

BAB II

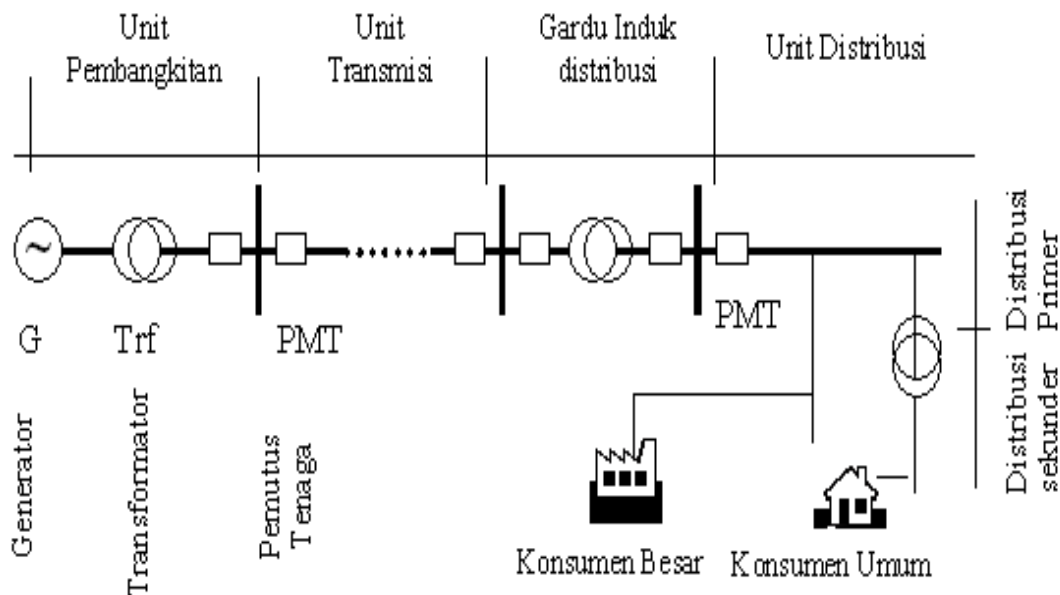
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Distribusi

Sistem Distribusi tenaga listrik adalah jaringan tenaga listrik yang memasok kelistrikan ke beban (Pelanggan) mempergunakan tegangan menengah 20kV dan tegangan rendah 220-380 V atau 231-400V. Jaringan distribusi dengan tegangan menengah 20kV disebut jaringan distribusi primer, dimana jaringannya mempergunakan, antara lain:

- Saluran kabel tegangan menengah (SKTM), mempergunakan kabel XLPE
- Saluran udara tegangan menengah (SUTM), mempergunakan kawat A3C, A2C, ACSR atau twisted cable.

Sumber kelistrikannya diperoleh dari garu induk atau Pusat Listrik Tenaga Diesel. Jaringan distribusindengan tegangan rendah 220/380V atau 231/400V disebut jaringan distribusi sekunder, dimana jaringannya mempergunakan kabel lilit (Twisted cable). Dan sumber kelistrikannya diperoleh dari gardu distribusi (gardu beton,portal dan cantol).



Gambar 2.1 Sistem Jaringan Distribusi

Sumber Abdul Kadir, *Disribusi dan Utilisasi Tenaga Listrik*, Universitas Indonesia, Jakarta, 2000, halaman 3.

2.2 Jaringan Distribusi Primer

Jaringan Distribusi Primer berfungsi untuk menyalurkan tenaga listrik dari pembangkit atau gardu induk ke gardu distribusi. Jaringan ini dikenal dengan feeder atau penyulang. Tegangan menengah yang digunakan PT. PLN adalah 12 kv dan 20 kv antar fasa. Macam-macam Jaringan Distribusi Primer :

2.2.1 Radial

Jaringan distribusi radial merupakan jaringan bentuk dasar, paling sederhana dan paling banyak digunakan. Dinamakan radial karena saluran ini ditarik secara radial dari suatu titik yang merupakan sumber dari jaringan itu, dan dicabang-cabang ke titik-titik beban yang dilayani seperti jaringan distribusi radial ditunjukkan pada gambar 2.2.

Catu daya berasal dari satu titik sumber dan karena adanya pencabangan-pencabangan tersebut, maka arus beban yang mengalir sepanjang saluran menjadi tidak sama besar. Oleh karena kerapatan arus (beban) pada setiap titik sepanjang saluran tidak sama besar, maka luas penampang konduktor pada jaringan bentuk radial ini ukurannya tidak harus sama. Maksudnya, saluran utama (dekat sumber) yang menanggung arus beban besar, ukuran penampangnya relatif besar, dan saluran cabang-cabangnya makin ke ujung dengan arus beban yang lebih kecil, ukurannya lebih kecil pula. Spesifikasi dari jaringan bentuk radial ini adalah:

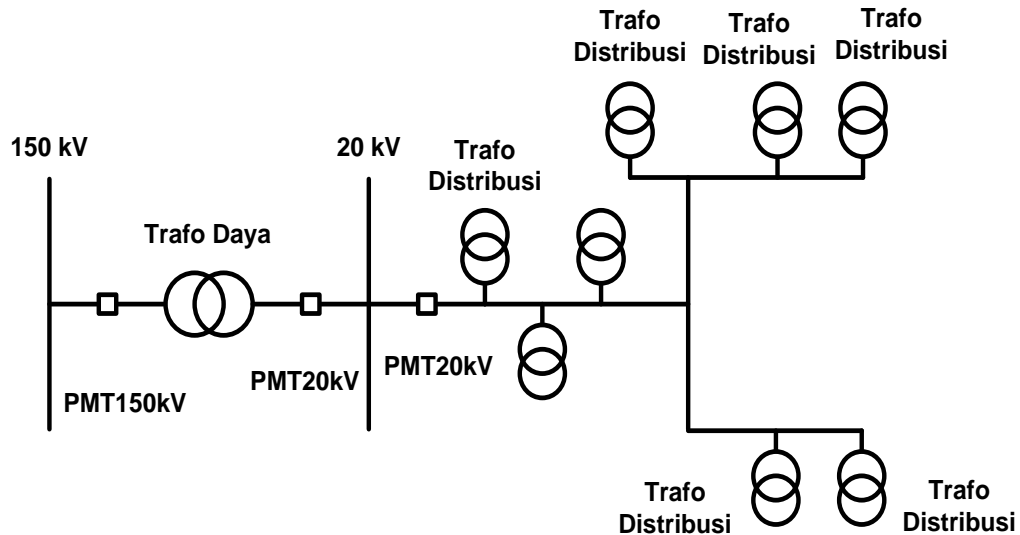
Kelebihan:

