



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik³

Sekalipun tidak terdapat suatu sistem tenaga listrik yang “tipikal”, namun pada umumnya, dapat dikembalikan batasan pada suatu sistem yang lengkap yang mengandung empat unsur, yaitu:

1. Adanya suatu unsur pembangkit listrik. Tegangan yang dihasilkan oleh pusat tenaga listrik itu biasanya merupakan tegangan menengah (TM).
2. Suatu sistem transmisi, lengkap dengan gardu induk. Karena jaraknya yang biasanya jauh maka diperlukan penggunaan tegangan tinggi (TT) atau tegangan ekstra tinggi (TET).
3. Adanya saluran distribusi, yang biasanya terdiri atas saluran distribusi primer dengan tegangan menengah (TM) dan saluran distribusi sekunder dengan tegangan rendah (TR).
4. Adanya unsur pemakaian atas utilisasi, yang terdiri atas instalasi pemakaian tenaga listrik. Instalasi rumah tangga biasanya memakai tegangan rendah, sedangkan pemakai besar seperti industri menggunakan tegangan menengah ataupun tegangan tinggi.

Gambar 2.1 memperlihatkan skema suatu sistem tenaga listrik.

Perlu dikemukakan bahwa suatu sistem dapat terdiri atas beberapa subsistem yang saling berhubungan, atau yang biasa disebut sebagai sistem terinterkoneksi.

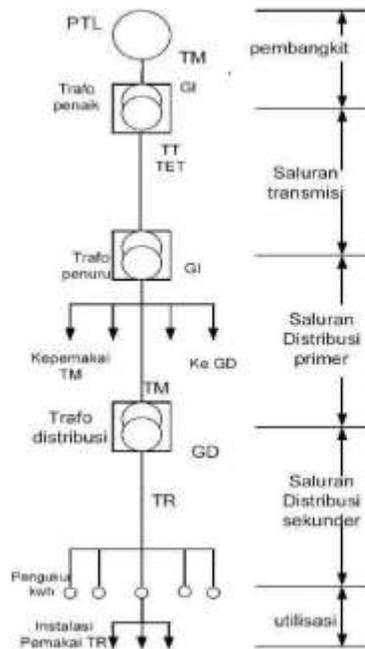
Energi listrik dibangkitkan pada pembangkit tenaga listrik (PTL) yang dapat merupakan suatu pusat listrik tenaga uap (PLTU), pusat tenaga listrik air (PLTA),



pusat listrik tenaga gas (PLTG), pusat listrik tenaga diesel (PLTD), ataupun pusat listrik tenaga nuklir (PLTN).

Pembangkit tenaga listrik (PTL) biasanya membangkitkan energi listrik pada tegangan menengah (TM), yaitu pada umumnya antara 6 sampai 20 kV. Jika pembangkit terletak jauh dari pemakai, maka energi listrik perlu diangkut melalui saluran transmisi dan tegangannya dinaikkan dari tegangan menengah menjadi tegangan tinggi (TT) ataupun tegangan ekstra tinggi (TET). Menaikkan tegangan itu dilakukan di gardu induk (GI) dengan menggunakan transformator penaik tegangan. Tegangan tinggi di Indonesia yaitu 70 kV, 150 kV dan 275 kV. Sedangkan tegangan ekstra tinggi yaitu diatas 500 kV.

Mendekati pusat pemakaian tenaga listrik, tegangan tinggi diturunkan menjadi tegangan menengah. Di Indonesia tegangan menengah yaitu 20 kV. Di tepi – tepi jalan, biasanya berdekatan dengan persimpangan, terdapat gardu – gardu distribusi (GD) yang mengubah tegangan menengah menjadi tegangan rendah (TR) melalui transformator distribusi. Melalui tiang – tiang listrik, energi listrik tegangan rendah disalurkan kepada para pemakai. Di Indonesia, tegangan rendah yaitu 220/380 volt dan merupakan sistem distribusi sekunder.



Gambar 2.1 Sistem tenaga listrik

Berdasarkan gambar 2.1 di atas, maka dapat dikelompokkan dalam beberapa pembagian sebagai berikut:

- Daerah 1: Bagian pembangkitan (*generation*).
- Daerah 2: Bagian penyaluran (*transmission*) bertegangan tinggi (HV, UHV, EHV).
- Daerah 3: Bagian distribusi primer bertegangan menengah (6 kV, 12 kV, atau 20 kV)
- Daerah 4: Bagian distribusi sekunder tegangan rendah.

2.2 Klasifikasi Saluran Distribusi Tenaga Listrik⁷

Secara umum, saluran tenaga Listrik atau saluran distribusi dapat diklasifikasikan sebagai berikut:



2.2.1 Menurut Nilai Tegangannya⁷

2.2.1.1 Saluran Distribusi Primer

Terletak pada sisi primer trafo distribusi, yaitu antara titik Sekunder trafo substation (G.I.) dengan titik primer trafo distribusi. Saluran ini bertegangan menengah 20kV. Jaringan listrik 70 kV atau 150 kV, jika langsung melayani pelanggan, bisa disebut jaringan distribusi.

2.2.1.2 Saluran distribusi sekunder

Terletak pada sisi sekunder trafo distribusi, yaitu antara titik sekunder dengan titik cabang menuju beban (Lihat Gambar 2.1)

2.2.2 Menurut bentuk tegangannya

- a. Saluran Distribusi DC (*Direct Current*) menggunakan sistem tegangan searah.
- b. Saluran Distribusi AC (*Alternating Current*) menggunakan sistem tegangan bolak-balik.

