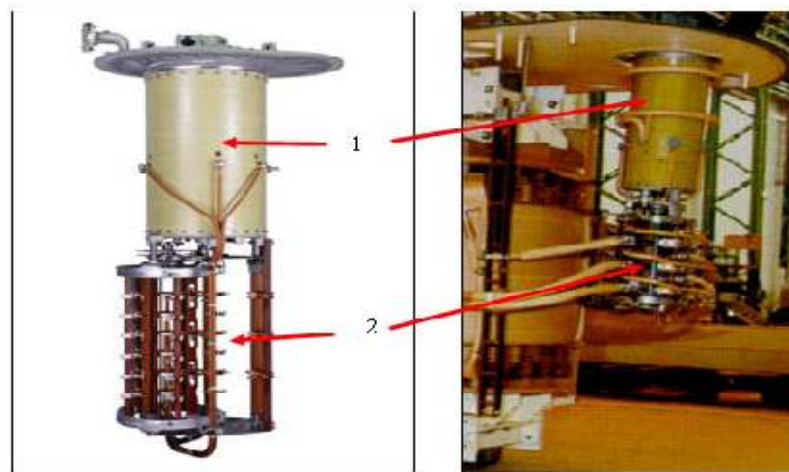
Proses perubahan perbandingan belitan ini dapat dilakukan pada saat transformator sedang berbeban (*On load tap changer*) atau saat transformator tidak berbeban (*Off load tap changer*).

Tap changer terdiri dari :

- *Selector Switch*
- *Diverter Switch*

- Tahanan transisi

Dikarenakan aktifitas *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 perbandingan 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.



Keterangan : 1. *Diverter Switch*
2. *Selektor Switch*

Gambar 2.13 OLTC Pada Transformator

2.3.7 NGR (*Neutral Grounding Resistant*)

Salah satu metoda pentanahan adalah dengan menggunakan NGR. NGR adalah sebuah tahanan yang dipasang serial dengan netral sekunder pada transformator sebelum terhubung ke tanah. Tujuan dipasangnya NGR adalah untuk mengontrol besarnya arus gangguan yang mengalir dari sisi netral 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 2.14 *Neutral grounding resistance* (NGR)

2.3.8 Peralatan Indikator

2.3.8.1 Termometer

Adalah alat pengukur tingkat panas dari trafo baik panasnya kumparan primer dan sekunder juga minyak. Thermometer ini bekerja atas dasar air raksa (mercuri/Hg) yang tersambung dengan tabung pemuaian dan tersambung dengan jarum indikator derajat panas.

2.3.8.2 Peralatan Proteksi Transformator

Peralatan yang mengamankan trafo terhadap bahaya fisis, listrik maupun kimiawi. Yang termasuk peralatan proteksi transformator antara lain sebagai berikut:

2.3.8.2.1 Rele Bucholz

Yaitu peralatan rele yang dapat mendeteksi dan mengamankan terhadap gangguan di dalam trafo yang menimbulkan gas. Di dalam transformator, gas mungkin dapat timbul akibat hubung singkat antar lilitan (dalam phasa/antar phasa), hubung singkat antar phasa ke tanah, busur listrik antar laminasi, atau busur listrik yang ditimbulkan karena terjadinya kontak yang kurang baik.

Pada saat transformator mengalami gangguan internal yang berdampak kepada suhu yang sangat tinggi dan pergerakan mekanis didalam transformator, maka akan timbul tekanan aliran minyak yang sangat besar dan pembentukan gelembung gas yang mudah terbakar. Tekanan atau gelembung gas tersebut akan naik ke konservator melalui pipa penghubung dan rele bucholz. Tekanan minyak maupun gelembung gas ini akan dideteksi oleh rele bucholz sebagai indikasi telah terjadinya gangguan internal.

2.3.8.2.2 Rele Tekanan Lebih

Peralatan rele yang dapat mendeteksi gangguan pada transformator bila terjadi kenaikan tekanan gas secara tiba-tiba dan langsung mentripkan CB pada sisi upstream-nya.