1. Bentuknya sederhana.
2. Biaya investasinya relatif murah.

Kelemahan:

1. Kualitas pelayanan dayanya relatif jelek, karena rugi tegangan dan rugi daya yang terjadi pada saluran relatif besar.
2. Kontinuitas pelayanan daya tidak terjamin, sebab antara titik sumber dan titik beban hanya ada satu alternatif saluran sehingga bila saluran tersebut

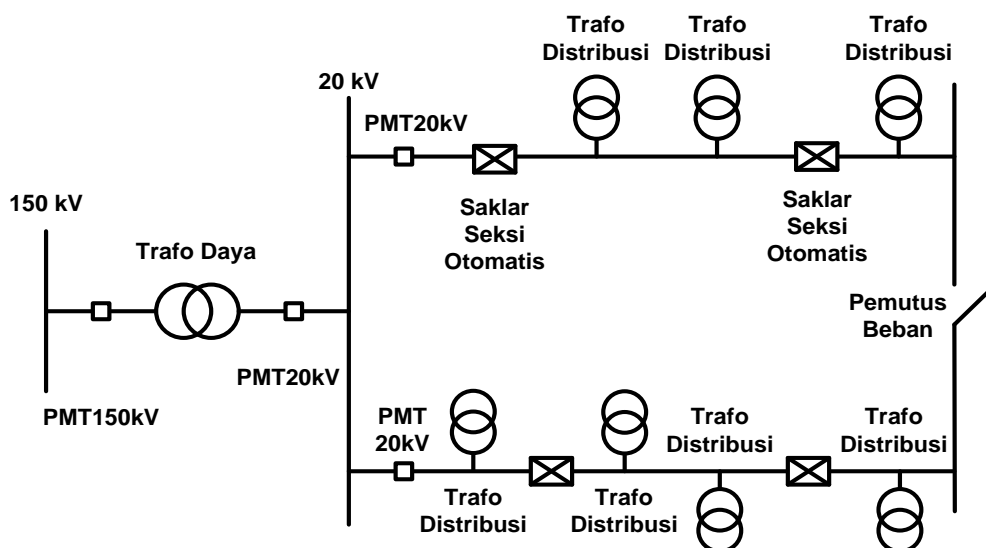
3. mengalami gangguan, maka seluruh rangkaian sesudah titik gangguan akan mengalami *black out* secara total.



Gambar 2.2 Konfigurasi Jaringan Radial

2.2.2 Melingkar atau *Loop*

Pada jaringan tegangan menengah struktur lingkaran (*Loop*) yang ditunjukkan pada gambar 2.3 dimungkinkan pemasokannya dari beberapa gardu induk, sehingga dengan demikian tingkat keandalannya relatif lebih baik.

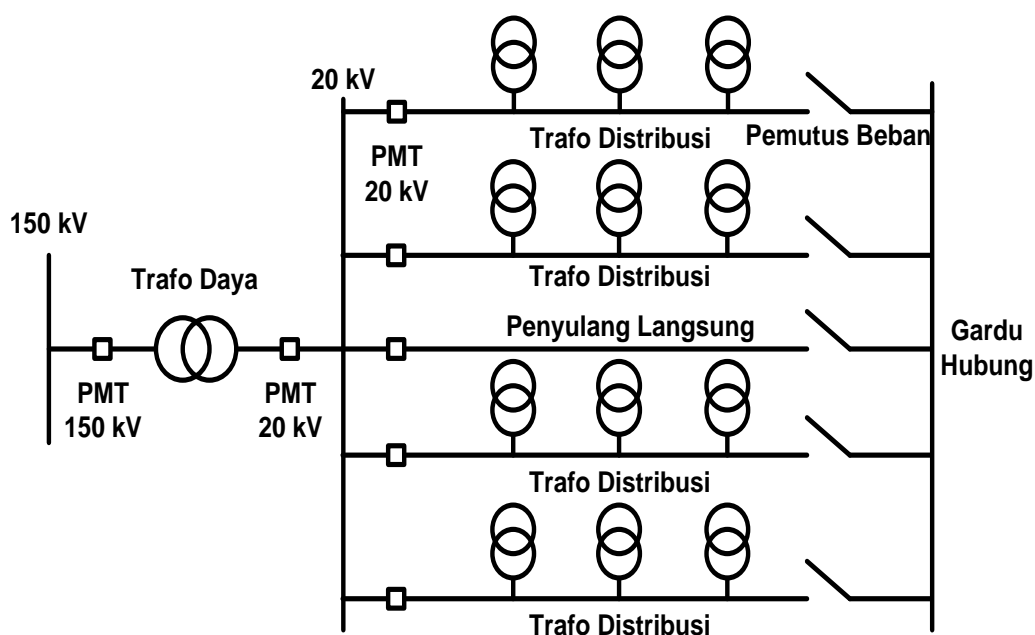


Gambar 2.3 Konfigurasi Jaringan *Loop*

Keuntungan lain dari sistem *loop* ini yaitu dapat menyalurkan daya listrik melalui satu atau dua saluran *feeder* yang saling berhubungan, bila terjadi gangguan pada saluran maka saluran yang lain dapat menggantikan untuk menyalurkan daya listrik, bila digunakan dua sumber pembangkit, kapasitas tegangan lebih baik dan regulasi tegangan cenderung kecil. Sama halnya dengan konfigurasi jaringan yang lain, selain memiliki keuntungan-keuntungan di atas, jaringan *loop* ini juga memiliki kekurangan, antara lain drop tegangan yang semakin besar dan bila beban yang dilayani bertambah, maka kapasitas pelayanan akan lebih jelek.

2.2.3 Spindle

Sistem spindle adalah suatu pola kombinasi jaringan dari pola radial dan *loop*. Pada jaringan spindle biasanya terdiri dari beberapa penyulang aktif dan sebuah penyulang cadangan (*express feeder*), fungsi “*express feeder*” dalam hal ini selain sebagai cadangan pada saat terjadi gangguan pada salah satu “*working feeder*”, dan juga berfungsi untuk memperkecil terjadinya drop tegangan pada sistem distribusi bersangkutan pada keadaan operasi normal, yang akan dihubungkan melalui gardu hubung. Konfigurasi jaringan distribusi spindle dapat dilihat pada gambar 2.4.

