

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Berdasarkan topik skripsi yang diambil, terdapat beberapa referensi dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya guna menentukan batasan – batasan masalah yang berkaitan erat dengan topik yang sedang diambil. Referensi-referensi ini kemudian akan digunakan untuk mempertimbangkan permasalahan-permasalahan apa saja yang berhubungan dengan topik yang diambil. Adapun beberapa referensinya adalah sebagai berikut:

Penelitian yang dilakukan oleh Galang Candra Utama (2017) yang berjudul “Analisis Rugi-Rugi Daya Pada Transformator Distribusi 3-Fasa di PT.Trafoindo Prima Perkasa”. Dalam penelitian ini membahas rugi-rugi daya pada transformator 3-fasa kapasitas 2000 VA, tipe *winding* Cu-Cu, Vektor Group Dyn5.

Penelitian yang dilakukan oleh Muhammad Shokibul Kahfi (2014) yang berjudul “Aplikasi *Core Amorphous* Pada Transformator Distribusi 3 Fasa Kapasitas 100 kVA Tegangan 20 kV-400V *Vektor Group Yzn-5* Tipe *Winding Al-Al*”. Dalam penelitian ini membahas penggunaan inti besi *Amorphous* dimana inti besi jenis *Amorphous* dapat mempengaruhi besar rugi-rugi daya dan dimensi transformator.

Penelitian yang dilakukan oleh Frengki Eka Putra Surusa (2011) yang berjudul “Perhitungan Rugi-Rugi Daya Pada Trafo Distribusi Akibat Ketidakseimbangan Beban di Gardu 60 Jalan Panjaitan Kota Gorontalo”. Dalam penelitian ini membahas rugi-rugi daya yang terjadi pada trafo semakin membesar akibat dari beban yang tidak seimbang.

Penelitian yang dilakukan oleh Rizky Ferdinan (2014) yang berjudul “Analisa Pemilihan Trafo Distribusi Berdasarkan Biaya Rugi-Rugi Daya Dengan Metode Nilai Tahunan”. Dalam penelitian ini membahas perhitungan biaya rugi daya berbeban dan tidak berbeban.

Penelitian yang dilakukan oleh Ahmad Charis Badarudin (2013) yang berjudul “Analisa Perbandingan Tipe Winding Cu-Cu Dengan Tipe Al-Al Pada Transformator Distribusi 3 Fasa Kapasitas 630 kVA Tegangan 20 kV – 400 V Vektor Grup Dyn-5”. Dalam penelitian ini membahas perbedaan-perbedaan pada kedua tipe transformator dari segi elektris, mekanis, maupun harga jual.

Penelitian yang dilakukan oleh Djenny Latif (2015) yang berjudul “Analisa Perhitungan Rugi Besi Pada Transformator Distribusi”. Dalam penelitian ini membahas cara menentukan rugi-rugi besi pada sebuah transformator.

2.2. Pengertian Transformator

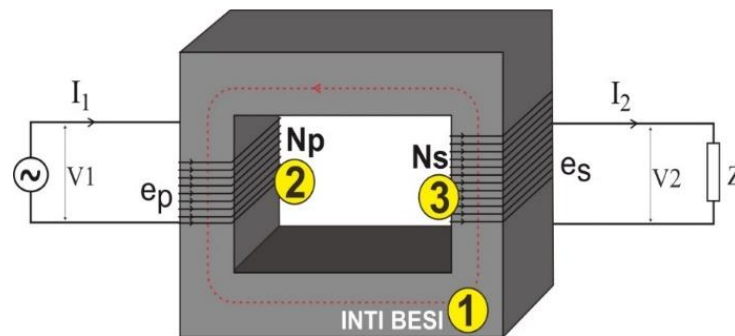
Transformator atau trafo adalah alat listrik yang dapat memindahkan energi listrik dan mengubah energi listrik arus bolak-balik dari satu level tegangan ke level tegangan lainnya dengan frekuensi yang sama melalui kinerja gandengan magnet yang berdasarkan prinsip induksi elektromagnet. Induksi elektro magnet yang terjadi dalam sebuah transformator karena adanya inti besi yang dikelilingi lilitan/kumparan dan dialiri arus listrik sehingga menimbulkan induksi elektromagnet. Kerja transformator yang berdasarkan induksi elektromagnet menghendaki adanya gandengan magnet antara rangkaian primer dan rangkaian sekunder.

Bila kumparan primer di hubungkan dengan sumber arus bolak-balik/*alternating current* (AC) yang amplitudonya bergantung pada tegangan primer dan jumlah lilitan, fluks bersama akan menghubungkan ke kumparan sekunder dan akan menginduksi tegangan di dalamnya yang nilainya tergantung pada jumlah lilitan sekunder. Dengan pertimbangan jumlah lilitan primer dan sekunder yang tepat, hampir semua perbandingan tegangan yang di inginkan atau perbandingan transformasi (*ratio of transformer*) dapat di peroleh.

Transformator bekerja dengan menghendaki adanya fluks bersama bolak-balik yang menghubungkan kedua kumparan (primer dan sekunder) dan hanya menggunakan konsep induktansi bersama. Hal semacam ini akan di peroleh pula bila di gunakan inti udara, tetapi akan lebih efektif bila di gunakan inti besi (*core*) atau bahan ferromagnetik lainnya. Karena sebagian besar fluks akan berkurang

dalam jalan tertentu yang menghubungkan kedua kumparan dan juga mempunyai permeabilitas yang jauh lebih besar dari pada udara. Transformator jenis ini biasanya di sebut dengan transformator berinti besi.

Inti besi yang ada di dalam sebuah transformator berupa lempengan besi tipis yang berisolasi dan disusun menjadi satu. Susunan lempengan besi tersebut lalu di beri lilitan/kumparan pada kedua sisinya. Untuk lebih jelasnya dapat melihat rangkaian dasar transformator seperti pada gambar 2.1.



Gambar 2.1. Rangkaian Transformator

Keterangan: 1) Inti besi, 2) Kumparan primer, 3) Kumparan sekunder

2.3. Bagian - Bagian Transformator

2.3.1. Bagian Utama

2.3.1.1. Inti Besi

Inti besi dalam sebuah transformator sering disebut dengan *core*. Inti besi ini berfungsi untuk mempermudah jalan fluks, yang di timbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Inti besi terbuat dari *steel lamination sheet* atau lembaran besi tipis yang berisolasi yang membentuk suatu rangkaian magnetik tertutup dan di rancang dengan rugi-rugi yang rendah. Inti besi ini ada didalam transformator dan dikelilingi oleh kumparan konduktor.

