

BAB II

PRINSIP DASAR TRANSFORMATOR

2.1 Transformator

Transformator merupakan mesin listrik statis yang berfungsi untuk mentransfer energi listrik dari sisi primer ke sekunder dengan perubahan tegangan pada frekuensi yang sama. Transformator (trafo) merupakan piranti yang mengubah energi listrik dari suatu level tegangan AC lain melalui gandengan magnet berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Transformator terdiri atas dua atau lebih kumparan yang dililitkan pada inti besi bersama. Secara umum kumparan-kumparan trafo tidak terhubung secara langsung melainkan secara elektrik. Satu-satunya hubungan antara kumparan berupa gandengan fluks magnetik yang berada pada inti besi. Transformator di gunakan secara luas baik pada bidang tenaga listrik maupun elektronika. Fungsi transformator dalam sistem tenaga listrik adalah untuk menaikkan atau menurunkan tegangan sehingga daya yang di kirim dari suatu pembangkit tidak mengalami susut daya karena rugi-rugi yang signifikan. Sehingga penggunaan transformator dalam sistem tenaga sangat di perlukan (Widiharso & Sujendro, 2013).



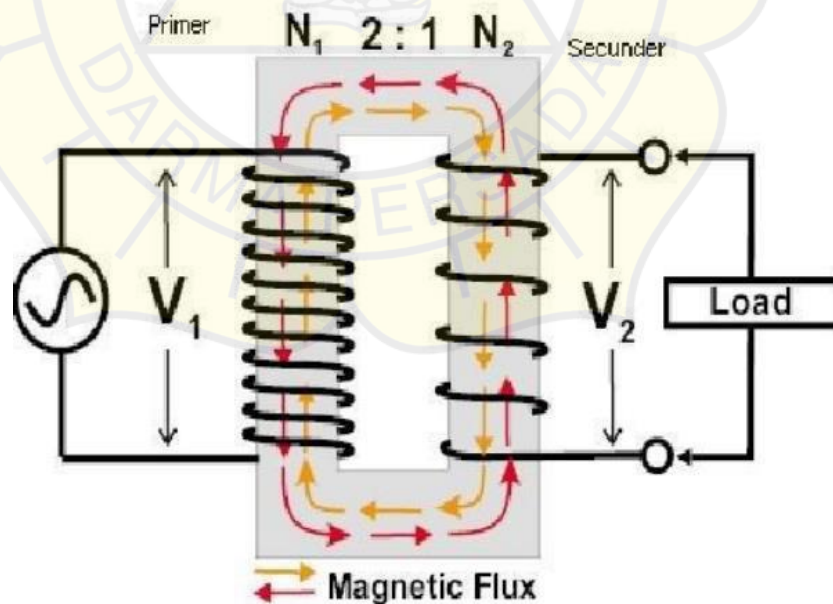
Gambar 2.1 Transformator

Gambar 2.1 menunjukkan contoh trafo distribusi 630 kVA yang sering dipakai oleh PT. PLN (Persero) untuk menyalurkan energi listrik ke pelanggan pada jaringan tegangan rendah. Jenis trafo tersebut jenis trafo pasangan dalam karena lokasinya berada di dalam sebuah bangunan beton.

2.2 Prinsip Kerja Transformator

Transformator bekerja berdasarkan prinsip energi dapat dipindahkan melalui induksi magnetik dari suatu lilitan ke lilitan lain oleh fluks magnetik yang berubah-ubah. Fluks magnetik ini dapat dihasilkan oleh sumber tegangan AC. Kumputan trafo yang terhubung dengan sumber AC disebut kumputan primer, dan kumputan yang menyalurkan tegangan induksi ke beban disebut kumputan sekunder.

Ketika tegangan bolak-balik diterapkan pada kumputan primer, arus bolak-balik akan mengalir pada kumputan. Arus ini memagnetisasi inti, sehingga pada inti timbul fluks magnetik yang nilainya sebanding dengan nilai arus. Karena nilai arus setiap saat berubah-ubah maka besar fluks magnetik juga berubah. Fluks bolak-balik akan mengalir pada rangkaian magnetik (inti besi) menginduksikan tegangan pada kumputan primer dan sekunder (Widiharso & Sujendro, 2013).