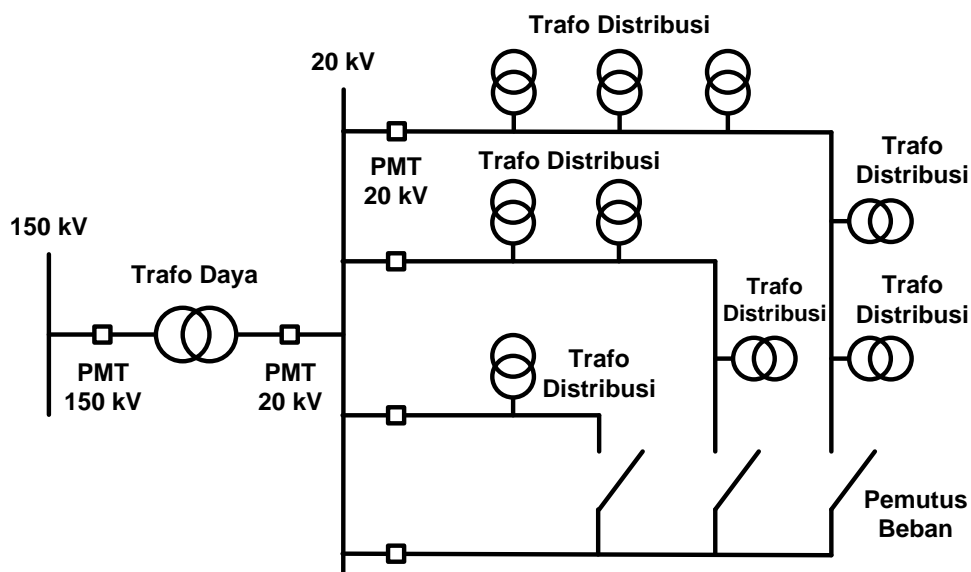


Gambar 2.4 Konfigurasi Jaringan *Spindle*

Keuntungan dan kerugian dalam sistem ini antara lain dari segi teknis lebih handal karena memiliki penyulang langsung (*express feeder*), pada kondisi normal *express feeder* tidak menampung beban sama sekali, jika *express feeder* lebih besar daripada *feeder* atau penyulang lain yang beroperasi akan lebih maksimal, dan lebih mudah bila jumlah *feeder* dalam satu spindel kurang dari empat *feeder*.

2.2.4 Gugus atau *Cluster*

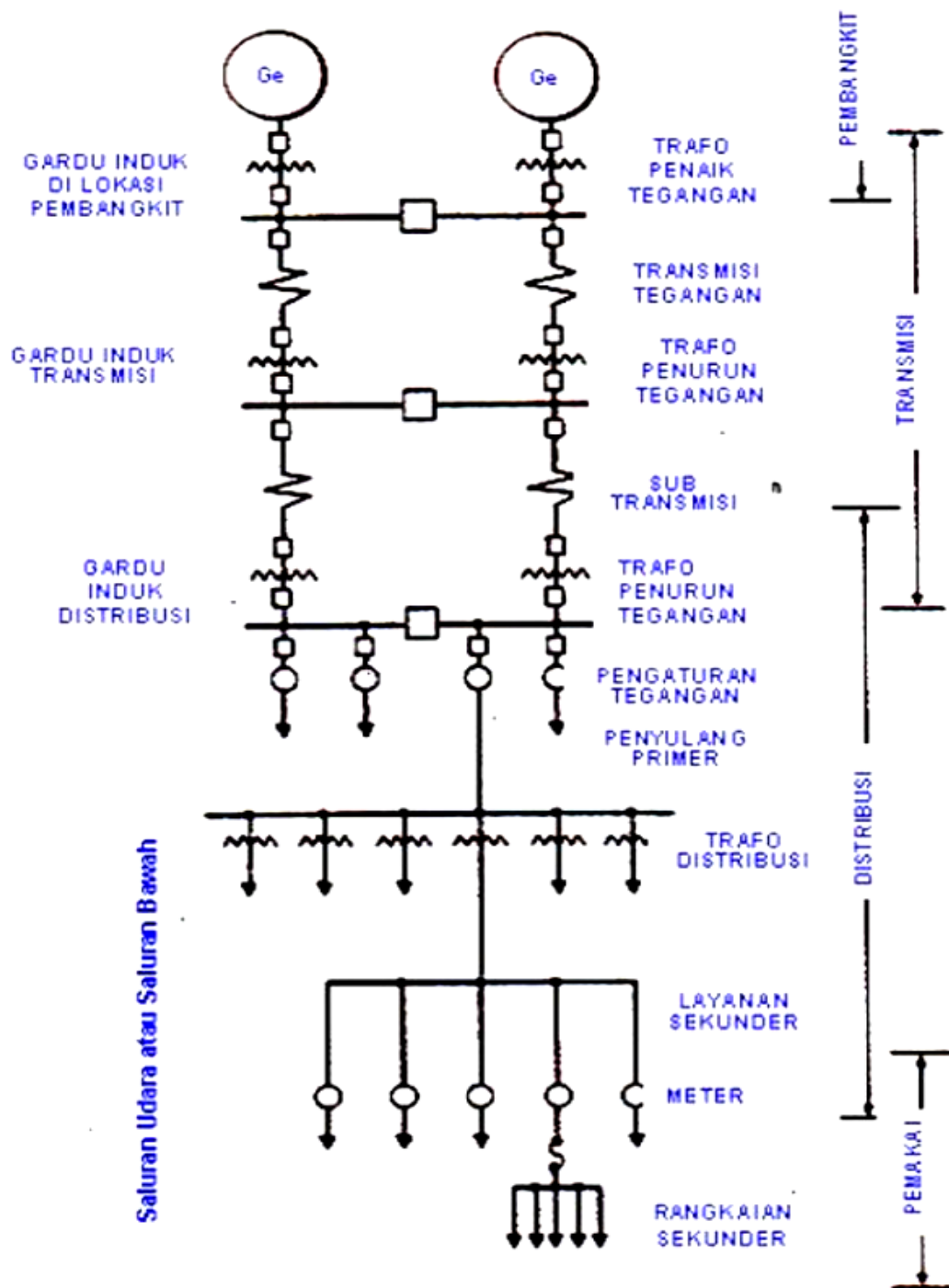
Konfigurasi gugus seperti dapat dilihat pada gambar 2.5 banyak digunakan untuk kota besar yang mempunyai kerapatan beban yang tinggi. Dalam sistem ini terdapat saklar pemutus beban dan penyulang cadangan. Dimana penyulang ini berfungsi bila ada gangguan yang terjadi pada salah satu penyulang konsumen maka penyulang cadangan inilah yang menggantikan fungsi suplai ke konsumen.



Gambar 2.5 Konfigurasi Jaringan *Cluster*

Sistem ini memiliki keuntungan sistem operasi yang lebih mudah disbanding dengan system spindle, tidak memerlukan tempat *switching* atau gardu hubung dalam satu tempat, panjang jaringan bisa lebih pendek untuk kawasan yang sama.