2.3.1.2. Kumparan atau Coil

Kumparan merupakan konduktor yang terdiri dari lilitan primer dan lilitan sekunder. Beberapa lilitan kawat berisolasi membentuk suatu kumparan. Kumparan tersebut di isolasi baik terhadap inti besi maupun

terhadap kumparan lain dengan isolasi padat seperti *kraft paper*, *pressboard*, *nomex*, *polyglass* dan lain-lain. Pada kumparan akan terjadi fluks bila kumparan primer di hubungkan dengan tegangan arus bolak-balik lalu menginduksi tegangan sekunder dan bila pada rangkaian sekunder di tutup (rangkaian berbeban) maka akan mengalir arus pada kumparan. Kontruksi kumparan harus mempunyai kekuatan dielektrik dan mekanik yang kuat untuk kontinuitas produktifitas kerja transformator saat beroperasi. Selain itu juga di sediakan celah-celah minyak (*gap*) untuk memperlancar sirkulasi minyak transformator kedalam kumparan.

2.3.1.3.Minyak Transformator

Minyak/*oil* berfungsi sebagai media pendingin pada saat transformator beroperasi. Minyak tersebut memindahkan panas (sirkulasi) dan bersifat pula sebagai isolasi (daya tegangan tembus tinggi). Tidak semua transformator menggunakan minyak sebagai media pendinginnya, karena pada transformator tipe kering / *dry* media pendinginannya hanya menggunakan udara.

2.3.1.4.Terminal

Terminal berfungsi sebagai media untuk menghubungkan kumparan di dalam transformator ke jaringan luar baik sisi *incoming* maupun *out going*. Hubungan antara kumparan transformator (bagian dalam transformator) ke jaringan luar melalui sebuah terminal yang di sebut sebagai *post insulator*. Bahannya terdiri dari konduktor (tembaga) yang diselubungi oleh isolator, yang sekaligus berfungsi sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan *fixing part* transformator.

2.3.1.5.Tangki Transformator

Berfungsi sebagai tempat (wadah) dari bagian inti trafo yang di isi minyak transformator serta sebagai tempat bagian-bagian pelengkap lainnya.

2.3.2. Bagian Peralatan Bantu

2.3.2.1. Tap changer

Berfungsi untuk merubah tegangan sadapan untuk mendapatkan tegangan operasi pada sisi tegangan rendah yang dikehendaki. Penggunaan tap changer ini untuk mengantisipasi terjadinya ketidakstabilan pada sisi tegangan tinggi yang berubah-ubah.

2.3.2.2. Pendingin

Media yang di gunakan pada sistem pendingin transformator dapat berupa udara/gas atau minyak. Sistem pengaliran sirkulasi di bagi menjadi:

1) Udara Alamiah (*Air Natural - AN*)

Menggunakan sirkulasi udara sekitar tanpa adanya bantuan alat khusus.

2) Udara tekanan (*Air Forced – ANAF*)

Untuk membantu mempercepat proses perpindahan panas, media pendingin di dorong oleh tekanan. Sirkulasi perpindahan panas berlangsung alami sedangkan sirkulasi udaranya menggunakan alat seperti kipas angin khusus transformator.

3) Oli dan alamiah (*Oil Natural Air Natural*)

Sistem pendingin ini menggunakan sirkulasi minyak dan sirkulasi udara secara alamiah. Sirkulasi minyak yang terjadi disebabkan oleh perbedaan berat jenis antara minyak yang dingin dengan minyak yang panas.

4) Oli tekanan / paksaan (*Oil Natural Air Forced*)

Sistem pendingin ini menggunakan sirkulasi minyak secara alami namun sirkulasi udaranya secara buatan yaitu dengan menggunakan hembusan kipas yang digerakkan oleh sebuah motor.

5) Kombinasi antara alamiah dan paksa (*ONAN/ONAF*)

Sistem pendingin ini menggunakan sirkulasi minyak secara alami namun sirkulasi udaranya secara buatan yaitu dengan menggunakan hembusan kipas angin yang digerakkan oleh sebuah motor listrik. Pada umumnya operasi transformator dimulai dengan ONAN atau

dengan ONAF tetapi hanya sebagian kipas yang berputar. Apabila suhu transformator sudah semakin meningkat maka kipas yang lainnya akan berputar secara bertahap.

6) Oli dan udara paksaan (*Oil Force Air Force*)

Pada sistem pendingin ini sirkulasi minyak digerakkan oleh pompa, sedangkan sirkulasi udaranya menggunakan kipas.

2.3.2.3. Bushing

Bushing yaitu sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator, yang sekaligus berfungsi sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan tangki transformator.

2.3.2.4. Indikator-Indikator

Berfungsi sebagai pembacaan tolak ukur atau indikasi level minyak, suhu minyak dan tekanan pada saat transformator beroperasi.

2.3.2.5. DMCR (*Detection, Measurement, Control Relay*)

Perangkat DMCR ini merupakan peralatan bantu tambahan yang berfungsi sebagai proteksi atau pengaman transformator. Prinsip kerjanya yaitu untuk memutus tegangan sehingga transformator akan otomatis mati / *turn off* ketika terdeteksi *overheat* pada *winding* , tekanan berlebih pada oli transformator, atau level cairan dielektrik (*oil*) terdeteksi *low*.

2.4. Jenis Transformator

2.4.1. Berdasarkan Fungsinya

1. Transformator sebagai penaik tegangan (*Step Up*)

Di gunakan untuk menaikkan tegangan sesuai dengan kebutuhan.

2. Transformator sebagai penarik tegangan (*Step Down*)

Di gunakan untuk menurunkan tegangan sesuai dengan kebutuhan

2.4.2. Berdasarkan Pemakaian

1. Transformator Pengukuran (*Instrument Transformers*)

a) Transformator Tegangan (*Potential Transformers*)

Transformator tegangan sebagai instrumen step down yang efektif dan aman di gunakan untuk operasi instrumen seperti ampere meter, volt meter, watt meter, dan relay yang di gunakan untuk proteksi.

b) Transformator Arus (*Current Transformers*)

Transformator arus untuk menurunkan arus dan di gunakan pada peralatan atau instrumen seperti pada penggunaan transformator tegangan.

2. Transformator Tenaga (*Power Transformers*)

Transformator dengan daya yang besar dan tegangan tinggi (> 36 kV), biasanya di pasang dari sistem pembangkit ke jaringan transmisi.

3. Transformator Distribusi (*Distribution Transformers*)

Dengan daya < 3000 kVA dengan kelas tegangan < 36 kV dan umumnya di gunakan pada sistem jaringan distribusi.