Gambar 2.2 Prinsip Kerja Transformator

Dengan mengamati gambar 2.2 didapat persamaan :

$$K = \frac{N_s}{N_p} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\frac{N_p}{I_s} = \frac{V_p}{\dots\dots\dots} = \frac{N_s}{I_p} \dots\dots\dots (2.2)$$

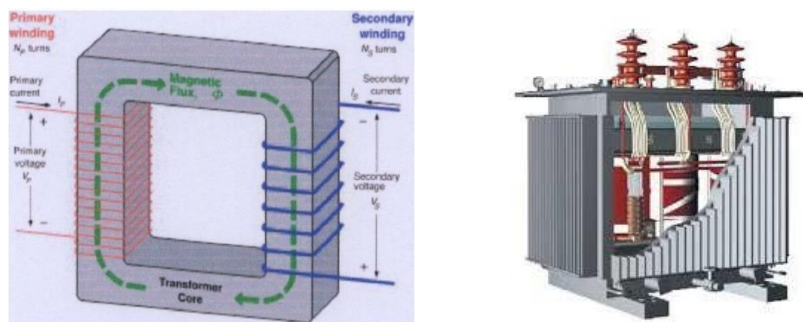
Dimana :

- K = Rasio trafo
 - N_p = Lilitan Primer
 - N_s = Lilitan Sekunder
 - V_p = Tegangan Primer (V)
 - V_s = Tegangan Sekunder (V)
 - I_p = Arus Primer (A)
 - I_s = Arus Sekunder (A)
- (Syahputra Srg et al., 2017)

2.3 Kontruksi Transformator

Transformator memiliki komponen utama, yaitu :

1. Satu atau lebih kumparan terisolasi (insulated winding) yang besaran tegangan primer dan tegangan sekundernya berbeda. Sisi primer terhubung listrik ke sumber (input) dan sukunder terhubung listrik ke beban (output).
2. Inti besi (iron core) yaitu besi ‘lunak’ terisolasi dengan laminasi-laminasi setebal $\pm 0,014$ inci. Bahan inti besi mempunyai permeabilitas magnet besar dan dapat menampung fluks magnet yang besar (Widiharso & Sujendro, 2013).



Gambar 2.3 Inti besi dan belitan dan kontruksi trafo

Berdasarkan gambar di atas adalah konstruksi dan perlengkapan pada transformator :

1. Lilitan dari tembaga berkonduktivitas tinggi. Untuk belitan tegangan menengah (TM) di pakai kawat tembaga berisolasi enamel dan untuk belitan tegangan rendah (TR) di pakai kawat tembaga berisolasi kertas.
2. Sirkuit magnetis di buat dari besi silikon dengan metode penyambungan bersilang dan berlapis dan membentuk rangkaian magnetis tertutup. Hal ini untuk mengurangi rugi-rugi besi, getaran, dan tingkat bising.
3. Bushing Bushing TR untuk arus lebih kecil dari 630 A terbuat dari porselen. Bushing TM terbuat dari dammar sintetis. Untuk arus lebih besar, terbuat dari dammar sintetis dan terminal batang tembaga.
4. Tangki di buat dari baja bersepuh lapisan seng atau baja di canai panas, yang selanjutnya tangki tersebut di semprot pasir dan di cat.
5. Sistem pendinginan untuk transformator distribusi jaringan TM / TR umumnya menggunakan sistem pendingin ONAN (Oil Natural Air Natural). Artinya sirkulasi pendingin minyak trafo secara alamiah dan udara pendingin juga secara alamiah. Sistem pendinginan lainnya yaitu : ONAF (Oil Natural Air Forced) pada transformator daya yaitu dengan menggunakan kipas angin untuk sirkulasi udara pada batas temperatur tertentu, OFAF (Oil Forced Air Forced) terdapat pada unit transformator di sistem pembangkitan. Yaitu dengan menggunakan kipas angin untuk sirkulasi udara pada batas temperatur tertentu yang lebih tinggi.
6. Proteksi transformator Proteksi transformator yaitu peralatan listrik yang berfungsi untuk melindungi transformator motor dari gangguan baik dari luar maupun dari dalam transformator. Peralatan yang biasa di gunakan yaitu rele, fuse dll (PT. PLN (PERSERO), 2014).