2.3 Pengelompokan Jaringan Distribusi Tenaga Listrik



Gambar 2.6 Konfigurasi Sistem Tenaga Listrik

Untuk kemudahan dan penyederhanaan, lalu diadakan pembagian serta pembatasan - pembatasan seperti pada Gambar diatas:



- Daerah I : Bagian pembangkitan (Generation)
- Daerah II : Bagian penyaluran (Transmission) , bertegangan tinggi (HV,UHV,EHV)
- Daerah III : Bagian Distribusi Primer, bertegangan menengah (6 atau 20kV).
- Daerah IV: (Di dalam bangunan pada beban/konsumen), Instalasi, bertegangan rendah.

2.4 Jaringan Distribusi Sekunder

Berdasarkan penempatan jaringan, jaringan tegangan rendah dibedakan menjadi dua:

2.4.1 Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR)

Saluran ini merupakan penghantar yang ditempatkan di atas tiang (di udara). Ada dua jenis penghantar yang digunakan, yaitu penghantar tak berisolasi(kawat) dan penghantar berisolasi (kabel). Penghantar tak berisolasi mempunyai berbagai kelemahan, seperti rawan pencurian dan rawan terjadi gangguan fasa-fasa maupun fasa-netral, tetapi memiliki keunggulan harga yang relatif murah dan mudah dalam hal pengusutan gangguan. Sedang penghantar berisolasi memiliki keuntungan dan kerugian yang saling berlawanan dengan penghantar tak berisolasi. Pada umumnya PT. PLN (Persero) menggunakan SUTR dengan isolasi (kabel pilin), dengan inti aluminium. Standar ukuran kabel yang digunakan adalah $3 \times 70 + 50 \text{ mm}^2$.

2.4.2 Saluran Kabel Tegangan Rendah (SKTR)

Saluran ini menempatkan kabel di bawah tanah, tujuan utama penempatan di bawah tanah pada umumnya karena alasan estetika, sehingga penggunaan SKTR umumnya adalah kompleks perumahan dan daerah perindustrian. Keuntungan penggunaan kabel ini adalah estetika yang lebih indah, tidak terganggu oleh pengaruh-pengaruh cuaca. Kelemahan kabel ini adalah jika terjadi

gangguan sulit menemukan lokasinya dan jika terjadi pencurian dengan suntikan di bawah tanah petugas P2TL kesulitan mengungkapnya.

2.5 Transformator

Transformator adalah suatu perlengkapan listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip-prinsip induksi magnetic (Zuhal, 1975).

Kerja transformator yang berdasarkan induksi elektromagnetik menghendaki adanya gandengan magnet antara rangkaian primer dan rangkaian sekunder. Gandengan magnet ini berupa inti besi tempat melakukan fluks bersama. Berdasarkan sifat tegangan masukan dan keluarannya, transformator dibedakan menjadi dua jenis, yaitu :

- a. Transformator penaik tegangan (*step up*), di mana tegangan pada terminal belitansekunder (output) lebih besar dari pada tegangan pada terminal belitan primer (input)
- b. Transformator penurun tegangan (*step down*), di mana tegangan pada terminal belitan sekunder (output) lebih kecil dari pada tegangan pada terminal belitan primer (input).

Berdasarkan pemakaian di dalam bidang tenaga listrik, transformator dibedakan menjadi :

1. Transformator daya, digunakan pada sistem transmisi tegangan tinggi atau sistem transmisi tegangan ekstra tinggi. Transformator ini ditempatkan pada suatu gardu induk.
2. Transformator distribusi, digunakan pada sistem distribusi tenaga listrik yang berfungsi sebagai penurun tegangan, dari tegangan menengah menjadi tegangan rendah. Transformator ini ditempatkan pada suatu gardu distribusi atau ditempatkan pada tiang distribusi.



3. Transformator pengukuran, yang berfungsi untuk membantu dalam pengukuran listrik.

2.6 Transformator Distribusi

Transformator distribusi yang umum digunakan adalah *transformator stepdown* 20 / 0,4 kV, tegangan fasa-fasa sistem JTR adalah 380 Volt karena terjadidrop 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.

2.6.1 Bentuk Dan Konstruksi Transformator

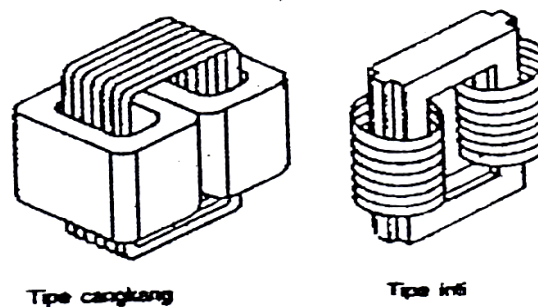
Konstruksi transformator distribusi terdiri dari beberapa bagian :

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 daritransformator ke rangkaian luar, (pada trnasformator 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.
2. Transformator jenis cangkang (*shell type*), inti transformator ini mengelilingi belitannya.



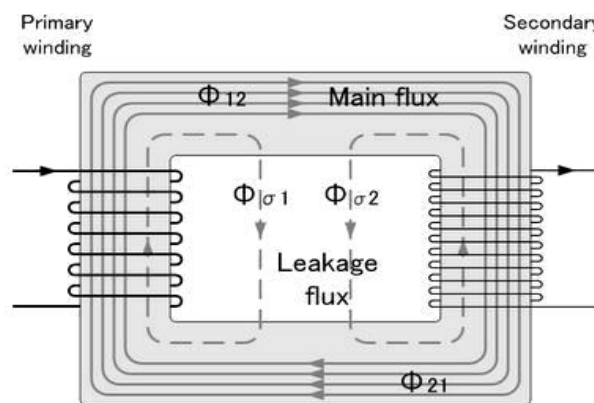
Gambar 2.7 Tipe Kumbaran Transformator

2.6.2 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 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 induksi bersama (*mutual induction*) yang menyebabkan timbulnya fluks magnet di kumparan sekunder, maka mengalirlah arus sekunder jika rangkaian sekunder di

beban, sehingga energi listrik dapat di transfer secara keseluruhan (secara magnetisasi) Adapun gambar prinsip kerja transformator dapat dilihat pada gambar 2.8.

Jika pada sisi kumparan primer transformator diberi arus bolak-balik, maka pada kumparan tersebut akan timbul sejumlah garis-garis gaya magnet atau fluksi. Garis gaya magnet selalu berubah-ubah menurut bentuk gelombang sinusoidal yang mengakibatkan pada kumparan sisi primer terjadi induksi.