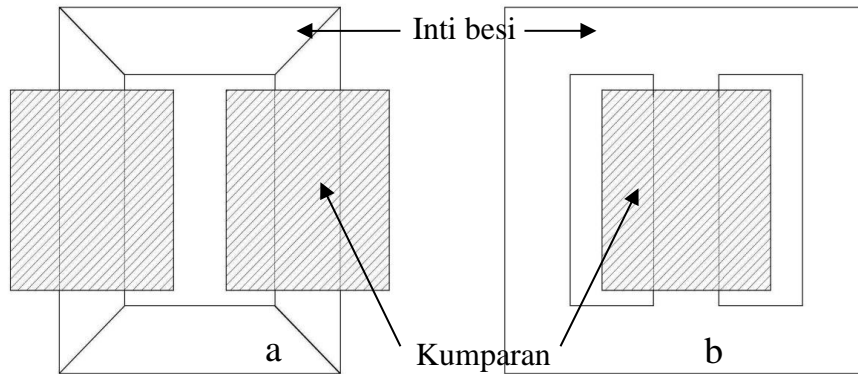
2.4.3. Berdasarkan Letak Kumparan

1. Jenis Inti (*Core Type*)

Transformator jenis inti yaitu kumparan konduktornya mengelilingi inti besi. Pada transformator jenis ini (*core type*) terdapat dua kaki atau lebih. Inti besi transformator dan masing-masing kaki di belit oleh kumparan, sehingga kumparan mengelilingi inti besi transformator. Jenis inti lebih banyak di gunakan dalam pembuatan transformator (*gambar 2.2.a*).

2. Jenis Cangkang (*Shell Type*)

Transformator jenis cangkang yaitu inti besi mengelilingi kumparan konduktornya. Untuk transformator jenis ini mempunyai tiga buah kaki, dimana kaki yang tengah-tengah di belit atau di kelilingi oleh dua kumparan transformator, yaitu kumparan primer dan sekunder. Sehingga kedua kaki yang lain mengelilingi kumparan (*gambar 2.2.b*).



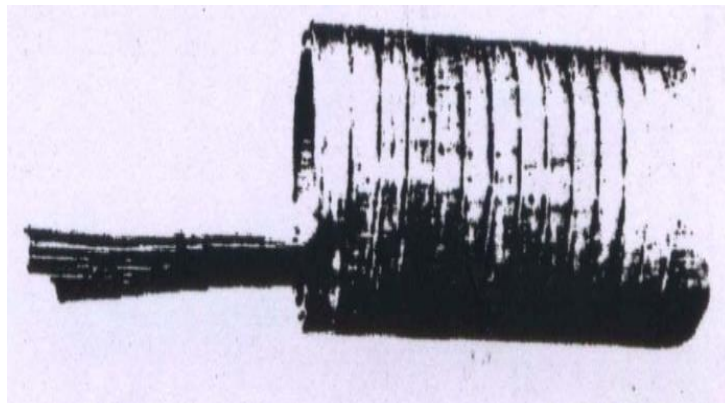
Gambar 2.2. Kontruksi Transformator Jenis Inti (a) dan Jenis Cangkang (b)

2.5. Jenis Kumparan

Pada umumnya ada empat jenis kumparan yang di gunakan pada inti transformator, diantaranya adalah sebagai berikut :

2.5.1. Kumparan Silinder

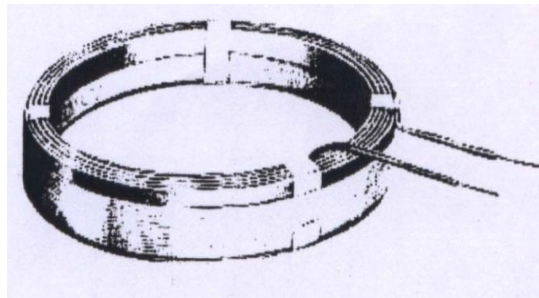
Konduktor penampang berbentuk segi empat atau lembaran di gunakan untuk kumparan tegangan rendah, dimana terdapat lilitan dalam satu lapis atau dua lapis (*double layer*). Lapisan-lapisan tersebut dapat di pisahkan oleh saluran minyak sebagai pendingin dan kertas sebagai isolasi. Kumparan ini di gunakan pada tegangan 6 kV dan arus di atas 100 A. Dari sisi mekanis dari belitan jenis ini cukup rendah.



Gambar 2.3. Kumparan Jenis Silinder Berpenampang Konduktor Segi Empat

2.5.2. Kumparan *Crossover*

Kumparan jenis ini biasanya di gunakan pada kumparan tegangan tinggi transformator distribusi dengan arus sekitar 20 A. Kawatnya mempunyai tambahan isolasi kertas. Suatu kumparan yang lengkap terdiri dari beberapa belitan yang di hubungkan seri dan tiap belitan terdiri dari beberapa lapis.



Gambar 2.4. Kumparan Jenis *Crossover*

2.5.3. Kumparan *Continuous Disc*

Transformator yang dibuat pada era ini pada umumnya banyak yang menggunakan jenis kumparan ini, dengan kapasitas sampai 200 kVA, dan daya tiap kakinya mencapai 10 MVA. Kumparannya di lilit pada suatu silinder berisolasi yang terbuat dari bakelit atau kertas isolasi yang di padatkan (*press board*). Antara belitan yang satu dengan yang lainnya dalam satu kumparan di pisahkan oleh perenggang kertas isolasi yang di padatkan. Sedangkan antara kumparan tegangan rendah dan tegangan tinggi di pisahkan oleh jalur tegak dari kertas isolasi yang di padatkan (*press board*), yang mempunyai saluran minyak yang tegak pula.

2.5.4. Kumparan Helikal

Kumparan jenis ini di gunakan pada transformator dengan arus yang besar dan jumlah lilitan yang sedikit. Jadi terdapat pada transformator dengan kapasitas yang besar pada kumparan tegangan rendahnya. *Output* kumparannya berkisar antara 50 kVA sampai dengan 10 MVA tiap kakinya, pada tegangan 230 V-33 kV. Biasanya kumparan tipe ini menggunakan konduktor berpenampang segi empat. Kumparan dapat di lihat langsung atau dapat di pisahkan oleh suatu perenggang yang mana di lengkapi dengan saluran minyak.

2.6. Bahan Penghantar

Fungsi penghantar dalam sistem tenaga listrik adalah untuk menyalurkan energi listrik dari suatu titik ke titik lain.