2.2.3 Menurut Jenis/Tipe Konduktornya⁷

- a. Saluran udara, dipasang pada udara terbuka dengan bantuan support (tiang) dan perlengkapannya, dibedakan atas:
 - Saluran kawat udara, bila konduktornya telanjang, tanpa isolasi pembungkus.
 - Saluran kabel udara, bila konduktornya terbungkus isolasi.
- b. Saluran Bawah Tanah, dipasang di dalam tanah, dengan menggunakan kabel tanah (ground cable).
- c. Saluran Bawah Laut, dipasang di dasar laut dengan menggunakan kabel laut (submarine cable).



2.3 Konstruksi Gardu Tiang⁵

2.3.1 Ruang Bebas Hambatan (*Right of Way*) dan Jarak Aman (*Safety Distance*)⁴

Ruang bebas hambatan atau *right of way* pada Gardu Tiang adalah daerah bebas dimana gardu tersebut berlokasi. Pada ruang bebas tersebut tidak ada penghalang yang menyebabkan komponen gardu beserta kelengkapannya bersentuhan dengan pohon atau bangunan. Tersedia akses jalan masuk-keluar gardu untuk keperluan kegiatan operasi dan pemeliharaan/perbaikan gardu. Jarak aman bagian Gardu Tiang di sisi 20 kV sesuai dengan ketentuan Saluran Udara Tegangan Menengah adalah 2,5 meter dari sisi terluar konstruksi gardu.

2.3.2 Spesifikasi Peralatan Gardu Tiang⁵

2.3.2.1 Tiang

Tiang yang dipergunakan untuk Gardu Distribusi jenis ini dapat berupa tiang besi ataupun tiang beton berkekuatan beban kerja sekurang-kurangnya 500 daN, dengan panjang 11 atau 12 meter.

2.3.2.2 Peralatan Hubung dan Proteksi

Karakteristik listrik komponen utama instalasi Gardu Tiang yang harus dipenuhi pada sisi Tegangan Menengah (TM), adalah :

- Tegangan Pengenal : 24 kV
- Frekuensi pengenalan : 50 Hz
- Ketahanan isolasi terhadap tegangan impuls kering standar : 125 kV
- Inpulse DC test selama 1 menit : 50 kV
- Ketahanan tegangan jarak isolasi di udara :
 - a. Tegangan impuls, kering (puncak) : 145 kV
 - b. Inpulse DC voltage selama 1 menit : 50 kV
 - c. Ketahanan terhadap arus hubung singkat (1 detik) : 12.5 kV
 - d. Ams maksimum gangguan ke bumi selama 1 detik : 1 kA
 - e. Tegangan uji terhadap sirkuit buntu : 2 kV



- f. Tegangan surja hubung dan Pemutus Tenaga hampa udara harus cocok untuk transformator terendam minyak (tanpa penangkap petir) dengan tingkat isolasi dasar (BIL) : 125 kV
- Karakteristik listrik komponen utama instalasi Gardu Tiang yang harus dipenuhi pada sisi Tegangan Rendah, adalah :
- a. Tegangan pengenalan : 230/400 V
 - b. Frekuensi pengenalan : 50 Hz
 - c. Tingkat isolasi dasar (puncak) : 6 kV
 - d. Arus ketahanan waktu singkat selama 1 detik,
 - PHB250/500/630 A : 0.5 kA
 - PHB 800 A : 0.5 kA
 - PHB 1200 A : 0.5 kA
 - e. KHA Busbar : 250/400/630/
800/1200 A
 - f. Kapasitas pengaman lebur HRC : 25 kA/400 V
 - g. Tegangan ketahanan frekuensi daya selama 1 menit : 2,5 kV

2.4 Jenis Konstruksi Gardu Tiang⁵

2.4.1 Gardu Portal⁵

Gardu Portal adalah gardu listrik tipe terbuka (out-door) dengan memakai konstruksi dua tiang atau lebih. Tempat kedudukan transformator sekurang – kurangnya 3 meter di atas tanah dan ditambahkan platform sebagai fasilitas kemudahan kerja teknisi operasi dan pemeliharaan. Transformator dipasang pada bagian atas dan lemari panel / PHB-TR pada bagian bawah.

- 1) **Gardu Portal 50 kVA – 100 kVA, 2 jurusan TR PHB-TR**
gardu ini dirancang untuk 2 Jurusan Jaringan Tegangan Rendah.



- 2) **Gardu Portal 160 – 400 kVA, 4 Jurusan TR PHB-TR** gardu ini dirancang untuk 4 Jurusan Jaringan Tegangan Rendah.
- 3) **Gardu Portal Pelanggan Khusus**
Gardu Portal untuk pelanggan khusus Tegangan Rendah dan Tegangan Menengah.
- 4) **Gardu Portal SKTM**
 - a) **Gardu Portal SKTM Antenna**



Gambar 2.2 Gardu Portal.

Gardu Portal ini lazimnya dibangun pada sistem distribusi Tegangan Menengah dengan kabel bawah tanah yang karena keterbatasan lahan, catu daya TM diperoleh dari Gardu Beton terdekat dengan SKTM bawah tanah dengan panjang tidak melebihi 100 meter. Untuk gardu portal antenna, kubikel pengaman transformator ditempatkan pada gardu pemberi catu daya.

b) Gardu Portal RMU/Modular

Gardu Portal ini adalah gardu listrik dengan konstruksi sama dengan gardu Portal, dengan penempatan kubikel jenis RMU/modular dalam lemari panel (metal clad) yang terhindar dari air hujan dan debu, dan dipasangkan pada jaringan SKTM.