Gambar 2.8Prinsip Kerja Transformator

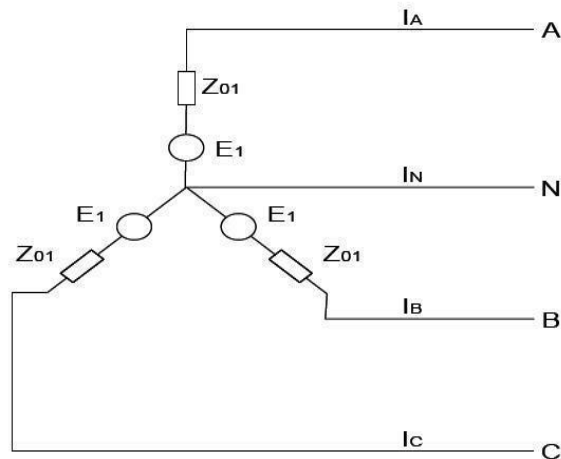
Kumparan sekunder akan menerima garis gaya magnet atau fluksi yang berubah-ubah dan mempunyai harga yang sama dengan jumlah garis gaya yang dikeluarkan sisi primer, sehingga pada sisi sekunder terjadi induksi. Besarnya ggl induksi yang dihasilkan masing-masing kumparan berbanding lurus dengan jumlah lilitannya.

2.7 Hubungan Tiga Fasa Dalam Transformator

Secara umum hubungan belitan tiga fasa terbagi atas dua jenis, yaitu hubungan wye (Y) dan hubungan masing belitan delta ini (Δ). Masing-masing hubungan belitan ini memiliki karakteristik arus dan tegangan yang berbeda-beda, baik sisi primer maupun sekunder masing-masing dapat dihubungkan wye ataupun delta. Kedua hubungan ini dijelaskan secara terpisah, yaitu :

2.7.1 Hubungan Wye (Y)

Hubungan ini dapat dilakukan dengan menggabungkan ketiga belitan transformator yang memiliki rating yang sama.



Gambar 2.9 Hubungan Wye

Dari gambar 2.9 dapat diketahui sebagai berikut:

$$I_A = I_B = I_C = I_{L-L} \text{ (ampere)}$$

$$I_{L-L} = I_{ph} \text{ (ampere) } \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan :

$$I_{L-L} = \text{Arus fasa - fasa,}$$

$$I_{ph} = \text{Arus fasa - netral}$$

Dan,

$$V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = V_{L-L} \text{ (volt)}$$

$$V_{L-L} = \sqrt{3} \cdot V_{ph} = \sqrt{3} \cdot E_1 \text{ (volt) } \dots\dots\dots (2.2)$$

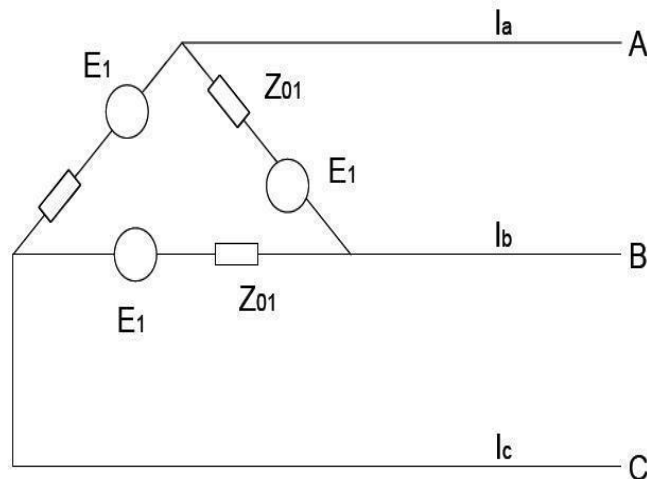
Keterangan :

$$V_{L-L} = \text{Tegangan fasa - fasa,}$$

$$V_{PH} = \text{Tegangan fasa - netral}$$

2.7.2 Hubungan Delta (Δ)

Hubungan delta ini juga mempunyai tiga buah belitan dan masing-masing memiliki rating yang sama.



Gambar 2.10 Hubungan Delta

$$I_A = I_B = I_C = I_{L-L} \text{ (ampere)}$$

$$I_{L-L} = \sqrt{3} I_{PH} \text{ (ampere) } \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan :

I_{L-L} = Arus fasa - fasa

I_{ph} = Arus fasa – netral

Dan,

$$V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = V_{L-L} \text{ (volt)}$$

$$V_{L-L} = V_{PH} = E_1 \text{ (volt) } \dots\dots\dots (2.4)$$

Keterangan :

V_{L-L} = Tegangan fasa - fasa

V_{PH} = Tegangan fasa – netral



2.8 Perhitungan Arus Beban Penuh Dan Pembebanan Transformator

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

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \dots\dots\dots(2.5)$$

Keterangan :

S = daya transformator (VA)

V = tegangan sisi primer transformator (V)

I = arus jala-jala (A)

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

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V} \dots\dots\dots(2.6)$$

Keterangan :

I_{FL} = arus beban penuh (A)

S = daya transformator (VA)

V = tegangan sisi sekunder transformator (V)

Besarnya persentase kenaikan beban yang di layani dapat dihitung dengan :

$$\% \text{ Pembebanan} = \frac{I_{rata-rata \text{ beban}}}{I_{\text{beban penuh Transformator}}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.7)$$

Keterangan :

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

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



2.9 Rugi-rugi Transformator

Rugi-rugi pada transformator dapat digolongkan dalam dua keadaan, yaitu keadaan tanpa beban dan keadaan berbeban.

2.9.1 Rugi-rugi Transformator Tanpa Beban

Rugi-rugi yang terjadi pada transformator tanpa beban adalah rugi besi atau rugi inti, yang terdiri dari rugi histerisis dan rugi arus eddy. Rugi histerisis timbul akibat fluks bolak-balik pada inti besi, yang dinyatakan sebagai :

$$P_h = K_h \cdot F \cdot B_m^{1.6} \text{ watt} \dots\dots\dots (2.8)$$

Rugi arus eddy timbul akibat adanya arus pusar pada inti besi, yang dinyatakan sebagai :

$$P_e = K_e \cdot F^2 \cdot B_m^2 \text{ watt} \dots\dots\dots (2.9)$$

Keterangan :

B_m = rapat fluksi maksimum (φ / m^2)

K_h = konstanta histerisis, tergantung pada bahan inti

K_e = konstanta arus eddy, tergantung pada volume inti

F = frekuensi jala-jala (Hz)

Dari persamaan rugi-rugi transformator tanpa beban, dapat diketahui besarnya total rugi inti (besi).

$$P_{total \text{ inti}} = P_h + P_e$$

$$(K_h \cdot F \cdot B_m^{1.6}) + (K_e \cdot F^2 \cdot B_m^2) \dots\dots\dots (2.10)$$

Besarnya rugi-rugi inti ditentukan berdasarkan hasil pengesanan transformator, namun secara teoritis dapat dicari berdasarkan nilai (harga) pembebanan yang berbeda dan bekerja pada efisiensi dan faktor daya yang sama.