2.6.1. Jenis-jenis Bahan Penghantar

Jenis-jenis bahan penghantar yang umum di pakai di antaranya adalah aluminium dan tembaga. Seperti (*tabel 2.1*) di bawah ini adalah karakteristik masing-masing bahan penghantar. Dari tabel karakteristik bahan penghantar, nilai daya hantar listrik untuk aluminium ($Al = 35 \text{ m/ohm.mm}^2$) dan tembaga ($Cu = 57 \text{ ohm.mm}^2/\text{m}$) lebih baik dari pada yang bahan-bahan penghantar yang lain. Oleh karena itu bahan penghantar tersebut lebih banyak di pilih sebagai bahan kumparan transformator.

Tabel 2.1. Karakteristik Bahan-Bahan Penghantar

| Karakteristik | Bahan Pengantar | |
|---------------------|--|--|
| | Aluminium (Al) | Tembaga (Cu) |
| Berat jenis | $2.7 \text{ g/cm}^3, \approx 1.4 \times 10^{-5}$ | $8.89 \text{ g/cm}^3, \text{ suhu } 20 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| Daya hantar listrik | $35 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ | $57 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ |
| Kekuatan Tarik | 9 kg/mm^2 | $20\text{-}40 \text{ kg/mm}^2$ |
| Tahanan jenis | $0.0035 \times 10^{-3} \text{ } \Omega\text{m}$ | $0.0021 \times 10^{-3} \text{ } \Omega\text{m}$ |
| Titik leleh | $< 658 \text{ }^\circ\text{C}$ | $1083 \text{ }^\circ\text{C}$ |

2.6.2. Jenis Bahan Kumparan Transformator

2.6.2.1. Aluminium

Pada jenis bahan aluminium ada tiga jenis tipe jika di lihat dari bentuknya yaitu tipe flat, tipe sheet dan tipe pvf.

- 1) Flat, yaitu penampang penghantar berbentuk persegi panjang yang di lapiasi fiber sebagai isolasinya.
- 2) Sheet, yaitu penghantar berbentuk lembaran-lembaran yang mempunyai ketebalan dan ketinggian yang bervariasi.
- 3) Pvf, yaitu penampang penghantar berbentuk bulat / silinder yang di lapiasi *enameled* sebagai isolasinya.

2.6.2.2 Tembaga

Penggunaan kumparan jenis tembaga paling banyak di gunakan pada kumparan transformator karena nilai daya hantar listriknya lebih besar dari aluminum. Ada 3 (tiga) jenis tipe jika di lihat dari bentuknya yaitu :

- 1) Flat, yaitu penampang penghantar berbentuk persegi panjang yang di lapiisi fiber sebagai isolasinya.
- 2) PEW, yaitu penampang penghantar berbentuk bulat / silinder yang di lapiisi *ennamelled* sebagai isolasinya.
- 3) Sheet, yaitu penghantar berbentuk lembaran-lembaran yang mempunyai ketebalan dan lebar yang bervariasi.

2.7. Kelompok Hubungan

Pada transformator 3 fasa, arah dan tegangan akan menimbulkan perbedaan fasa. Arah dan besar perbedaan fasa tersebut mengakibatkan adanya berbagai kelompok hubungan pada transformator. Ada tiga macam kelompok hubungan/ *connection* dalam transformator 3 fasa yaitu:

2.7.1. Hubungan Bintang

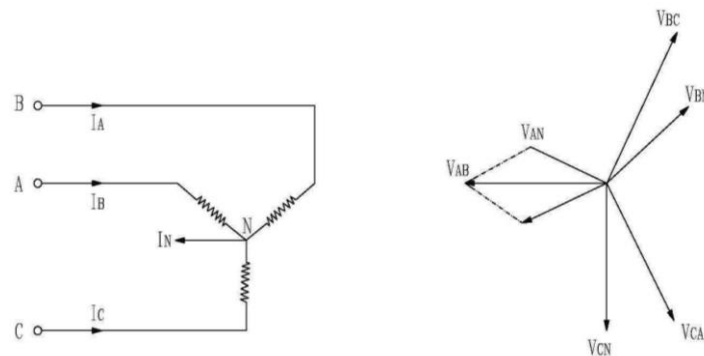
Pada hubungan bintang tiga ujung bersamaan dari ketiga kumparan dihubungkan pada apa yang dinamakan titik bintang. Titik dimana ujung-ujung lilitan tersebut disatukan merupakan titik netral. Arus transformator tiga fasa dengan kumparan yang dihubung bintang yaitu I_A , I_B dan I_C masing-masing berbeda fasa sebesar 120°

$$I_N = I_A + I_B + I_C = 0$$

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

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

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



Gambar 2.5 Gambar kumpulan hubung bintang dan arah fasa-nya

Dari gambar diatas diketahui bahwa untuk hubungan bintang berlaku :

$$I\text{-line} = I\text{-fasa}$$

$$V\text{-line} (V_{AB}) = \sqrt{3} \times V\text{-fasa} (V_{AN})$$

2.7.2. Hubungan Delta

Hubungan delta adalah suatu hubungan transformator tiga fasa dimana cara penyambungannya ialah ujung akhir lilitan fassa pertama disambung dengan ujung mula lilitan fasa kedua, akhir fasa kedua dengan ujung mula fasa ketiga dan akhir fasa ketiga disambung dengan ujung mula fasa pertama.

Tegangan transformator tiga fasa dengan kumpulan yang di hubungkan secara delta, yaitu V_{AB} , V_{BC} dan V_{CA} , masing-masing berbeda fasa 120° .

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

dan untuk beban yang seimbang berlaku :