2.5 Transformator⁸

2.5.1 Umum⁸

Transformator merupakan suatu alat elektromagnetik, yang mengubah energi listrik dari satu tingkat tegangan ke tegangan yang lain. Hal ini dilakukan dengan perantaraan suatu medan magnet. Transformator terdiri atas dua kumparan yang digulung pada satu inti feromagnet. Kumparan-kumparan itu pada umumnya tidak berhubungan secara elektrik, melainkan secara magnetik melalui suatu fluks magnet yang berada di dalam inti feromagnet.

Salah satu kumparan dihubungkan pada sumber energi listrik. Kumparan ini dinamakan kumparan primer, yang memiliki sejumlah N_s bellitan, dihubungkan pada beban listrik dan dinamakan kumparan sekunder.

2.5.2 Klasifikasi Transformator⁹

- Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi:
 1. Transformator daya
 2. Transformator distribusi
 3. Transformator pengukuran (*instrument*), yang terdiri dari transformator arus dan transformator tegangan.
- Berdasarkan frekuensi, transformator dapat dikelompokkan menjadi :
 1. Frekuensi daya, 50-60 c/s
 2. Frekuensi pendengaran, 50 c//s – 20 kc/s
 3. Frekuensi radio, diatas 30 kc/s
- Berdasarkan jumlah fasanya dibagi atas 2 bagian yaitu:
 1. Transformator 1 fasa
 2. Transformator 3 fasa



2.5.1.1 Transformator daya

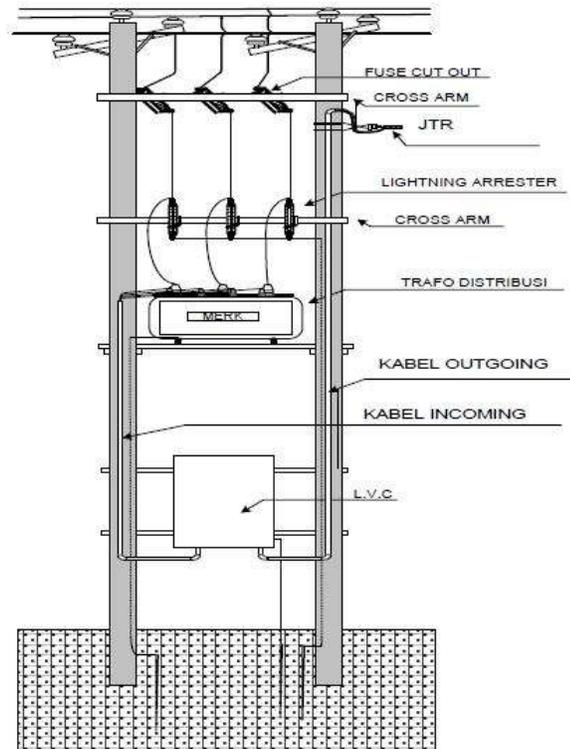
Transformator daya memiliki peranan sangat penting dalam sistem tenaga listrik. Transformator daya digunakan untuk menyalurkan daya dari generator bertegangan menengah ke transmisi jaringan distribusi. Kebutuhan transformator daya bertegangan tinggi dan berkapasitas besar, menimbulkan persoalan dalam perencanaan isolasi ukuran bobotnya.

2.5.1.2 Transformator distribusi

Transformator distribusi yang umum digunakan adalah *transformator step down* 20/0,4 kV, tegangan fasa-fasa sistem JTR adalah 380 Volt karena terjadi drop tegangan maka tegangan pada rak TR dibuat diatas 380 Volt agar tegangan pada ujung beban menjadi 380 Volt.

Pada kumparan primer akan mengalir arus jika kumparan primer dihubungkan ke sumber listrik arus bolak-balik, sehingga pada inti transformator yang terbuat dari bahan *ferromagnet* akan terbentuk sejumlah garis-garis gaya magnet (fluks = Φ).

Karena arus yang mengalir merupakan arus bolak-balik maka fluks yang terbentuk pada inti akan mempunyai arah dan jumlah yang berubah-ubah. Jika arus yang mengalir berbentuk sinus maka fluks yang terjadi akan berbentuk sinus pula karena fluks tersebut mengalir melalui inti yang mana pada inti tersebut terdapat lilitan primer dan lilitan sekunder maka pada lilitan primer dan sekunder tersebut akan timbul GGL (gaya gerak listrik) induksi, tetapi arah dari GGL induksi primer berlawanan dengan arah GGL induksi sekunder sedangkan frekuensi masing-masing tegangan tersebut sama dengan frekuensi sumbernya.



Gambar 2.3 Trafo distribusi.

2.5.1.3 Transformator pengukuran

Dalam prakteknya tidaklah aman menghubungkan instrumen, alat ukur atau peralatan kendali langsung ke rangkaian tegangan tinggi. Transformator pengukuran (*instrumen*) umumnya digunakan untuk mengurangi tegangan tinggi dan arus hingga harga aman dan dapat digunakan untuk kerja peralatan demikian.

Transformator *instrumen* melakukan dua fungsi yakni:

1. Dipergunakan sebagai alat perbandingan (*ratio device*) yang memungkinkandigunakannya alat ukur dan *instrumen* tegangan rendah dan arus rendah baku.
2. Digunakan sebagai alat pemisah (*insulating device*) untuk melindungi peralatan dan operator dari tegangan tinggi.