2.3.8.2.3 Rele Diferensial

Rele yang dapat mendeteksi gangguan transformator apabila terjadi flash over antara kumparan dengan kumparan, kumparan dengan tangki atau belitan di dalam kumparan ataupun antar kumparan.

2.3.8.2.4 Rele Beban Lebih

Rele ini berfungsi untuk mengamankan transformator terhadap gangguan hubungan singkat antar phasa didalam maupun diluar daerah pengaman trafo, juga diharapkan rele ini mempunyai sifat komplementer dengan rele beban lebih. Rele ini juga berfungsi sebagai cadangan bagi pengaman instalasi lainnya. Arus berlebih dapat terjadi karena beban lebih atau gangguan hubung singkat.

2.3.8.2.5 Rele Fluks Lebih

Rele ini berfungsi untuk mengamankan transformator dengan mendeteksi besaran fluksi atau perbandingan tegangan dan frekwensi.

2.3.8.2.6 Rele Tangki Tanah

Rele ini berfungsi untuk mengamankan transformator bila terjadi hubung singkat antara bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan pada transformator.

2.3.8.2.7 Rele Gangguan Tanah Terbatas

Rele ini berfungsi untuk mengamankan transformator terhadap gangguan tanah didalam daerah pengaman transformator khususnya untuk gangguan di dekat titik netral yang tidak dapat dirasakan oleh rele diferensial.

2.3.8.2.8 Rele Termis

Rele ini berfungsi untuk mengamankan transformator dari kerusakan isolasi kumparan, akibat adanya panas lebih yang ditimbulkan oleh arus beban lebih. Besaran yang diukur didalam rele ini adalah kenaikan temperatur.

2.3.8.2.9 Fire Protection

Trafo tenaga adalah salah satu peralatan yang cukup mahal yang terpasang dipusat pembangkit dan gardu induk. Setiap trafo tenaga terisi dengan material yang mudah terbakar dengan jumlah yang cukup besar yang mana bila tersulut dapat menyalakan api ke instalasi yang berdekatan. Oleh karena itu sangat perlu dilengkapi dengan peralatan pengamannya.

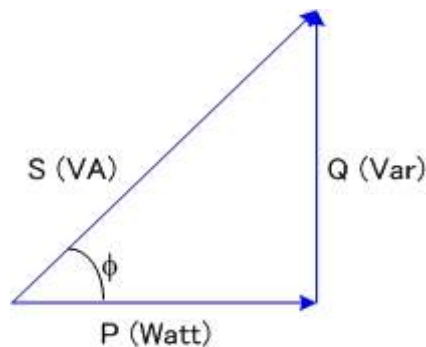
Kegagalan trafo pada umumnya disebabkan oleh break down isolasi pada bagian internal trafo. Adanya energi busur listrik akan diikuti kenaikan temperatur dan tekanan yang sangat cepat didalam tangki trafo. Terbakarnya minyak pada

jumlah tertentu dapat mengakibatkan tekanan yang sangat tinggi kearah luar melalui kisaran bidang tertentu dan dapat langsung diikuti nyala api.

2.4 Pengertian Daya

Daya dalam tegangan AC pada setiap saat sama dengan perkalian dari harga arus dan tegangan pada saat itu. Jika arus dan tegangan bolak-balik satu fasa, maka daya dalam satu periode sama dengan perkalian dari arus dan tegangan efektif. Tapi jika ada reaktansi dalam rangkaian arus dan tegangan tidak satu fasa sehingga selama siklusnya bisa terjadi arus negatif dan tegangan positif. Secara teoritis daya terdiri dari tiga yaitu daya efektif, daya reaktif dan daya semu yang pengertiannya adalah sebagai berikut :

1. Daya efektif (P) adalah daya yang diubah menjadi energi, persatuan waktu atau dengan kata lain daya aktif adalah daya yang benar-benar dipakai yang dihasilkan oleh komponen resistif, satuannya adalah watt (w).
2. Daya reaktif (Q) adalah daya yang ditimbulkan oleh komponen daya reaktif yang ditentukan dari reaktansi yang menimbulkan daya berupa reaktansi induktif (XL) atau reaktansi kapasitif (XC), satuannya adalah volt ampere reaktif (VAR).
3. Daya semu (S) adalah jumlah secara vektoris daya aktif dan daya reaktif yang memiliki satuan Volt Ampere (VA).