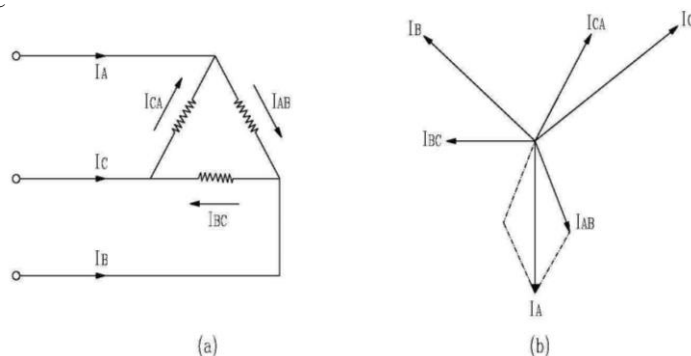
$$I_A = I_{AB} - I_{CA}$$

$$I\text{-line} (I_A) = \sqrt{3} \times I\text{-fasa} (I_{AB})$$

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

$$V\text{-line} (V_{CA}) = V\text{-fasa} (V_{AC})$$

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

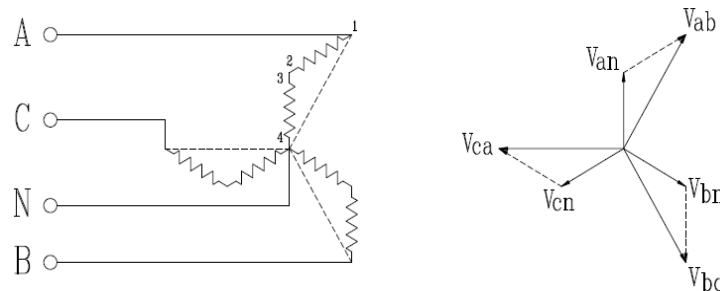


Gambar 2.6 Gambar kumpulan hubung delta dan arah fasa-nya

2.7.3. Hubungan Zig-zag

Untuk distribusi tenaga listrik dapat digunakan sistem hubungan bintang, supaya dapat bekerja dengan baik, maka salah satu syarat yang diperlukan adalah setiap fasa harus bebannya sama. Akan tetapi hal ini seringkali sulit untuk dipenuhi, untuk itu lilitan sekunder dibuat dalam hubungan *interconnected* (zig-zag).

Hubungan zig-zag ini biasa disebut juga hubungan berliku. Dalam hubungan ini, masing-masing lilitan tiga fasa pada sisi tegangan rendah di bagi menjadi dua bagian dan masing-masing di hubungkan pada vektor berlainan. Hubungan silang atau zig-zag di gunakan untuk keperluan khusus seperti pada transformator distribusi dan transformator *converter*.



Gambar 2.7. Gambar kumparan hubung zig-zag dan arah fasa-nya

Dari gambar 2.7 diketahui bahwa untuk hubungan zig-zag berlaku :

$$I\text{-line} = I\text{-fasa}$$

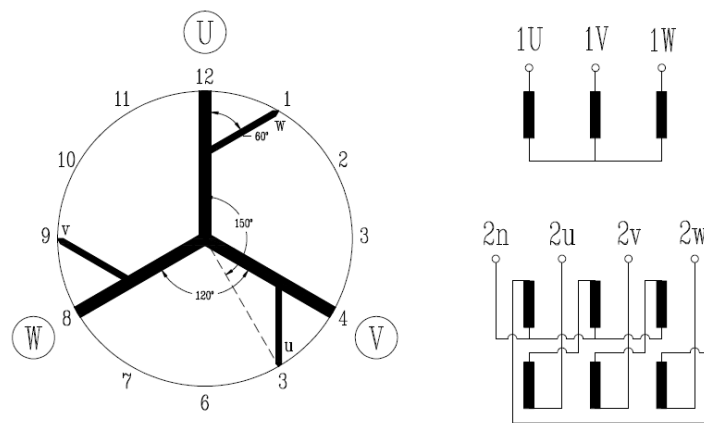
$$V\text{-line} (V_{AB}) = \sqrt{3} \times V\text{-fasa} (V_{AN})$$

2.7.4. Menentukan Kelompok Hubungan

Dalam menentukan kelompok hubungan dapat di ambil beberapa metode, yaitu sebagai berikut :

1. Notasi untuk hubungan delta, bintang, dan zig-zag, masing-masing adalah *D*, *Y*, dan *Z* (*Uppercase*) untuk sisi tegangan tinggi dan *d*, *y*, dan *z* (*Lowercase*) menunjukkan sisi tegangan rendah. Sedangkan untuk urutan fasa, di pakai notasi *U*, *V*, *W* untuk sisi tegangan tinggi dan *u*, *v*, *w* untuk sisi tegangan rendah.
2. Tegangan primer di anggap sebagai tegangan tinggi dan tegangan pada sekunder di anggap sebagai tegangan rendah.

3. Angka jam menyatakan, bagaimana letak sisi kumparan tegangan tinggi terhadap sisi tegangan rendah.
4. Jarum jam panjang menunjukkan sisi primer dan jarum jam pendek menunjukkan sisi sekunder. Jarum jam di buat selalu menunjuk angka 12 dan di buat berimpit dengan vector fasa VL tegangan tinggi (*line to line*), bergantung pada perbedaan fasanya, vector fasa tegangan rendah (u, v, w) dapat di lukiskan letak vector fasa $v1$ tegangan rendah (*line to line*) menunjukkan arah jarum jam pendek.
5. Pastikan bahwa masing-masing vector fasa tegangan rendah (u, v, w) sejajar dengan vector fasa tegangan tinggi (U, V, W).



Gambar 2.8 Kelompok Hubungan Transformator Yzn-5

2.7.5. Jenis-Jenis Hubungan Transformator Tiga Fasa

Dalam pelaksanaanya, tiga buah lilitan fasa pada sisi primer dan sisi sekunder dapat dihubungkan dalam bermacam-macam hubungan, seperti bintang dan segitiga, dengan kombinasi Y-Y, Y- Δ , Δ -Y, Δ - Δ , bahkan untuk kasus tertentu lilitan sekunder dapat dihubungkan secara berliku-liku (zig-zag), sehingga diperoleh kombinasi Δ -Z, dan Y-Z. Hubungan zig-zag merupakan sambungan bintang istimewa, hubungan ini digunakan untuk mengantisipasi kejadian yang mungkin terjadi apabila dihubungkan secara bintang dengan beban fasanya tidak seimbang. Dari berbagai hubungan yang dimiliki pada transformator tiga fasa, pemilihan hubungan bintang atau delta berdasarkan berbagai pertimbangan.

Hubungan bintang relatif lebih murah karena hanya memerlukan sedikit lilitan dan isolasi daripada hubungan delta.