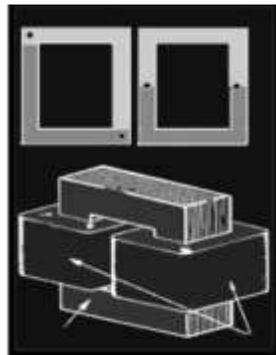
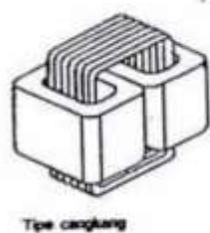
2.5.3 Bentuk dan Konstruksi Transformator

Konstruksi transformator distribusi terdiri dari beberapa bagian :

1. Inti, terbuat dari lempengan-lempengan pelat besi lunak atau baja silikon yang diklem menjadi satu.
2. Belitan, terbuat dari tembaga yang letaknya dibelitkan pada inti dengan bentuk konsentrik atau *spiral*.
3. Sistem pendinginan, (pada transformator dengan kapasitas besar).
4. *Bushing*, berfungsi untuk menghubungkan rangkaian dalam dari transformator ke rangkaian luar, (pada transformator daya).
5. *Arrester*, sebagai pengaman trafo terhadap tegangan lebih yang disebabkan oleh sambaran petir dan *switching* (SPLN se.002/PST/73).

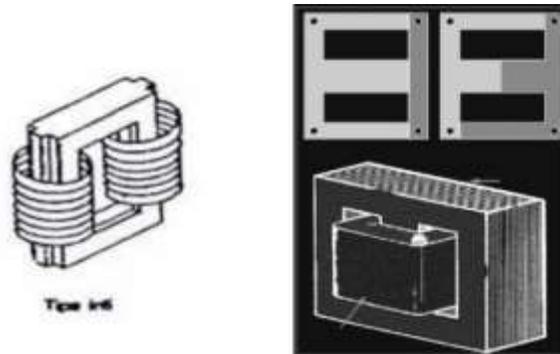
Bila dilihat dari letak belitannya, maka transformator terdiri dari :

1. Transformator jenis inti (*core type*), yaitu transformator dengan belitannya mengelilingi inti dan konstruksi dari intinya berbentuk huruf L atau U.



Gambar 2.4 Konstruksi Transformator Tipe Inti.

2. Transformator jenis cangkang (*shell type*), inti transformator ini mengelilingi belitannya dan konstruksi dari intinya berbentuk huruf E, I atau F.



Gambar 2.5 Konstruksi Transformator Tipe Cangkang.

2.5.4 Prinsip Kerja Transformator

Prinsip kerja transformator adalah berdasarkan Hukum *ampere* dan Hukum *faraday*, yaitu arus listrik menimbulkan medan magnet dan sebaliknya medan magnet dapat menimbulkan arus listrik.

Transformator terdiri atas dua buah kumparan (primer dan sekunder) yang bersifat induktif. Kedua kumparan ini terpisah secara elektris namun berhubungan secara magnetis melalui jalur yang memiliki reluktansi (*reluctance*) rendah. Apabila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik maka fluks bolak-balik akan muncul di dalam inti yang dilaminasi, karena kumparan tersebut membentuk jaringan tertutup maka mengalirlah arus primer. Akibat adanya fluks di kumparan primer maka di kumparan primer terjadi induksi (*self induction*) dan terjadi pula induksi di kumparan sekunder karena pengaruh induksi dari kumparan primer atau disebut sebagai induksi bersama (*mutual induction*) yang menyebabkan timbulnya fluks magnet di kumparan sekunder, maka mengalirlah arus sekunder jika rangkaian sekunder di bebani, sehingga energi listrik dapat ditransfer keseluruhan (secara magnetisasi).

$$e = (-) N \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots(2.1)$$

dimana :

e = Gaya Gerak Listrik



N = Jumlah Lilitan

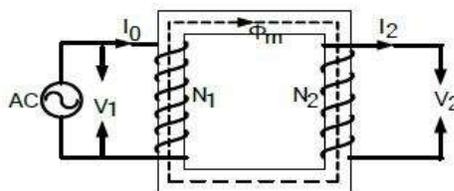
$\frac{d\phi}{dt}$ = Perubahan flux magnet (weber/sec)

Perlu diingat bahwa hanya tegangan listrik arus bolak-balik yang dapat ditransformasikan oleh transformator, sedangkan dalam bidang elektronika, transformator digunakan sebagai gandengan impedansi antara sumber dan beban untuk menghambat arus searah sambil tetap melakukan arus bolak-balik antara rangkaian.

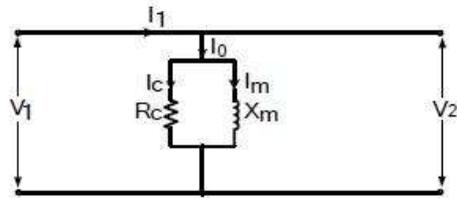
Tujuan utama menggunakan inti pada transformator adalah untuk mengurangi reluktansi (tahanan magnetis) dari rangkaian magnetis (*common magnetic circuit*).

2.5.5 Keadaan Transformator Tanpa Beban¹⁰

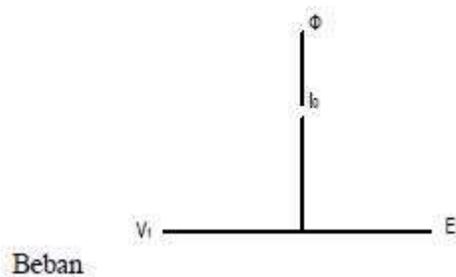
Bila kumparan primer suatu transformator dihubungkan dengan sumber tegangan V_1 yang sinusoidal, akan mengalirkan arus primer I_0 yang juga sinusoidal dan dengan menganggap belitan N_1 reaktif murni. I_0 akan tertinggal 90° dari V_1 . Arus primer I_0 menimbulkan fluks (Φ) yang sefasa dan juga berbentuk sinusoidal.



Gambar 2.6 Transformator Dalam Keadaan Tanpa Beban.