Gambar 2.15 Segitiga Daya

Untuk daya 3 phasa didapat :

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \theta$$

$$S = \sqrt{3}.V.I$$

$$Q = \sqrt{3}.V.I . \sin \theta$$

Dimana :

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

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

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

2.5 Rugi-rugi 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 :

$$P = VI \cos \varphi \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana $\cos \varphi =$ faktor kerja

Dari persamaan diatas juga didapat

$$S = \sqrt{3}.V.I$$

Maka

$$\cos \varphi = \frac{P(W)}{S(VI)}$$

$$\dots\dots\dots(2.4)$$

Tujuan utama dari perancangan listrik adalah untuk mengurangi berbagai kerugian, yang mana walaupun dalam persentasi adalah kecil, mungkin harganya sangat besar pada transformator yang lebih besar. Adapun rugi-rugi transformator antara lain :

2.5.1 Rugi Tembaga (P_{CU})

Rugi ini disebabkan arus beban mengalir pada kawat tembaga, dapat ditulis sebagai berikut :

$$P_{CU} = I^2 R$$

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

.....(2.5)

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.

2.5.2 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 :

2.5.2.1 Rugi Histerisis (P_h)

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

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{maks}^{1.6} \text{ watt}$$

Dimana :

K_h = konstanta histerisis

B_{maks} = fluksi maksimum (weber)

2.5.2.2 Rugi *Eddy Current*

Rugi *Eddy Current* terjadinya disebabkan arus pusar pada inti besi. Dapat dinyatakan dengan persamaan berikut ini:

$$P_e = K_e \cdot f^2 B_{maks}^2$$

Dimana:

K_e = Konstanta Eddy current

Sehingga rugi inti (rugi besi) dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$P_i = P_h + P_e \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana: $K_e =$ Rugi besi

$K_e =$ Rugi histerisis

$K_e =$ Rugi Eddy Current

2.6 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 :

$$\eta = \left(\frac{P_o}{P_{in}} \right) \times 100\%$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + \sum \text{rugi}} \times 100\%$$

.....(2.7)

Dimana:

$P_o =$ Daya keluaran (output)

$P_i =$ Daya masukan (input)

$\sum \text{rugi} = P_{CU} + P_i$; dimana $P_{CU} =$ Rugi Tembaga

$P_i =$ Rugi Besi

Jika dimisalkan daya keluaran adalah $V_2 I_2 \cos \theta$ dan rugi-rugi adalah rugi besi P_i sedangkan rugi-rugi tembaga P_{CU} dinyatakan dengan $I_2 R_{2ek}$, maka efisiensi dapat dinyatakan sebagai berikut:

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

Dengan dibagi I_2 , maka didapat:

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

Agar efisiensi maksimum

$$\frac{d}{dI_2} \left(I_2 R_{2ek} + \frac{P_i}{I_2} \right) = 0$$

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

$$P_i = I_2^2 R_{2ek} = P_{CU} \dots \dots \dots (2.8)$$

Artinya :

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

2.7 Transformator Tiga Fasa

Transformator 3 fasa pada umumnya digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik pada sistem tegangan 3 fasa (arus bolak-balik). Pada sisi primer dan sekunder masing-masing mempunyai lilitan yang identik dengan 3 buah transformator satu fasa, yang ujung kumparan primer dan sekunder dapat disambung (dihubungkan) secara bintang (Y) atau segi-tiga (Δ). Kadang-kadang untuk suatu maksud tertentu sisi sekunder dihubungkan secara zig-zag (Z).