2.4 Klasifikasi Transformator

Klasifikasi transformator dapat di bagi menjadi beberapa macam tergantung pada :

1. Letak kumparan
2. Perbandingan transformator

3. Pendingin transformator
4. Jenis fasa dan tegangan
5. Letak lokasi
6. Kegunaan

2.4.1 Letak Kumparan

Berdasarkan kedudukan (letak) kumparan terhadap inti, maka jenis transformator ini ada dua macam, yaitu :

1. Transformator jenis inti
2. Transformator jenis cangkang

2.4.2 Perbandingan Transformator

Yang dimaksud dengan perbandingan transformator adalah perbandingan banyaknya lilitan pada kumparan primer dan sekunder. Misal tegangan yang di terapkan pada sisi primer, maka pada kumparan primer akan mengalir arus. Arus ini akan menginduksikan tegangan pada kumparan primer. Sehingga berdasarkan perbandingan transformator tersebut di kenal dengan (Widiharso & Sujendro, 2013) :

1. Transformator penaik tegangan (step up)

Bila GGL induksi sekunder lebih besar dari GGL induksi primer maka tegangan pada kumparan primer lebih kecil.

2. Transformator penurun tegangan (step down)

Bila GGL induksi sekunder lebih kecil dari GGL induksi primer maka tegangan pada kumparan primer lebih besar.

2.4.3 Pendingin Transformator

Pendingin alam

1. Air Natural Cooling (AN) yaitu pendingin dengan tidak menggunakan apapun bantuan kecuali udara biasa.
2. Oil-Immersed Natural Cooling (ON) yaitu trafo di masukan ke dalam minyak trafo.
3. Oil-Immersed Air Forced Oil Circulation (OFN) yaitu trafo di masukan ke dalam minyak trafo yang di alirkan.

Pendingin buatan (udara)

1. Oil-Immersed Forced Oil Circulation With Air Blash Cooling (OFB) yaitu trafo di masukkan ke dalam minyak trafo yang di alirkan di tambah dengan udara yang di hembuskan.
2. Oil-Immersed Air Blash Cooling (OB) yaitu trafo di masukkan ke dalam minyak trafo di tambah dengan udara yang di hembuskan.
3. Air Blash Cooling (OB) yaitu pendingin dengan udara yang di hembuskan.

Pendingin buatan

1. Oil-Immersed water cooling (OW) yaitu trafo di masukkan ke dalam minyak dan pendingin di bantu dengan air.
2. Oil-Immersed forced oil circulation with water cooling (OFW) yaitu trafo di masukkan ke dalam minyak trafo yang di alirkan di tambah dengan bantuan air sebagai pendingin (PT. PLN (PERSERO), 2014).

2.4.4 Letak Lokasi

1. Dalam ruangan
Terletak di dalam suatu ruangan seperti pada gardu-gardu listrik yang berstruktur beton.
2. Luar ruangan
Terletak di luar ruangan yang berstruktur seperti tiang besi
(PT. PLN (PERSERO), 2014)..

2.4.5 Kegunaan Transformator

1. Transformator generator
Jenis trafo ini terdapat di pembangkit untuk menaikkan tegangan generator menjadi lebih tinggi untuk keperluan transmisi daya listrik.
2. Transformator gardu induk
Jenis trafo ini terdapat di gardu induk (GI) untuk menurunkan tegangan suatu sistem transmisi ke suatu harga tegangan menengah untuk keperluan distribusi.
3. Transformator Distribusi

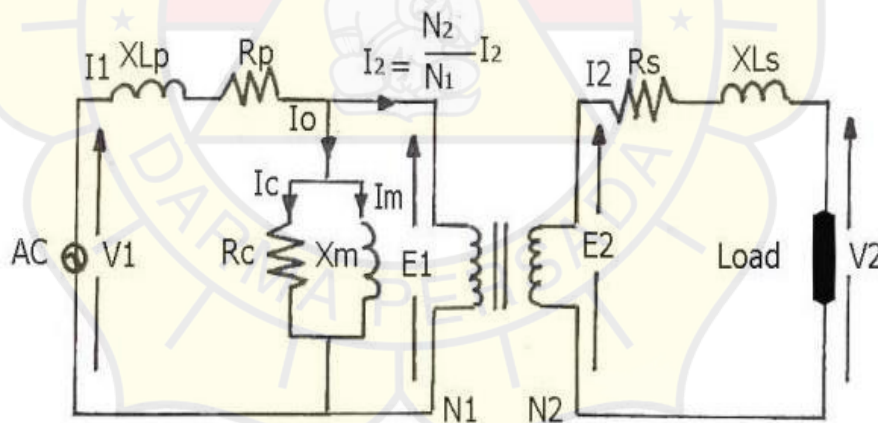
Digunakan untuk menurunkan tegangan menengah ke tegangan rendah untuk keperluan distribusi dan pemakaian.