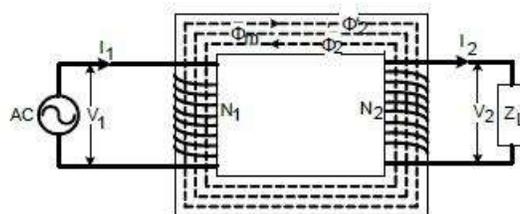
Gambar 2.7 Rangkaian Ekivalen Transformator Dalam Keadaan Tanpa Beban.



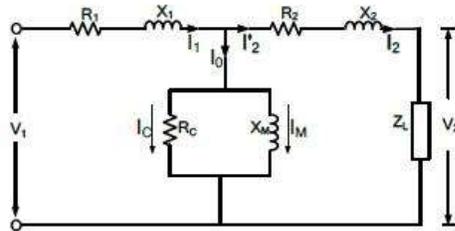
Gambar 2.8 Gambar Vektor Transformator Dalam Keadaan Tanpa Beban.

2.5.6 Keadaan Transformator Berbeban¹⁰

Apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban Z_L , I_2 mengalir pada kumparan sekunder, dimana $I_2 =$



Gambar 2.9 Transformator Dalam Keadaan Berbeban.



Gambar 2.10 Rangkaian Ekuivalen Transformator Dalam Keadaan Berbeban.

Arus beban I_2 ini akan menimbulkan gaya gerak magnet (ggm) $N_2 I_2$ yang cenderung menentang fluks (Φ) bersama yang telah ada akibat arus pemagnetan. Agar fluks bersama itu tidak berubah nilainya, pada kumparan primer harus mengalir arus I_2' , yang menentang fluks yang dibangkitkan oleh arus beban I_2 , hingga keseluruhan arus yang mengalir pada kumparan primer menjadi :

$$I_1 = I_0 + I_2' \text{ (Ampere)} \dots \dots \dots (2.2)$$

Bila komponen arus rugi inti (I_c) diabaikan, maka $I_0 = I_m$, sehingga :

$$I_1 = I_m + I_2' \text{ (Ampere)} \dots \dots \dots (2.3)$$

dimana:

I_1 = Arus pada sisi primer (Ampere)

I_2' = Arus yang menghasilkan Φ_2' (Ampere)

I_0 = Arus penguat (Ampere)

I_m = Arus pemagnetan (Ampere)

I_c = Arus rugi-rugi inti (Ampere)

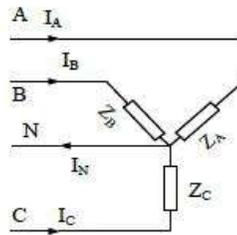


2.6 Hubungan Tiga Fasa Dalam Transformator

Secara umum ada 3 macam jenis hubungan pada transformator tiga fasa yaitu:

2.6.1 Hubungan Bintang (Y)

Hubungan bintang ialah hubungan transformator tiga fasa, dimana ujung-ujung awal atau akhir lilitan disatukan. Titik dimana tempat penyatuan dari ujung-ujung lilitan merupakan titik netral. Arus transformator tiga fasa dengan kumparan yang dihubungkan bintang yaitu; I_A , I_B , I_C masing-masing berbeda 120° .



Gambar 2.11 Transformator Tiga Fasa Hubungan Bintang.

Dari gambar diperoleh bahwa :

$$I_A = I_B = I_C = I_{L-L}$$

$$I_{L-L} = I_{Ph} \text{ (Ampere)} \dots \dots \dots (2.4)$$

dan,

$$V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = V_{L-L}$$

$$V_{L-L} = \sqrt{3} \cdot V_{Ph} = \sqrt{3} \cdot E_1 \text{ (Volt)} \dots \dots \dots (2.5)$$

dimana :

I_{L-L} = Arus fasa-fasa

I_{ph} = Arus fasa-netral

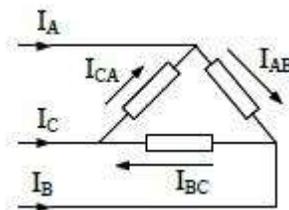
V_{L-L} = Tegangan fasa-fasa



V_{Ph} = Tegangan fasa netral

2.6.2 Hubungan Delta (Δ)

Hubungan segitiga/delta adalah suatu hubungan transformator tiga fasa, dimana cara penyambungannya ialah ujung akhir lilitan fasa pertama disambung dengan ujung mula lilitan fasa kedua, akhir fasa kedua dengan ujung mula fasa ketiga dan akhir fasa ketiga dengan ujung mula fasa pertama. Tegangan transformator tiga fasa dengan kumparan yang dihubungkan segitiga yaitu; V_A , V_B , V_C masing-masing berbeda 120° .



Gambar 2.12 Transformator Tiga Fasa Hubungan Delta.

Dari gambar diperoleh :

$$I_A = I_B = I_C = I_{L-L}$$

$$I_{L-L} = \sqrt{3} \cdot I_{Ph} \text{ (Ampere)} \dots \dots \dots (2.6)$$

dan,

$$V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = V_{L-L}$$

$$V_{L-L} = V_{Ph} = E_1 \text{ (Ampere)} \dots \dots \dots (2.7)$$

dimana,

V_{L-L} = Tegangan fasa – fasa (Volt)

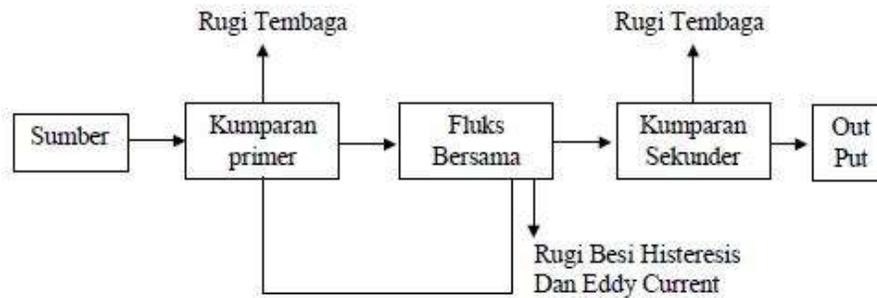
V_{Ph} = Tegangan fasa (Volt)

I_{L-L} = Arus fasa – fasa (Ampere)

I_{Ph} = Arus fasa (Ampere)



2.7 Rugi – rugi transformator¹⁰



Gambar 2.13 Blok Diagram Rugi – Rugi Pada Transformator.