2.9.2 Rugi-rugi Transformator Berbeban

Rugi-rugi yang terjadi pada transformator berbeban besarnya selalu berubah-ubah, hal ini tergantung pada arus beban yang mengalir pada tahanan transformator. Besarnya arus beban ini tergantung pada beban yang dioperasikan transformator. Sehingga rugi transformator dalam keadaan berbeban merupakan perkalian kwadrat arus dengan tahanan transformator, yang dikenal sebagai rugi tembaga (P_{cu}), rugi tembaga kumparan primer dan sekunder berturut-turut adalah :

$$P_{CU1} = I_1^2 \cdot R_1 \dots \dots \dots (2.11)$$

$$P_{CU2} = I_2^2 \cdot R_2 \dots \dots \dots (2.12)$$

dengan demikian rugi tembaga total adalah :

$$\begin{aligned} P_{CU} &= P_{CU1} + P_{CU2} \\ &= I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 \dots \dots \dots (2.13) \end{aligned}$$

Karena $I_2 = a I_1$, maka persamaan dapat juga ditulis dengan

$$\begin{aligned} &= I_1^2 (R_1 + a^2 R_2) \\ &= I_1^2 R_{ek1} \dots \dots \dots (2.14) \end{aligned}$$

Jumlah total rugi-rugi pada transformator adalah :

$$P_{\text{rugi total}} = \text{Rugi } cu + \text{Rugi inti} \dots \dots \dots (2.15)$$

2.10 Ketidakseimbangan Pembebanan Pada Trafo Distribusi

Ketidakseimbangan beban pada suatu sistem distribusi tenaga listrik selalu terjadi dan penyebab ketidakseimbangan tersebut adalah pada beban-beban satu fasa pada pelanggan jaringan tegangan rendah. Akibat ketidakseimbangan beban tersebut muncullah arus di netral trafo. Arus yang mengalir di netral trafo ini menyebabkan terjadinya losses (rugi-rugi), yaitu losses akibat adanya arus netral pada penghantar netral trafo dan losses akibat arus netral yang mengalir ke tanah.

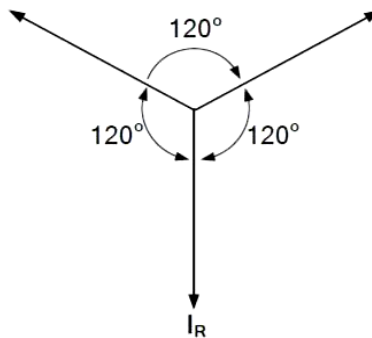
2.10.1 Ketidakseimbangan Beban

Yang dimaksud dengan keadaan seimbang adalah suatu keadaan dimana ketiga vektor arus / tegangan sama besar atau ketika 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:

Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.

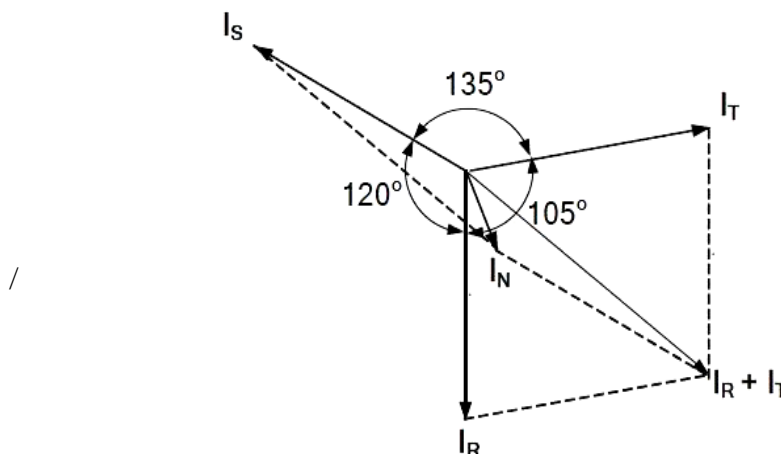
Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut 120° satu sama lain.

Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.



Gambar 2.11 Vektor Diagram Arus Keadaan Seimbang

Gambar 2.10 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).



Gambar 2.12 Vektor Diagram Arus Keadaan Tidak Seimbang



Sehingga rumus yang digunakan untuk menghitung arus pada penghantar netral ialah sebagai berikut :

$$I_N = I_R + I_S + I_T \dots\dots\dots(2.16)$$

$$I_N = I_R \angle 0^\circ + I_S \angle 120^\circ + I_T \angle 240^\circ$$

$$I_N = I_R (\cos 0^\circ + j \sin 0^\circ) + I_S (\cos 120^\circ + j \sin 120^\circ) + I_T (\cos 240^\circ + j \sin 240^\circ)$$

2.10.2 Penyebab Ketidakseimbangan

Pada dasarnya, ada 3 sumber penyebab terjadinya ketidakseimbangan sistem 3 fasa ini, yaitu :

1. Tidak seimbang tegangan sejak pada sumbernya

Tegangan tak simetris pada output generator 3 fasa bisa saja terjadi (walaupun jarang) karena kesalahan teknis pada ketiga berkas kumparan dayanya (jumlah lilitan atau resistansi).

2. Tidak seimbang tegangan pada salurannya

Hal demikian dapat disebabkan oleh beberapa faktor, antara lain:

Konfigurasi ketiga saluran secara total tidak seimbang, sehingga total kapasitansinya tidak seimbang. Keadaan demikian dapat terjadi pada penyaluran jarak jauh dan bertegangan tinggi, dimana jarak rata-rata masing-masing saluran fasa terhadap tanah tidak sama.