4. Transformator pengukuran

Transformator yang di gunakan untuk keperluan pengukuran listrik (PT. PLN (PERSERO), 2014).

2.5 Rangkaian Ekivalen Transformator

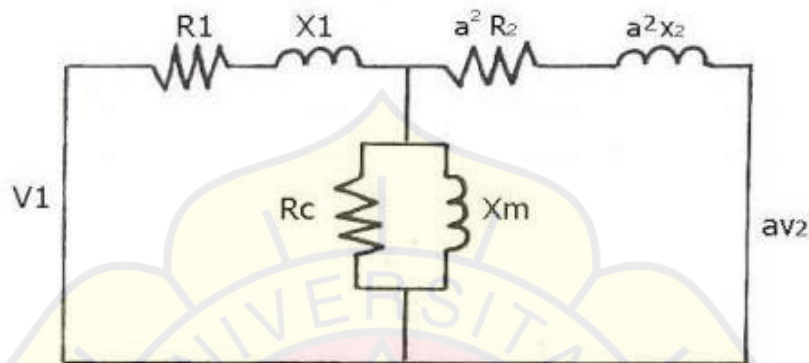
Untuk menganalisis kerja suatu transformator, di gunakan model rangkaian (rangkaiannya ekivalen). Pada transformator, tidak seluruh fluks (Φ) yang di hasilkan oleh arus magnetisasi merupakan fluks bersama. Sebagian darinya hanya mencakup kumparan primer (Φ_1) atau kumparan sekunder (Φ_2) saja dan merupakan fluks bocor. Adanya fluks bocor (Φ_1) dan (Φ_2) di tunjukkan sebagai reaktansi X_{LP} dan X_{LS} . Sementara rugi tembaga di tunjukkan dengan R_P dan R_S . Rangkaian ekivalen trafo di perlihatkan pada gambar (Widiharso & Sujendro, 2013).



Gambar 2.4 Rangkaian Ekivalen Transformator

$$V_1 = a^2 I_2 Z_L + a^2 I_2 R_2 + a^2 I_2 X_2$$

Persamaan terakhir mengandung pengertian, apabila parameter rangkaian sekundernya dinyatakan dalam harganya perlu dikalikan dengan faktor a^2 (Widiharso & Sujendro, 2013).



Gambar 2.6 Rangkaian Penganti Transformator

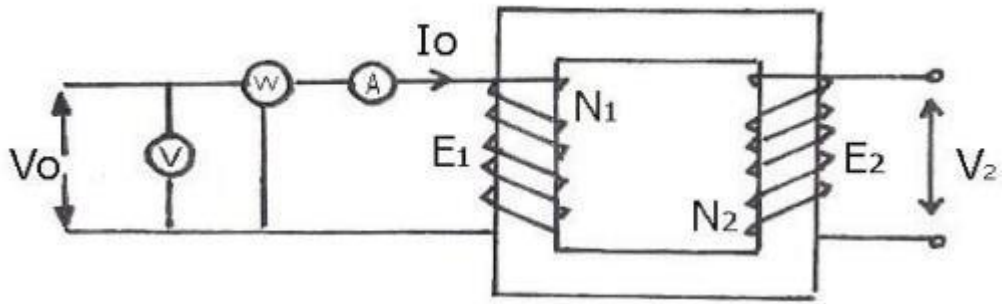
Untuk mencari parameter transformator, di dapat dari pengujian tanpa beban dan hubung singkat (Pabla & Hadi, 1994).

2.6 Pengujian Pada Transformator

Parameter trafo pada rangkaian ekivalen (R_c , X_m , dan X_{ek}) dapat ditentukan besarnya dengan dua pengujian : pengujian rangkaian terbuka tanpa beban (open circuit / no load test) dan pengujian hubung singkat (short circuit test) (Pabla & Hadi, 1994).