2.8. Tegangan Pengenal, Penyardapan, Frekuensi, Daya Pengenal, dan Rugi-Rugi pada Transformator Distribusi

Berdasarkan SPLN D3.002-1:2007 mengenai spesifikasi transformator distribusi, maka tegangan pengenal, tegangan penyardapan, nilai daya pengenal dan rugi-rugi transformator pada frekuensi 50 Hz adalah sebagai berikut :

2.8.1. Tegangan Penyardapan

Klasifikasi tegangan penyardapan tanpa beban pada transformator berdasarkan standard SPLN D3.002-1:2007 dengan langkah sadapan 2.5% bisa dilihat pada (*tabel 2.2*) di bawah ini :

Tabel 2.2. Klasifikasi Tegangan Penyardapan

| No. Sadapan | Sistem JTM 3 Kawat | | Sistem JTM 3 Kawat | | | |
|----------------|--------------------|--------------|--------------------|---------|--------------------|--------------------|
| | Fasa Tiga | Fasa Tunggal | Fasa Tiga | | Fasa Tunggal | |
| | Tipe 1 | Tipe 2 | Tipe 1 | Tipe 2 | Tipe 1 | Tipe 2 |
| 1 | 21 kV | 21 kV | 21 kV | 21 kV | $21/\sqrt{3}$ kV | $21/\sqrt{3}$ kV |
| 2 | 20.5 kV | 20.5 kV | 20.5 kV | 20.5 kV | $20.5/\sqrt{3}$ kV | $20.5/\sqrt{3}$ kV |
| 3 | 20 kV | 20 kV | 20 kV | 20 kV | $20/\sqrt{3}$ kV | $20/\sqrt{3}$ kV |
| 4 | 19.5 kV | 19.5 kV | 19.5 kV | 19.5 kV | $19.5/\sqrt{3}$ kV | $19.5/\sqrt{3}$ kV |
| 5 | 19 kV | 19 kV | 19 kV | 19 kV | $19/\sqrt{3}$ kV | $19/\sqrt{3}$ kV |
| 6 | - | 18.5 kV | - | 18.5 kV | - | $18.5/\sqrt{3}$ kV |
| 7 | - | 18 kV | - | 18 kV | - | $18/\sqrt{3}$ kV |

2.8.2. Tegangan Primer

Tegangan primer di tetapkan sesuai dengan tegangan nominal sistem pada jaringan tegangan menengah (JTM) yang berlaku di Indonesia, yaitu :

- a. Transformator fasa tiga : 20 kV
- b. Transformator fasa tunggal : 20 kV dan $20\sqrt{3}$ kV

2.8.3. Tegangan Sekunder

Tegangan di sesuaikan dengan nominal sistem pada jaringan tegangan rendah (JTR) yang berlaku di Indonesia, yaitu :

- a. Transformator fasa tiga : 400 V
- b. Transformator fasa tunggal : 231 V (konstruksi : 2 belitan sekunder)

2.8.4. Frekuensi

Frekuensi yang umum di pakai di Indonesia untuk sistem jaringan tegangan distribusi adalah frekuensi 50 Hz.

2.8.5. Daya Pengenal

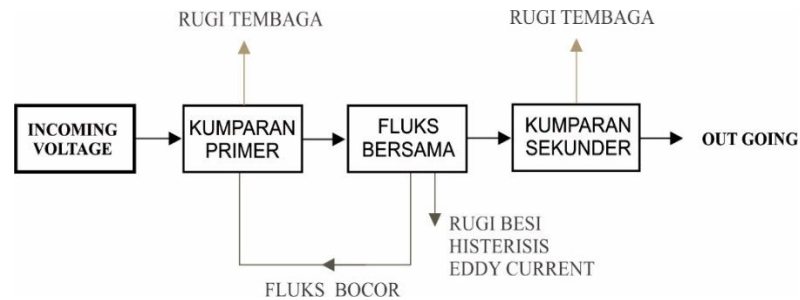
Nilai daya pengenal dapat di lihat pada tabel dibawah, yaitu spesifikasi transformator tiga fasa.

Tabel 2.3. Transformator Distribusi Fasa Tiga Frekuensi 50 Hz

| Daya Pengenal (kVA) | Rugi Besi (Watt) | Rugi Belitan (Watt) |
|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| 160 | 300 | 2000 |
| 200 | 355 | 2350 |
| 250 | 420 | 2750 |
| 315 | 500 | 3250 |
| 400 | 595 | 3850 |
| 500 | 700 | 4550 |
| 630 | 835 | 5400 |
| 800 | 1000 | 6850 |
| 1000 | 1100 | 8550 |

2.8.6. Rugi - Rugi

Pada transformator di kenal ada 2 (dua) macam rugi-rugi yaitu rugi tanpa beban (rugi besi) dan rugi berbeban (rugi belitan).



Gambar 2.9. Rugi-rugi pada Transformator

2.8.6.1. Rugi – Rugi Tanpa Beban

Rugi-rugi tanpa beban (rugi besi), terjadi di transformator. Rugi-rugi ada baik pada saat Transformator saat transformator tanpa beban dan berbeban (lihat tabel 2.3.). Rugi-rugi tanpa beban terdiri dari 2 jenis yaitu:

- 1) Rugi-rugi histerisis (*hysteresis loss*) yaitu rugi-rugi yang berkaitan dengan penyusunan kembali medan magnetik di dalam inti besi pada setiap setengah siklus, sehingga timbul fluks bolak-balik pada inti besi. Rugi-rugi ini tidak linear dan kompleks.
- 2) Rugi-rugi ‘*Eddy current*’ (*Eddy current loss*) yaitu rugi-rugi yang disebabkan oleh pemanasan akibat timbulnya arus *Eddy* (pusar) yang terdapat pada inti besi transformator. Rugi-rugi ini terjadi karena inti besi terlalu tebal sehingga terjadi perbedaan tegangan antara sisinya maka mengalir arus yang berputar-putar di sisi tersebut.

2.8.6.2. Rugi – Rugi Berbeban

Rugi-rugi berbeban (rugi belitan) atau biasa disebut juga rugi tembaga terjadi pada saat transformator dalam keadaan berbeban. Rugi-rugi ini disebabkan oleh pemanasan yang timbul akibat arus mengalir pada hambatan kawat penghantar yang terdapat pada kumparan primer dan sekunder dari transformator.

2.9. Rumus – Rumus Transformator

2.9.1. Bagian Elektrik

2.9.1.1. Hukum Dasar Prinsip Kerja Tranformator

Prinsip kerja transformator adalah hukum Faraday. Apabila kumparan primer di hubungkan dengan sumber tegangan V_1 yang sinusoida, maka akan

mengalir arus I_0 yang sinusoida. Gaya gerak listrik (GGL) $N_1 I_0$ akan menghasilkan fluks (Φ) dalam inti besi, karena arus I_0 merupakan gelombang sinusoida, maka fluks (Φ) merupakan sinusoida.