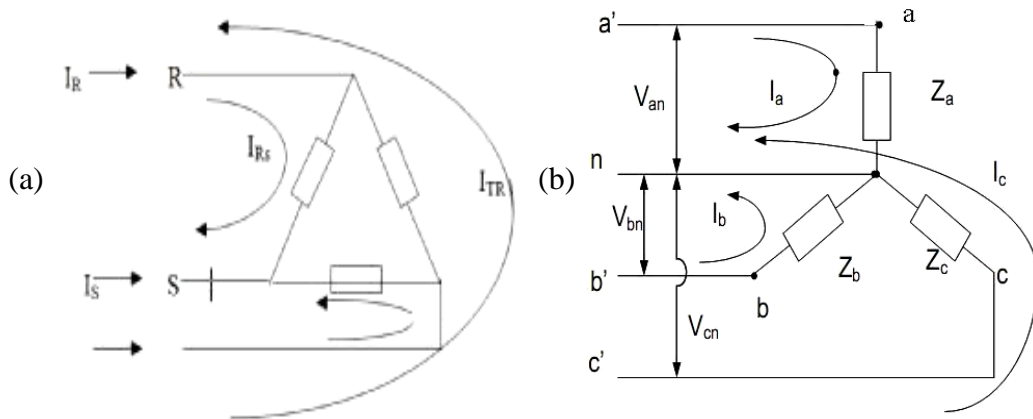
- A. Resistansi saluran tidak sama karena jenis bahan konduktor yang berbeda.
- B. Resistansi saluran tidak sama karena ukuran konduktor tidak sama.
- C. Resistansi saluran tidak sama karena jarak antara masing-masing saluran fasa dengan beban tidak sama (besar R dipengaruhi oleh jarak *l*).

3. Tidak seimbang pada resistansi bebannya

Besar I (arus beban) ditentukan oleh besar R (beban), maka pada keadaan tidak seimbang: $R_R \neq R_S \neq R_T$, maka arus bebannya: I_R kondisi tak seimbang pada tegangan sisi terima, tidak seimbangnnya beban ini adalah suatu hal yang paling sering terjadi dalam praktek, antara lain oleh adanya sambungan-sambungan di luar perhitungan dan perencanaan. Upaya teknis memang perlu dilakukan, agar diperoleh keadaan pembebanan yang seimbang.

Pada sistem 3 fasa yang menggunakan saluran netral, dalam keadaan beban simetris maka arus yang lewat saluran nol adalah benar-benar nol (netral), tetapi bila terjadi keadaan tak simetris, maka sebagian arus (berupa arus resultan) akan lewat saluran netral ini, sehingga saluran tersebut menjadi tidak netral lagi.

Penyelesaian beban tak seimbang untuk hubungan bintang adalah sebagai berikut pada sistem 4 kawat, masing-masing fase akan mengalirkan arus yang tak seimbang menuju Netral (pada sistem empat kawat). Sedangkan pada sistem tiga kawat akan mengakibatkan tegangan yang berubah cukup signifikan dan meunculkan suatu netral yang berbeda dari netral yang semestinya.



Gambar 2.13 Beban Tak Seimbang Terhubung Delta (a) dan Wye (b)

2.10.3 Penyaluran Daya Pada Keadaan Tidak Seimbang

Misalnya daya sebesar P disalurkan melalui suatu saluran dengan penghantar netral. Apabila pada penyaluran daya ini arus-arus fasa dalam keadaan seimbang, maka besarnya daya dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$P = 3 \cdot [V] \cdot [I] \cdot \cos\phi \dots\dots\dots (2.17)$$

Sumber Moh. Dahlan, *Akibat Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses Pada Transformator Distribusi*, Kudus, halaman 4.



Keterangan :

P = daya pada ujung kirim

I = arus kirim

V = tegangan pada ujung kirim

$\cos \varphi$ = faktor daya

Daya yang sampai ujung terima akan lebih kecil dari P karena terjadi penyusutan dalam saluran. Penyusutan daya ini dapat diterangkan dengan menggunakan diagram fasor tegangan saluran model fasa tunggal seperti terlihat pada gambar 2.9.

Jika $[I]$ adalah besaran arus fasa dalam penyaluran daya sebesar P pada keadaan seimbang, maka pada penyaluran daya yang sama tetapi dengan keadaan tak seimbang besarnya arus-arus fasa dapat dinyatakan sebagai koefisien a, b dan c sebagai berikut :

$$[I_R]=a[I], [I_S]=b[I], [I_T]=c[I] \dots\dots\dots(2.18)$$

Dengan I_R, I_S dan I_T berturut-turut adalah arus di fasa R, S dan T.

Bila faktor data di ketiga fasa dianggap sama walaupun besarnya arus berbeda, besarnya daya yang disalurkan dapat dinyatakan sebagai :

$$P = (a+b+c) \cdot [V] \cdot [I] \cdot \cos \varphi \dots\dots\dots(2.19)$$

2.10.4 Perhitungan Ketidakseimbangan Beban

$$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \dots\dots\dots(2.22)$$

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

$$a = \frac{I_R}{I}, b = \frac{I_S}{I}, c = \frac{I_T}{I} \dots\dots\dots(2.23)$$



Apabila persamaan (2.17) dan persamaan (2.18) menyatakan daya yang besarnya sama, maka dari kedua persamaan itu dapat diperoleh persyaratan untuk koefisien a,b dan c yaitu :

$$a + b + c = 3$$

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

$$\% \text{ ketidakseimbangan} = \frac{[|a-1|+|b-1|+|c-1|]}{3} \times 100\% \dots\dots\dots (2.24)$$

Dengan anggapan yang sama, arus yang mengalir di penghantar netral dapat dinyatakan sebagai :

$$\begin{aligned} I_N &= I_R + I_S + I_T \\ &= I_a \angle 0^\circ + I_b \angle 120^\circ + I_c \angle 240^\circ \dots\dots\dots (2.20) \\ &= I_a (\cos 0^\circ + j \sin 0^\circ) + I_b (\cos 120^\circ + j \sin 120^\circ) + I_c (\cos 240^\circ + j \sin 240^\circ) \\ &\dots\dots\dots (2.21) \end{aligned}$$

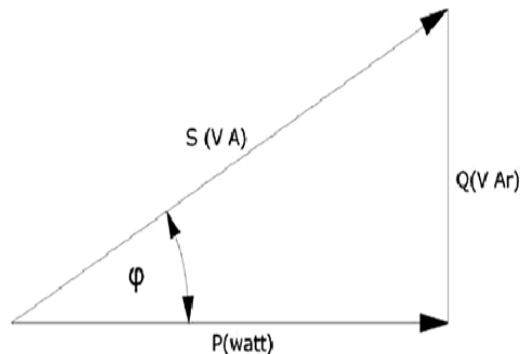
2.11 Faktor Daya

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

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

Faktor Daya = $\cos \varphi$

Untuk menjelaskan tentang daya-daya dapat dilihat pada segitiga daya berikut ini:



Gambar 2.14Segitiga Daya

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

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

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

2.12 Losses 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:

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N \dots \dots \dots (2.25)$$

Keterangan :

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).