2.6.1 Pengujian Beban Nol

Pada pengujian tanpa beban, sisi sekunder trafo di hubung buka (tidak dibebani). Rangkaian pengujian di tunjukkan pada gambar. Tegangan masukan di berikan pada sisi primer sesuai dengan rating trafo, kemudian tegangan, arus dan daya masukan di ukur. Pada kondisi tanpa beban, semua arus input akan mengalir melalui cabang eksitasi (rangkaiannya inti) (Pabla & Hadi, 1994).

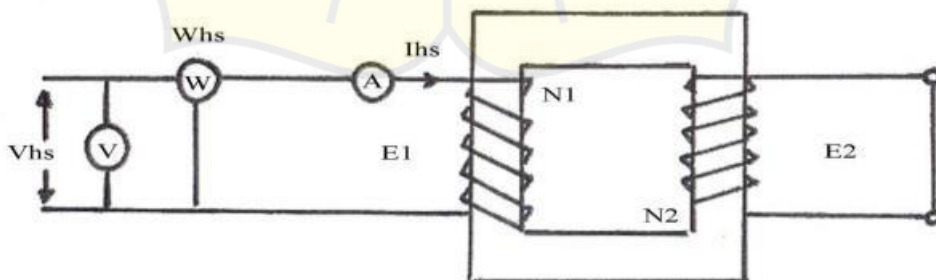


Gambar 2.8 Rangkaian Pengujian Tanpa beban

Elemen seri dan adalah sangat kecil disbanding nilai dan, sehingga tegangan dari pengukuran tanpa beban dapat di ketahui nilai (Widiharso & Sujendro, 2013).

2.6.2 Pengujian Hubung Singkat

Pada pengujian hubung singkat ,sisi sekunder trafo di hubung singkat, sementara sisi primer di hubungkan dengan sumber tegangan yang nilainya rendah. Tegangan masukan di atur hingga arus pada kumparan sama dengan nilai rating. Kemudian nilai tegangan, arus dan daya input di ukur. Oleh karena tegangan masukan pada pengujian hubung singkat cukup rendah maka arus yang mengalir pada cabang eksitasi (inti) dapat diabaikan. Arus hanya di batasi impedansi seri $Z_{ek} = R_{ek} + j X_{ek}$, sehingga dari hasil pengukuran dapat dihitung parameter (Widiharso & Sujendro, 2013).



Gambar 2.9 Rangkaian Pengujian Hubung Singkat

2.7 Transformator Tiga Fasa

Hampir semua sistem pembangkitan dan distribusi daya listrik adalah menggunakan sistem tiga fasa. Oleh karena pentingnya sistem tiga fasa maka kita perlu memahami bagaimana aplikasi trafo tiga fasa. Trafo tiga fasa dapat disusun dengan dua cara. Cara yang pertama adalah menyusun tiga buah trafo satu fasa dan menghubungkannya menjadi trafo tiga fasa. Cara yang kedua adalah dengan membuat sebuah trafo tiga fasa yang terdiri dari tiga set lilitan pada satu inti. Konstruksi satu trafo tiga fasa adalah lebih praktis karena lebih murah, lebih efisien dan tidak memakan tempat. Sementara kelebihan tiga trafo satu fasa adalah jika salah satu rusak, maka yang lain masih dapat di gunakan. Perhitungan atau analisa trafo tiga fasa di lakukan per fasa, dengan cara sama dengan perhitungan pada trafo satu fasa (Widiharso & Sujendro, 2013).

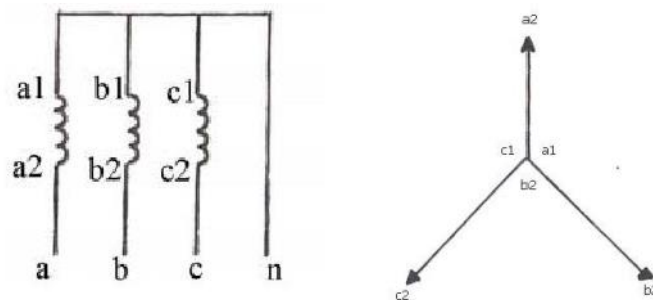
2.7.1 Hubungan Transformator Tiga fasa

Sebuah trafo tiga fasa terdiri atas tiga trafo apakah ia terpisah atau tergabung dalam satu inti. Sisi primer dan sekunder trafo tiga fasa dapat di hubungkan. Hubungan belitan yang dapat di bentuk pada primer dan sekunder :