Transformator tiga fasa dapat dikonstruksikan dari tiga macam tipe yaitu :

1. 3 x 1 fasa dimana tiga transformator terdiri dari satu fasa yang identik
2. 1 x 3 fasa dimana satu fasa transformator konstruksi tipe tiga fasa

Ciri-ciri transformator 3 x 1 fasa yaitu :

- a. Kumparan primer dan sekunder dapat dibuat beberapa macam vektor group dan angka jam

yang sesuai dengan yang diinginkan

- b. Ketiga transformator dapat dioperasikan ke beban menjadi satu fasa dengan cara yang dihubung paralel.
- c. Dengan daya yang sama ketiga fasa maka untuk 3x1 fasa dibandingkan dengan 1x3 fasa lebih berat dan lebih mahal.

- d. Tegangan untuk ketiga fasanya primer dan sekunder betul-betul seimbang.

Sedangkan ciri-ciri transformator 1 x 3 fasa yaitu :

- a. Konstruksi sudah didesain dari pabrik dalam bentuk permanen.
- b. Dapat digunakan untuk mensuplai beban satu fasa maka dari setiap fasa maksimal beban yang dapat dipikul $1/3$ x daya tiga fasa.
- c. Transformator ini lebih ringan (material lebih kecil) sehingga lebih murah.

- d. Keseimbangan tegangan antara ketiga fasanya primer dan sekunder kurang begitu seimbang.

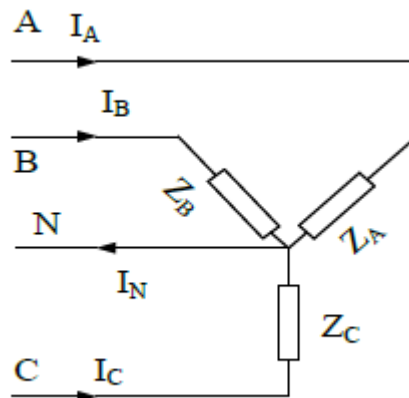
2.7.1 Hubungan belitan transformator tiga fasa

Setiap sisi primer atau sisi sekunder transformator tiga fasa dapat dihubungkan menurut tiga cara yaitu :

- Hubungan bintang
- Hubungan delta
- Hubungan zig-zag

2.7.1.1 Hubungan Bintang

Pada hubungan bintang dari ketiga kumparan dihubungkan apa dinamakan titik bintang. Arus transformator tiga fasa dengan kumparan yang dihubungkan secara bintang yaitu I_A , I_B , dan I_C yang masing-masing fasanya beda 120° .



Gambar 2.16 Transformator Hubungan Bintang 3 Fasa

Pada gambar diatas didapat bahwa :

$$I_N = I_A + I_B + I_C$$

$$V_{AB} = V_{AN} + V_{BN} = V_{AN} - V_{BN}$$

$$V_{BC} = V_{BN} - V_{CN}$$

$$V_{CA} = V_{CN} - V_{AN}$$

$$V_{AB} = 3 V_{AN} \text{ atau}$$

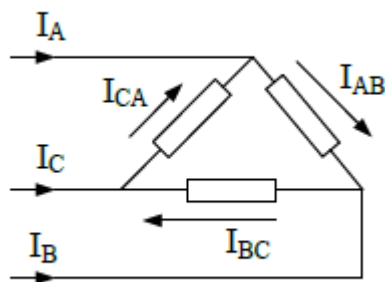
$$V_P = \sqrt{3}V_L \text{ dan } I_L = I_P$$

Maka besarnya daya hubungan bintang adalah :

$$VA = 3I_P V_P$$

$$VA = \sqrt{3} \cdot V_L I_L$$

2.7.1.2 Hubungan Delta



Tegangan transformator tiga fasa dengan beban yang dihubung delta yaitu V_{AB} , V_{BC} , dan V_{CA} masing-masing beda sudut 120° .