2.7.1 Rugi Tembaga (PCU)

Rugi yang disebabkan arus mengalir pada kawat tembaga yang terjadi pada kumparan sekunder dapat ditulis sebagai berikut :

$$P_{cu} = I^2 R \text{ (Watt)} \dots \dots \dots (2.8)$$

Formula ini merupakan perhitungan untuk pendekatan. Karena arus beban berubah-ubah, rugi tembaga juga tidak konstan bergantung pada beban. Dan perlu diperhatikan pula resistansi disini merupakan resistansi AC.

2.7.2 Rugi Besi (Pi)

Rugi besi terdiri atas :

- a) Rugi histerisis (Ph), yaitu rugi yang disebabkan fluks bolak – balik pada inti besi yang dinyatakan sebagai :

$$P_h = k_h \cdot f \cdot B_{maks}^{1.6} \text{ (watt)} \dots \dots \dots (2.9)$$

dimana :

k_h = konstanta histeris, tergantung pada beban inti

B_{maks} = Fluks maksimum (weber)



f = Frekuensi jala – jala (Hz)

b) Rugi arus eddy (P_e), yaitu rugi yang disebabkan arus pusar pada inti besi. dirumuskan sebagai :

$$P_e = k_e \cdot f^2 \cdot B_{\text{maks}}^2 \text{ (Watt)} \dots\dots\dots(2.10)$$

dimana :

k_e = konstanta arus eddy, tergantung pada volume inti

B_{maks} = Fluks maksimum (weber)

f = Frekuensi jala – jala (Hz)

Jadi, rugi besi (rugi inti) adalah :

$$P_i = P_h + P_e \text{ (Watt)}$$

$$P_i = (k_h \cdot f \cdot B_{\text{maks}}^{1.6}) + (k_e \cdot f^2 \cdot B_{\text{maks}}^2) \dots\dots\dots(2.11)$$

Efisiensi menunjukkan tingkat keefisienan kerja suatu peralatan, dalam hal ini transformator yang merupakan perbandingan rating output (keluaran) terhadap inputnya (masukkan) yang dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\text{Efisiensi } (\eta) = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \dots\dots\dots(2.11)$$

$$= \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}} + \sum \text{rugi-rugi}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.13)$$

2.8 Efisiensi Transformator

Efisiensi menunjukan tingkat keefisienan kerja suatu peralatan, dalam hal ini transformator yang merupakan perbandingan rating *output* (keluaran) terhadap *input*-nya (masukkan) yang dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \text{Efisiensi } (\eta) &= \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \\ &= \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}} + \sum \text{rugi-rugi}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.14) \end{aligned}$$

Maka persentase efisiensi adalah :

$$= \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}} + \sum \text{rugi-rugi}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.15)$$



dimana:

P_{in} = Daya input transformator

P_{out} = Daya output transformator

$\sum \text{rugi} - \text{rugi} = P_{cu} + P_i$

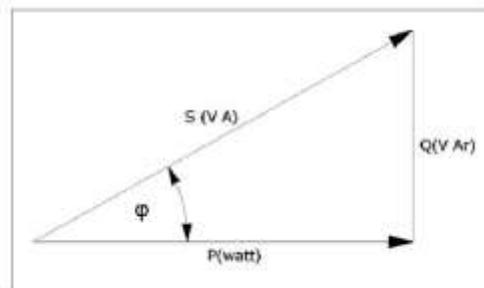
2.9 Faktor Daya

Pengertian faktor daya ($\cos \phi$) adalah perbandingan antara daya aktif (P) dan daya semu (S). Dari pengertian tersebut, faktor daya ($\cos \phi$) dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Faktor Daya} &= \frac{\text{Daya aktif}}{\text{Daya Semu}} \\ &= \frac{P}{S} = \frac{V.I.\cos\phi}{V.I} \end{aligned}$$

$$\text{Faktor Daya} = \cos \phi \dots\dots\dots(2.16)$$

Untuk penjelasan tentang daya-daya dapat dilihat pada gambar segitiga daya berikut ini :



Gambar 2.14 Segitiga Daya.

Dari gambar dapat dilihat bahwa:

$$\text{Daya Semu (S)} = V.I \text{ (VA)} \dots\dots\dots(2.17)$$

$$\text{Daya Aktif (P)} = V.I.\cos \phi = S.\cos \phi \text{ (Watt)} \dots\dots\dots(2.18)$$

$$\text{Daya Reaktif (Q)} = V.I.\sin \phi = S.\sin \phi \text{ (VAR)} \dots\dots\dots(2.19)$$



2.10 Perhitungan Arus Beban Penuh Transformator

Daya transformator bila ditinjau dari sisi tegangan tinggi (primer) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \dots\dots\dots(2.20)$$

dimana :

S = Daya Transformator (kVA)

V = Tegangan sisi primer transformator (kV)

I = Arus jala – jala (A)

Sehingga untuk menghitung arus beban penuh (*full load*) dapat menggunakan rumus :

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} V} \dots\dots\dots(2.21)$$

dimana :

I_{FL} = Arus beban penuh (A)