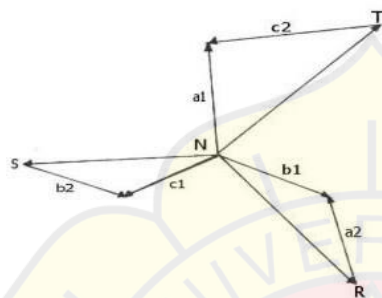
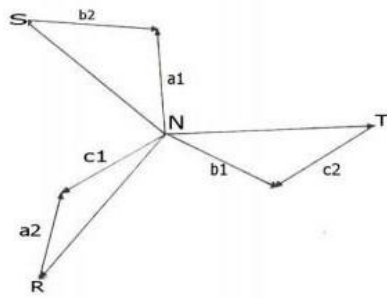
1. Primer \rightarrow Y (bintang / wye) atau D (segitiga / delta)
2. Sekunder \rightarrow Y (bintang / wye) atau D (segitiga / delta) atau Z (Zigzag) jika belitan sekunder mempunyai dua belitan Identik (Widiharso & Sujendro, 2013).

2.7.2 Hubung Y (wye)

Gambar di bawah ini menggambarkan hubungan Y dan diagram vektor dari transformator 3 fasa hubungan bintang (Y) (Widiharso & Sujendro, 2013).

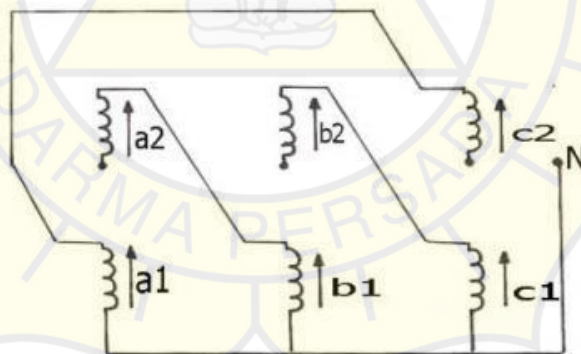


Gambar 2.10 Hubung Y pada Transformator



Gambar 2.12 (b) Diagram Vektor Hubungan Z ke kanan dan kiri.

Diagram pengawatan belitan sekunder yang di hubungkan zig-zag ke kiri beserta diagram vektor.



Gambar 2.13 Hubungan Z ke kiri pada Transformator

2.8 Efisiensi Transformator

Trafo (Transformator) yang ideal adalah Trafo yang memiliki 100% efisiensi yaitu trafo yang tidak terjadi kehilangan daya sama sekali. Namun Trafo yang ideal atau yang sempurna ini hampir dapat dikatakan tidak mungkin akan tercapai, hal ini dikarenakan adanya beberapa faktor yang menyebabkan terjadi kerugian atau kehilangan daya. Faktor-faktor tersebut diantaranya adalah faktor yang disebabkan oleh Inti Besi yang biasanya disebut dengan *Core Loss* atau *Iron Loss* dan faktor yang disebabkan oleh Kumputan atau lilitan pada Trafo itu sendiri yang biasanya disebut dengan *Copper loss* (Pabla & Hadi, 1994).

2.8.1 Rugi – rugi Transformator

Rugi-rugi pada transformator terdiri atas rugi-rugi inti besi (P_i) dan rugi-rugi tembaga (P_{Cu}). Penentuan efisiensi dapat dilakukan dengan mengetahui rugi-rugi inti besi (P_i) dari percobaan beban nol dan rugi-rugi tembaga (P_{Cu}) dari percobaan beban penuh.

Rugi tembaga P_{Cu} : merupakan rugi yang disebabkan oleh arus beban yang mengalir pada kawat tembaga. Karena arus beban berubah-ubah, maka rugi tembaga juga berubah-ubah mengikuti beban (Pabla & Hadi, 1994).

$$P_{Cu} = I^2 \cdot R \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan :

P_{Cu} : Rugi

Tembaga. I^2 : Arus.

R :

Hambatan. Atau

$$p\omega_1 = \left(\frac{s_1}{s} \right)^2 \times pk \dots\dots\dots (2.4)$$

$p\omega$: Rugi – Rugi

Tembaga. S_1 : Daya semu.

S : Daya Transformator.

pk : Rugi - Rugi berbeban.