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

Dimana :

$$\Phi = \text{Arus induksi (Fluks/Weber)}$$

$$\omega = \text{Frekuensi sudut (} 2\pi f \text{)}$$

Fluks yang sinusoida ini akan menghasilkan tegangan induksi e_1 induksi

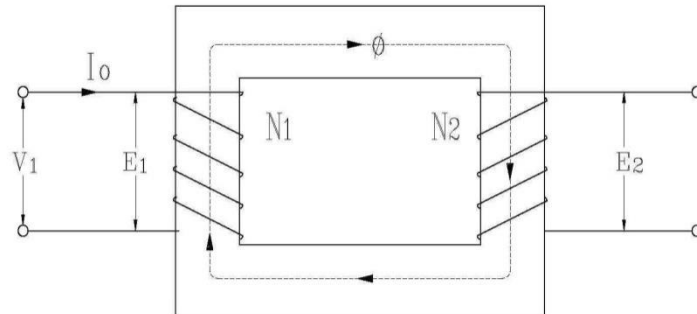
$$e_1 = - N_1 \frac{d\Phi}{dt} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana :

$$e_1 = \text{Gaya gerak listrik (Volt)}$$

$$N_1 = \text{Jumlah lilitan}$$

$$\Phi = \text{Arus induksi (Fluks/Weber)}$$



Gambar 2.10. Rangkaian Transformator Tanpa Beban

Dengan diasumsikan transformator dalam kondisi normal (mengabaikan rugi tahanan dan adanya fluks bocor), di dapat :

$$a = \frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana :

$$a = \text{Perbandingan transformasi transformator}$$

$$E_1 = \text{Gaya gerak listrik primer (Volt)}$$

$$E_2 = \text{Gaya gerak listrik sekunder (Volt)}$$

V_1 = Tegangan primer (Volt)

V_2 = Tegangan sekunder (Volt)

N_1 = Kumparan lilitan primer

N_2 = Kumparan lilitan sekunder

Apabila kumparan sekunder di hubungkan dengan beban (Z_L) maka akan timbul arus (I_2) yang menimbulkan gaya gerak magnet (ggm) $N_2 I_2$ yang cenderung menentang fluks (Φ) bersama yang telah ada akibat arus pemagnetan I_M . Arus yang mengalir pada kumparan primer menjadi :

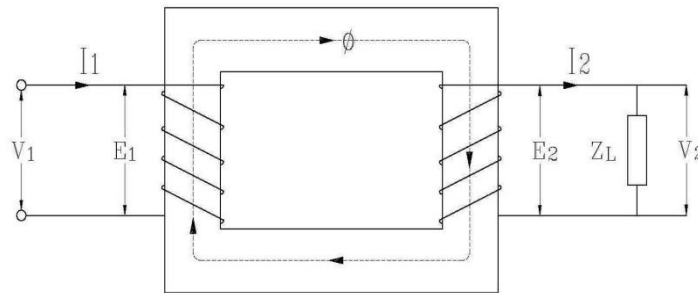
$I_1 = I_0 + I'_2$, bila rugi besi diabaikan, maka :

$$I_1 = I_M + I'_2$$

Untuk menjaga agar fluks tetap tidak berubah sebesar ggm , berlaku :

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

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



Gambar 2.11. Rangkaian Transformator Berbeban

karena nilai I'_2 di anggap kecil maka $I'_2 = I_2$, sehingga di dapat :

$$a = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana :

a = Perbandingan transformasi transformator

I_1 = Arus kumparan primer (A)

I_2 = Arus kumparan sekunder (A)

N_1 = Kumparan lilitan primer

N_2 = Kumparan lilitan sekunder

Dari persamaan (2.2) dan (2.3) maka di dapatkan perbandingan untuk jumlah lilitan, tegangan dan arus yaitu sebagai berikut :

$$a = \frac{N1}{N2} = \frac{V1}{V2} = \frac{I2}{I1} \dots\dots\dots (2.5)$$

2.9.1.2. Rumus Daya Pengenal

Daya pengenal di definisikan dalam satuan kilo Volt Ampere (kVA).

$$P = VI\sqrt{3} \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana :

P = Daya pengenal transformator 3 fasa (kVA)

V = Tegangan line-line (Volt)

I = Arus untuk line-line (A)

2.9.1.3. Rumus Arus dan Tegangan

Dari persamaan (2.6) untuk hubungan delta maka arus dan tegangannya adalah sebagai berikut :

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3}V_L} \dots\dots\dots (2.7)$$

$$I_p = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots (2.8)$$

$$V_L = \frac{P}{\sqrt{3}I_L} \dots\dots\dots (2.9)$$

$$V_p = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots (2.10)$$

Dimana :

P = Daya pengenal transformator (kVA)

I_L = Arus untuk line (A)

I_p = Arus untuk fasa (A)

V_L = Tegangan untuk line (Volt)

V_p = Tegangan untuk fasa (Volt)

Untuk hubungan star maka untuk arus dan tegangannya adalah sebagai berikut :

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3}V_L} \dots\dots\dots (2.11)$$

$$I_P = I_L \dots\dots\dots (2.12)$$

$$V_L = \frac{P}{\sqrt{3}I_L} \dots\dots\dots (2.13)$$

$$V_p = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots (2.14)$$

Dimana :

P = Daya pengenal transformator (kVA)

I_L = Arus untuk line (A)

I_P = Arus untuk fasa (A)

V_L = Tegangan untuk line (Volt)

V_p = Tegangan untuk fasa (Volt)

2.9.1.4. Tegangan Per Lilitan

Untuk menghitung tegangan per lilitan dapat di gunakan rumus sebagai berikut :

$$V_t = K \sqrt{\sqrt{\frac{W_{Fe}}{W_{Cu}}} \times P} \dots\dots\dots (2.15)$$

Dimana :

P = Daya pengenal transformator (kVA)

K = Konstanta (0.6 – 0.7)

W_{Fe} = Rugi besi (Watt)

W_{Cu} = Rugi tembaga (Watt)

V_t = Tegangan per lilitan (Volt / turn)

Dari V_t maka bisa di cari jumlah lilitan pada kumparan primer dan sekunder.