Gambar 2.17 Transformator Hubungan Delta 3 Fasa

Pada gambar diatas, didapat bahwa :

$$V_{AB} + V_{BC} + V_{CA} = 0$$

Sedang untuk beban yang seimbang berlaku :

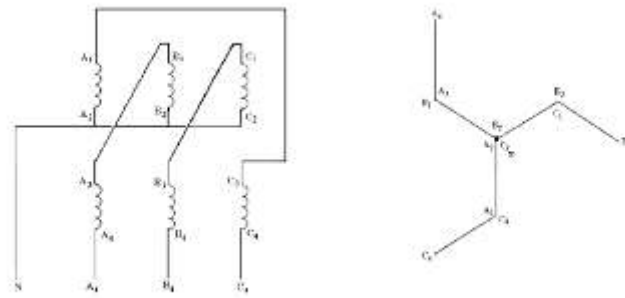
$$I_A = I_{AB} - I_{CA}$$

$$I_B = I_{BC} - I_{AB}$$

$$I_C = I_{CA} - I_{BC}$$

2.7.1.3 Hubungan Zig-Zag

Transformator *zig-zag* merupakan transformator dengan tujuan khusus. Salah satu aplikasinya adalah menyediakan titik netral untuk sistem listrik yang tidak memiliki titik netral. Hubungan ini biasa digunakan untuk beban yang tidak seimbang (asimetris), artinya beban antar fasa tidak sama, ada yang lebih besar atau lebih kecil.



Gambar 2.18 Transpormator hubungan zig-zag 3 fasa

BAB III
DATA PEMBEBANAN TRAFODAYA
GARDU INDUKPEMATANG SIANTAR

3.1 Transformator Daya di Pematang Siantar

Pada Gardu Induk Pematang Siantar terdapat tiga buah trafo daya. Satu buah trafo yang berkapasitas 30 MVA dengan merek UNINDO (TD1) digunakan untuk pemakaian sendiri, sedangkan trafo daya 2 dan trafo daya 3 digunakan untuk penyaluran daya dari tegangan 150 kv ketegangan distribusi 20 kv. mempunyai data sebagai berikut :

3.1.1 Transformator Daya 2 (TD 2)

Spesifikasi transformator 2 :

Merk :XIAN

Serial number :A94025-3

Year of manufactured: 1994

Standard : IEC 76

Rated power : 60 MVA

Cooling :ONAN/ONAF

Frequency : 50 Hz

Phases : 3

Pada Gambar 3.1 dibawah ini terlihat trafo daya 2 (TD 2) yang terpasang pada gardu induk pematang siantar.



Gambar 3.1 Transformator Daya 2 (TD 2)

3.1.2 Transformator Daya 3 (TD 3)

Spesifikasi transformator 3 :

Merk :PAUWELS

Serial number :3011100086

Year of manufactured : 2012

Standard : IEC 76

Rated power : 60 MVA

Cooling : 0NAN / ONAF

Frequency : 50 Hz

Phases : 3

Pada Gambar 3.2 dibawah ini terlihat trafo daya 3 (TD 3) yang terpasang pada gardu induk pematang siantar.



Gambar 3.2 Transformator Daya 3 (TD 3)

3.3 Data pembebanan Transformator Daya 2

Berikut ini adalah data pembebanan untuk transformator daya 2, yang diamati dalam 10 hari karena penulis hanya mengamati efisiensi transformator didalam 10 hari.

3.3.1 Data pembebanan tertinggi siang

Tabel. 3.1 Pembebanan Tertinggi Siang TD 2

TGL	DATA			
	TEGANGAN	DAYA		ARUS
	KV	P (MW)	Q (MVAR)	A
1	20	18,2	13	680
2	20,1	22	8	807
3	20,1	25,3	8	772
4	20	23	7,4	731
5	20	18	9,7	578
6	20	22,2	6,4	703
7	20	23,2	9,2	747
8	20	22	9	718
9	20,3	21,3	10	692
10	20	19,2	10,3	615