S = Daya Transformator (kVA)

V = Tegangan sisi sekunder transformator (kV)

Besarnya persentase kenaikan beban yang dilayani dapat dihitung dengan :

$$\% \text{ pembebeanan} = \frac{I_{rata - rata \text{ beban}}}{I_{beban \text{ penuh transformator}}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.22)$$

dimana :

$I_{rata - rata \text{ beban}}$ = Arus rata – rata beban yang digunakan (A)

$I_{beban \text{ penuh transformator}}$ = Arus beban penuh transformator (A)

2.11 Ketidakseimbangan Beban⁸

Yang dimaksud dengan keadaan seimbang adalah suatu keadaan dimana:

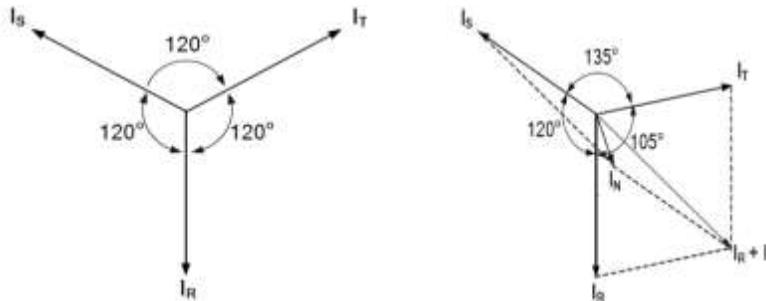
1. Ketiga vector arus / tegangan sama besar.
2. Ketiga vektor saling membentuk sudut 120.



Sedangkan yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang adalah keadaan dimana salah satu atau kedua syarat keadaan seimbang tidak terpenuhi. Kemungkinan keadaan tidak seimbang ada tiga, yaitu:

1. Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.
2. Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut 120° satu sama lain.
3. Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.

Pada gambar 2.26a menunjukkan diagram vektor arus dalam keadaan seimbang. Disini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , I_T) adalah sama dengan nol sehingga tidak muncul arus netral (I_N). Sedangkan pada gambar 2.26b menunjukkan vektor diagram arus yang tidak seimbang. Disini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , I_T) tidak sama dengan nol sehingga muncul sebuah besaran yaitu arus netral (I_N) yang besarnya bergantung dari seberapa besar faktor ketidakseimbangannya.



Gambar 2.15 Vektor Diagram Arus.



2.12 Perhitungan Ketidakseimbangan Beban⁹

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{IR+Is+IT}{3}$$

Dimana besarnya arus fasa dalam keadaan seimbang (I) sama dengan besarnya arus rata – rata, maka koefisien a, b dan c diperoleh dengan :

$$a = \frac{IR}{I} \dots\dots\dots(2.24)$$

$$b = \frac{Is}{I} \dots\dots\dots(2.25)$$

$$c = \frac{IT}{I} \dots\dots\dots(2.26)$$

Pada keadaan seimbang, besarnya koefisien a, b, dan c adalah 1. Dengan demikian rata – rata ketidakseimbangan beban (dalam %) adalah :

$$\% \text{ ketidakseimbangan} = \frac{\{|a-1|+|b-1|+|c-1|\}}{3} \times 100\% \dots\dots\dots(2.27)$$

2.13 Rugi-rugi Akibat Adanya Arus Netral Pada Saluran Netral Sekunder Transformator

Sebagai akibat dari ketidakseimbangan beban antara tiap-tiap fasa pada sisi sekunder trafo (fasa R, fasa S, fasa T) mengalirlah arus netral trafo. Arus yang mengalir pada penghantar netral trafo menyebabkan rugi-rugi. Rugi-rugi pada penghantar netral trafo ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N \dots\dots\dots(2.27)$$

Dimana:

P_N = Rugi-rugi pada penghantar netral trafo (watt)

I_N = Arus yang mengalir pada netral trafo (A)

R_N = Tahanan penghantar netral trafo (Ω).



2.14 ETAP (Electric Transient Analysis Program)²

PowerStation adalah software untuk power system yang bekerja berdasarkan plant (project). Setiap plant harus menyediakan modelling peralatan dan alat - alat pendukung yang berhubungan dengan analisa yang akan dilakukan. Misalnya generator, data motor, data kabel dll. Sebuah plant terdiri dari sub-sistem kelistrikan yang membutuhkan sekumpulan komponen listrik yang khusus dan saling berhubungan. Dalam PowerStation, setiap plant harus menyediakan data base untuk keperluan itu. ETAP PowerStation dapat melakukan penggambaran single line diagram secara grafis dan mengadakan beberapa analisa/studi yakni Load Flow (aliran daya), Short Circuit (hubung singkat), motor starting, harmonisa, transient stability, protective device coordination, dan cable derating. ETAP memungkinkan anda untuk bekerja secara langsung dengan diagram satu garis grafis dan sistem kabel bawah tanah *raceway*. Program ini telah dirancang berdasarkan tiga konsep kunci:

1. *Virtual reality operasi*

Program operasi menyerupai istemoperasi listrik nyata sedekat mungkin. Sebagai contoh, ketika membuka atau menutup sebuah pemutus sirkuit, tempat elemen dari layanan atau mengubah status operasi dari motor, under *de-energized* dan sub-sistem yang ditunjukkan pada diagram satu baris berwarna abu – abu. ETAP menggabungkan konsep – konsep baru untuk menentukan perangkat pelindung koordinasi langsung dari diagram satu garis.