Kumparan primer :

$$N_1 = \frac{V_p}{V_t} \dots\dots\dots (2.16)$$

Kumparan sekunder :

$$N_2 = \frac{V_s}{\sqrt{3}V_t} \dots\dots\dots (2.17)$$

Dimana :

N_1 = Jumlah lilitan kumparan primer

N_2 = Jumlah lilitan kumparan sekunder

V_p = Tegangan primer (Volt)

V_s = Tegangan sekunder (Volt)

2.9.1.5. Kerapatan Arus Kumparan Primer dan Sekunder

Untuk kerapatan arus pada kumparan primer dan sekunder adalah berdasarkan arus fasanya, untuk perhitungan adalah sebagai berikut :

$$J_p = \frac{I_p}{A_1} \dots\dots\dots (2.18)$$

$$J_s = \frac{I_s}{A_2} \dots\dots\dots (2.19)$$

Dimana :

J_p = Kerapatan arus kumparan primer (A/mm²)

J_s = Kerapatan arus kumparan sekunder (A/mm²)

I_p = Arus fasa kumparan primer (A)

I_s = Arus fasa kumparan sekunder (A)

A_1 = Luas penampang konduktor primer (mm²)

A_2 = Luas penampang konduktor sekunder (mm²)

3. Kerapatan Fluks Inti Besi Maksimum

Untuk menghitung kerapatan fluks inti besi maksimum, dapat di hitung dengan rumus sebagai berikut :

$$B_m = \frac{V_t}{4.44 \times f \times A_i} \dots\dots\dots (2.20)$$

Dimana :

B_m = Kerapatan fluks inti besi maksimum (Tesla)

V_t = Tegangan per lilitan (Volt / turn)

f = Frekuensi

Ai = Luas inti besi murni (mm²)

2.9.1.6. Rugi-Rugi Inti Besi

Rugi-rugi inti besi dalam transformator dapat di nyatakan di dalam persamaan berat rugi-rugi inti per satuan berat yang di nyatakan dengan rumus sebagai berikut :

$$W_{Fe} = M_{Fe} \times W_B \dots\dots\dots (2.21)$$

Dimana :

W_{Fe} = Rugi inti besi (Watt)

M_{Fe} = Berat total inti besi transformator (kg)

W_B = Rugi-rugi inti per satuan berat (Watt/kg)

Tabel 2.4. Nilai W_B Terhadap Kerapatan Fluks Inti Besi

| | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| W _B (Watt/kg) | 0,6 | 0,61 | 0,62 | 0,63 | 0,64 | 0,65 | 0,66 | 0,67 | 0,68 | 0,69 | 0,7 |
| B _m (Tesla) | 1.3 | 1.31 | 1.32 | 1.33 | 1.34 | 1.35 | 1.36 | 1.37 | 1.38 | 1.39 | 1,4 |

2.9.1.7. Rugi-Rugi Tembaga

Rugi-rugi ini merupakan penjumlahan antara rugi-rugi tembaga pada kumparan primer dengan rugi-rugi tembaga pada kumparan sekunder. Faktor yang memperkecil tahanan total kumparan adalah luas penampang konduktor dan panjang konduktor. Rugi-rugi tembaga dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$W_{Cu} = W_{Cu 1} (primer) + W_{Cu 2} (sekunder) \dots\dots\dots (2.22)$$

$$W_{Cu} = (I_p^2 \times R_1) + (I_s^2 \times R_2) \dots\dots\dots (2.23)$$

Dimana untuk $R_1 = \frac{\rho_{cu} \times N1 \times T1}{A1}$

$$R_2 = \frac{\rho_{cu} \times N2 \times T2}{A2}$$

Sehingga di dapat rumus untuk rugi tembaga pada sisi primer dan sisi sekunder sebagai berikut :

$$W_{Cu\ 1} = I_p^2 \left[\frac{\rho_{cu} \times N_1 \times T_1}{A_1} \right] \dots\dots\dots (2.24)$$

$$W_{Cu\ 2} = I_s^2 \left[\frac{\rho_{cu} \times N_2 \times T_2}{A_2} \right] \dots\dots\dots (2.25)$$

Dimana :

W_{Cu} = Rugi total tembaga (Watt)

$W_{Cu\ 1}$ = Rugi-rugi tembaga sisi primer (Watt)

$W_{Cu\ 2}$ = Rugi-rugi tembaga sisi sekunder (Watt)

I_p = Arus fasa primer (A)

I_s = Arus fasa sekunder (A)

R_1 = Resistance kumparan primer (Ω)

R_2 = Resistance kumparan sekunder (Ω)

ρ_{cu} = Tahanan jenis bahan kumparan ($\mu\Omega m$)

N_1 = Jumlah lilitan kumparan primer

T_1 = Keliling rata-rata kumparan primer (mm)

T_2 = Keliling rata-rata kumparan sekunder (mm)

A_1 = Luas penampang konduktor primer (mm^2)

A_2 = Luas penampang konduktor sekunder (mm^2)

2.9.1.8.Reaktansi, Resistansi dan Impedansi

Sebelum mencari impedansi maka langkah yang di ambil harus mencari nilai reaktansi terlebih dahulu, dengan perhitungan sebagai berikut :

$$X = \left[\frac{8 \times f \times I_p \times N_1^2 \times S}{\alpha \times V_p / \sqrt{3}} \right] \times 10^{-7} \dots\dots\dots (2.26)$$

Dimana untuk S di dapat dari :

$$S = A_g + \left[\frac{A_p + A_s}{3} \right] \dots\dots\dots (2.27)$$

Dimana untuk α di dapat dari :

$$\alpha = \left[\frac{HP + HS}{2} \right] + \left[\frac{W}{6} \right] + \left[\frac{2Y}{6} \right] \dots\dots\dots (2.28)$$

Dimana :

- X = Reaktansi (%)
 f = Frekuensi (Hz)
 I_p = Arus fasa primer (A)
 N_1 = Jumlah lilitan kumparan primer
 S = Jumlah area gap kumparan (mm)
 α = Rata-rata tinggi kumparan dan inti besi (mm)
 V_p = Tegangan primer (Volt)
 A_g = Luas area gap kumparan (mm)
 A_p = Luas area kumparan primer (mm)
 A_s = Luas area kumparan sekunder (mm)
 HP = Tinggi kumparan primer (mm)
 HS = Tinggi kumparan sekunder (mm)
 W_1 = Lebar plat inti besi terbesar (mm)
 Y = Tebal tumpukan inti besi (mm)

Resistansi di peroleh dari rumus sebagai berikut :

$$R = \frac{W_{cu}}{P} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.29)$$

Dimana :

- R = Resistansi (%)
 W_{cu} = Rugi-rugi tembaga (Watt)
 P = Daya transformator (kVA)

Impedansi di dapat dengan rumus :

$$Z = \sqrt{X^2 + R^2} \dots\dots\dots (2.30)$$

Dimana :

- Z = Impedansi (%)

2.9.1.9. Effisiensi transformator

Nilai effisiensi merupakan perbandingan antara daya output dengan daya input, sehingga di dapatkan persamaan sebagai berikut :

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

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}} + P_{\text{losses}}} \times 100 \%$$

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}} + P_{\text{cu}} + P_{\text{fe}}} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.31)$$

Dimana :

η = Effisiensi (%)

P_{out} = Daya transformator (kVA)

P_{cu} = Rugi-rugi tembaga (Watt)

P_{fe} = Rugi-rugi besi (Watt)