3.3.2 Data pembebanan tertinggi malam

Tabel. 3.2 Pembebanan Tertinggi Malam TD 2

TGL	DATA			
	TEGANGAN	DAYA		ARUS
	KV	P (MW)	Q (MVAR)	A
1	20,3	28,8	8,5	863
2	20	32,6	8,6	992
3	20,1	27	7,8	826
4	20	20	9	813
5	20	15,5	8	515
6	20	26,4	9	828
7	20	28,9	8,1	882
8	20	25	8,5	784
9	20,3	28,5	7	862
10	20	25	8,5	774

3.3.3 Data pembebanan terendah siang

Tabel. 3.3 Pembebanan Terendah Siang TD 2

TGL	DATA			
	TEGANGAN	DAYA		ARUS
	KV	P (MW)	Q (MVAR)	A
1	20	16,6	11,1	548
2	20	11	8	399
3	20,3	20,2	5,8	611
4	20	15,3	6,3	489
5	20,3	12,7	7	437
6	20,2	12	7,6	427
7	20	16,6	9	566
8	20	14,2	7,5	467
9	20	15,2	10	486
10	20	14,6	7,7	503

3.3.4 Data Pembebanan terendah malam

Tabel. 3.4 Pembebanan Terendah Malam TD2

TGL	DATA			
	TEGANGAN	DAYA		ARUS
	KV	P (MW)	Q (MVAR)	A
1	20	16,8	8,1	549
2	20	12,6	10	449
3	20	13,2	10	461
4	20	17	11,7	620
5	20,3	14	7	470
6	20	18,6	9,2	613
7	20	14,2	7,5	467
8	20	17,5	7,1	556
9	20	17,7	10	573
10	20	17,4	7,7	571

3.4 Data Pembenanan Transformator Daya 3

Berikut ini adalah data pembebanan untuk transformator daya 3

3.4.1 Data pembebanan tertinggi siang

Tabel. 3.5 Pembebanan Tertinggi Siang TD 3

TGL	DATA			
	TEGANGAN	DAYA		ARUS
	KV	P (MW)	Q (MVAR)	A
1	20	21,8	7,5	665
2	19,9	23,5	8,3	726
3	20	24	9	751
4	20	21	8,7	666
5	20	16	7	517
6	20	16,9	17,4	589
7	19,7	19,9	9,7	646
8	20	20	9,1	648
9	20	18	9,1	603
10	20	20	6,8	600

3.4.2 Data pembebanan tertinggi malam

Tabel. 3.6 Pembebanan Tertinggi Malam TD 3

TGL	DATA			
	TEGANGAN	DAYA		ARUS
	KV	P (MW)	Q (MVAR)	A
1	19,7	23,9	6,7	708
2	19,6	25,2	8,5	779
3	20	32	11	989
4	20	19	7,7	577
5	20	13,3	9,7	457
6	19,7	25,1	8,7	772
7	19,8	29,6	9,7	900
8	20,2	25	9,4	771
9	20,3	29,3	8,6	876
10	20	24,3	6,7	725

3.4.3 Data pembebanan terendah siang

Tabel. 3.7 Pembebanan Terendah Siang TD 3

TGL	DATA			
	TEGANGAN	DAYA		ARUS
	KV	P (MW)	Q (MVAR)	A
1	20	7,2	6	272
2	20	10,4	5,8	344
3	20,1	14,9	5,7	440
4	20	12,2	6,8	414
5	20	10	8,7	403
6	20	11,2	8,7	333
7	20,1	13,3	5,4	409
8	20	12,6	5,8	553
9	20	16,9	7,6	548
10	20	13,8	6,8	450

3.4.4 Data Pembebanan terendah malam

Tabel. 3.8 Pembebanan Terendah Malam TD 3

TGL	DATA			
	TEGANGAN	DAYA		ARUS
	KV	P (MW)	Q (MVAR)	A
1	20	16	7	510
2	20	12,6	10	397
3	20	13	7,5	407
4	20	10	8,7	403
5	20	16	6,8	466
6	20	16,6	7,3	526
7	20	14,7	4,3	443
8	20	16	7,1	517
9	20	17,8	7,6	544
10	20	17	7,3	526