Rugi besi P_i : terdiri terdiri atas rugi histerisis merupakan rugi yang disebabkan oleh fluks bolak balik pada inti besi : $P_h = Kh f B_{maks}$ dan Rugi arus eddy yaitu rugi yang disebabkan oleh adanya arus pusar pada inti besi yang besarnya dinyatakan dengan $P_e = K_{ef} f^2 B_{maks}^2$, Sehingga rugi-rugi total besi : $P_i = P_h + P_e$ yang konstan, walaupun bebannya berubah-ubah.

2.8.2 Daya pada transformator

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 nyata merupakan daya listrik yang digunakan untuk keperluan menggerakkan mesin-mesin listrik atau peralatan lainnya, satuannya adalah Watt (W) (Pabla & Hadi, 1994).

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \phi \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana :

P = Daya Aktif (W)

V = Tegangan (V)

I = Arus (A)

Cos phi = Faktor daya

$\sqrt{3}$ = Tiga fasa

2. Daya reaktif (Q) merupakan selisih antara daya semu yang masuk pada penghantar dengan daya aktif pada penghantar itu sendiri, dimana daya ini terpakai untuk daya mekanik dan panas. Daya reaktif ini adalah hasil kali antara besarnya arus dan tegangan yang dipengaruhi oleh faktor daya, satuannya adalah Volt Ampere Reaktif (VAR) (Pabla & Hadi, 1994).

$$Q = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \sin \phi \dots\dots\dots(2.6)$$

Dimana :

Q = Daya Reaktif (VAR)

V = Tegangan (V)

I = Arus (A)

Sin phi = Faktor daya

$\sqrt{3}$ = Tiga fasa

3. Daya semu (S) merupakan daya listrik yang melalui suatu penghantar transmisi atau distribusi. Daya ini merupakan hasil perkalian antara tegangan dan arus yang melalui penghantar yang memiliki satuan Volt Ampere (VA). Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar sistem segitiga daya berikut ini (Pabla & Hadi, 1994):

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana :

S = Daya Semu (VA)

V = Tegangan (V)

I = Arus (A)

$\sqrt{3}$ = Tiga fasa

2.8.3 Efisiensi

Efisiensi Trafo dapat didefinisikan sebagai Perbandingan antara daya listrikkeluaran (Pout) dengan daya listrik masukan (Pin). Efisiensi Trafo dapat dirumuskan dengan Rumus berikut ini (Pabla & Hadi, 1994) :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100\% \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana :

η : Efisiensi Trafo

Pout : Daya listrik Keluaran (Output) atau Daya pada Kumbaran Sekunder

Pin : Daya listrik Masukan (Input) atau Daya pada Kumbaran Primer

Rumus-rumus turunan untuk Efisiensi Trafo lainnya :

$$\eta = \frac{V_s \cdot I_s}{V_p \cdot I_p} \cdot 100\% \dots\dots\dots (2.9)$$

atau

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \text{Copper loss} + \text{Core loss}} \cdot 100\% \dots\dots\dots (2.10)$$

atau

$$\eta = \frac{P_{in} - \text{losses}}{P_{in}} \cdot 100\% \dots\dots\dots (2.11)$$

atau

$$\eta = \frac{N_s \cdot I_s}{N_p \cdot I_p} \cdot 100\% \dots\dots\dots (2.12)$$

Dimana :

η : Efisiensi Trafo

V_s : Tegangan Sekunder

V_p : Tegangan Primer

I_s : Arus Sekunder

I_p : Arus Primer

N_s : Lilitan sekunder

N_p : Lilitan primer

2.8.4 Efisiensi transformator sepanjang hari

Pembebanan transformator sepanjang hari perlu diperhatikan untuk dibebani pada titik efisiensi maksimumnya. Namun demikian, ini sulit dicapai karena ternyata pengoperasian transformator didasarkan pada permintaan dari beban. Namun demikian efisiensi harian transformator dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (5) seperti berikut ini (Palaloi & Yudha, 2009).

$$\eta = \frac{E_{out}}{E_{out} + E_{losses}} \cdot 100\% \dots\dots\dots (2.13)$$

Dimana :

η = Efisiensi (%)

E_{out} = Energi yang keluar dari sisi sekunder (kWh)

E_{losses} = Energi yang hilang pada proses transformasi (kWh).