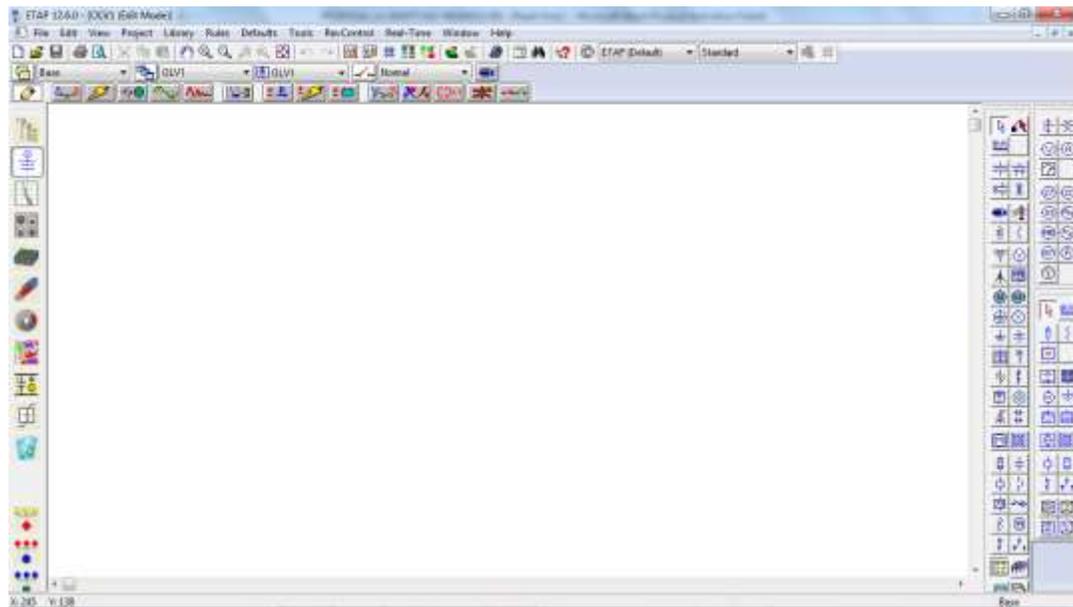
2. Integrasi total data

ETAP menggabungkan listrik, atribut logis, mekanik dan fisik dari elemen sistem dalam *database* yang sama. Misalnya, kabel tidak hanya berisi data yang mewakili sifat listrik dan dimensi fisik tapi

juga informasi yang menunjukkan *raceways* melalui yang disalurkan.

3. Kesederhanaan di data entri

ETAP melacak data rinci untuk setiap alat listrik. Editor data dapat mempercepat proses entri data dengan meminta data minimum untuk studi tertentu. Untuk mencapai hal ini, kita telah terstruktur editor properti dengan cara yang paling logis untuk memasukkan data untuk berbagi jenis analisis atau desain. ETAP diagram satu garis mendukung sejumlah fitur untuk membantu dalam membangun jaringan dari berbagai kompleksitas. Misalnya, setiap elemen secara individu dapat memiliki berbagai orientasi, ukuran dan simbol – simbol *display* (IEC atau ANSI). Diagram satu garis juga memungkinkan untuk menempatkan beberapa alat pelindung antara sirkuit cabang dan bus.



Gambar 2.16 Ruang Kerja Editor pada ETAP 12.6.



Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam bekerja ETAP adalah:

1. **One Line Diagram**, menunjukkan hubungan antar komponen/peralatan listrik sehingga membentuk sebuah sistem kelistrikan.
2. **Library**, informasi mengenai semua peralatan yang akan dipakai dalam sistem kelistrikan. Data elektrik maupun mekanis dari peralatan yang detail dapat mempermudah dan memperbaiki hasil simulasi/analisa.
3. **Standar yang dipakai**, biasanya mengacu pada standar IEC atau ANSI, frekuensi sistem dan metode – metode yang dipakai.
4. **Study Case**, berisikan parameter – parameter yang berhubungan dengan metode studi yang akan dilakukan dan format hasil analisa.

Standart yang dipakai pada program ETAP ini mengacu pada IEC dan ANSI. Perbedaan antar standart IEC dan ANSI terletak pada standart frekuensi yang digunakan yang mengakibatkan perbedaan spesifikasi peralatan yang digunakan. Jika pada standart IEC nilai frekuensi yang digunakan adalah 50Hz, sedangkan standart ANSI nilai frekuensi yang digunakan adalah 60Hz.

2.15 Elemen – Elemen Sistem Tenaga Listrik Pada ETAP²

Suatu sistem tenaga terdiri atas sub-sub bagian, salah satunya adalah aliran daya dan hubung singkat. Untuk membuat simulasi aliran daya dan hubung singkat, maka data-data yang dibutuhkan untuk menjalankan program simulasi antara lain:

1. Data Generator
2. Data Transformator
3. Data Kawat Penghantar
4. Data Beban
5. Data Bus



Gambar 2.17 Elemen-elemen yang Ada di ETAP 12.6.

Metode perhitungan ketidakseimbangan aliran daya pada software ETAP menggunakan metode *Current Injection*.



Gambar 2.18 Toolbar Unbalanced Load Flow di ETAP 12.6.

Gambar dari kiri ke kanan menunjukkan toolbar aliran daya, yaitu:

1. Run Unbalanced Load Flow adalah icon toolbar aliran daya yang menghasilkan atau menampilkan hasil perhitungan aliran daya system distribusi tenaga listrik dalam diagram satu garis.
2. Fault Insertion Open Phase A adalah icon untuk membuat beban tak seimbang.
3. Display Option adalah bagian tombol untuk menampilkan hasil aliran daya.
4. Alert View adalah icon untuk menampilkan batas kritis dan marginal dari hasil keluaran aliran daya sistem distribusi tenaga listrik.
5. Report Manager adalah icon untuk menampilkan hasil aliran daya dalam bentuk report yang dapat dicetak.