Sedangkan rugi-rugi yang diakibatkan karena arus netral yang mengalir ke tanah (ground) dapat dihitung dengan perumusan sebagai berikut :



$$P_G = I_G^2 \cdot R_G \dots \dots \dots (2.26)$$

Keterangan :

P_G = rugi-rugi akibat arus netral yang mengalir ke tanah (watt)

I_G = arus netral yang mengalir ke tanah (A)

R_G = tahanan pembumian netral trafo (Ω)

2.13 *Electric Transient And Analysis Program (ETAP)*

ETAP 12.6.0 adalah suatu *software* snslidi yang *comprehensive* untuk mendesain dan mensimulasikan suatu sistem rangkaian tenaga. Analisis yang ditawarkan oleh ETAP yang digunakan oleh penulis adalah *drop tegangan* dan *losses* jaringan. ETAP juga bisa memberikan *warning* terhadap bus-bus yang *under voltage* dan *over voltage* sehingga pengguna bisa mengetahui bus mana yang tidak beroperasi secara optimal. Untuk menganalisa suatu rangkaian diperlukan data rangkaian secara lengkap dan akurat sehingga hasil dari perhitungan di software ETAP bisa dipertanggungjawabkan.

ETAP mengintegrasikan data-data rangkaian tenaga listrik seperti kapasitas pembangkit, panjang jaringan, resistansi jaringan per kilometer, kapasitas busbar, rating trafo, impedansi urutan nol, positif dan negatif suatu peralatan listrik seperti trafo, generator, dan penghantar. 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 sistem operasi listrik nyata sedekat mungkin. Sebagai contoh, ketika membuka dan menutup sebuah pemutus sirkuit, tempat elemen dari layanan atau mengubah status operasi dari motor. *Under deenergized* 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, mekanil dan fisik dari elemen sistem dalam *database* yang sama. Misalnya, kabel tidak berisi data yang mewakili sifat listrik dan dimensi fisik tapi juga informasi yang menunjukkn *raceways* melalui yang disalurkan.

3. Kesederhanaan di data entri

ETAP melacak data secara rinci untuk setiap alat listrik. Editor data dapat mempercepat proses entri data dengan meminta data minimum untuk studi tertentu. Untuk mencapai hal ini, telah terstruktur editor pada propertis dengan cara yang paling logis untuk memasukkan data untuk berbagai 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 dan ANSI). Diagram satu garis juga memungkinkan untuk menempatkan beberapa alat pelindung antara sirkuit cabang dan bus.

ETAP menyediakan berbagai pilihan untuk menampilkan atau melihat sistem listrik. Pandangan ini disebut dengan presentasi lokasi, ukuran orientasi dan simbol setiap unsur dapat berbeda di masing-masing presentasi. Selain itu, alat pelindung dan *relay* dapat ditampilkan (terlihat) atau disembunyikan (tidak terlihat) untuk presentasi tertentu. Misalnya, satu presentasi dapat menggunakan tampilan relay dimana semua perangkat pelindung ditampilkan. Di presentasi yang lain mungkin menunjukkan diagram satu garis dengan beberapa pemutus sirkuit ditampilkan dan sisanya tersembunyi (tata letak paling cocok untuk hasil aliran beban).

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam bekerja menggunakan *software* ETAP adalah :

1. ***One Line Diagram***, menunjukkan hubungan antar komponen/peralatan listrik sehingga membentuk sebuah sistem kelistrikan.



2. **Library**, informasi mengenai skema peralatan yang akan dipakai di dalam sistem kelistrikan. Data elektris 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.

2.13.1 Mempersiapkan *plant*

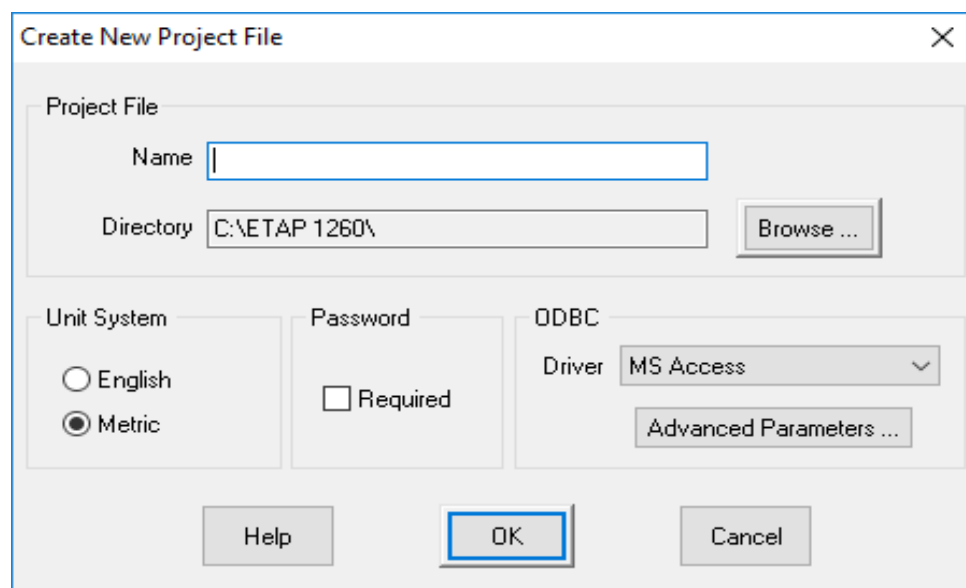
Persiapan yang perlu dilakukan dalam analisa/desain dengan bantuan ETAP adalah :

1. *Single line diagram*
2. Data peralatan baik elektris maupun mekanis
3. *Library* untuk mempermudah mengedit data

2.13.2 Membuat proyek baru

Berikut ini merupakan langkah-langkah untuk membuat proyek baru pada *software* ETAP :

1. Klik tombol *New* atau klik menu file lalu akan muncul kotak dialog sebagai berikut.



Gambar 2.15 Membuat file proyek baru



2. Lalu ketik nama di kolom *project file*. Lalu klik OK
3. Lalu akan muncul kotak dialog *User Information* yang berisi data pengguna *software*. Isi nama dan deskripsikan proyek yang akan dibuat. Kemudian klik OK
4. *File* proyek baru telah dibuat dan siap untuk menggambar *one line diagram*

2.13.3 Menggambar single line

Menggambar *single line diagram* dilakukan dengan cara memilih simbol peralatan listrik pada menu bar disebelah kanan layar. Klik pada simbol, kemudian arahkan kursor pada media gambar. Untuk menempatkan peralatan pada media gambar, klik kursor pada media gambar. Untuk mempercepat proses penyusunan *single line diagram*, semua komponen dapat dilatakan secara langsung pada media gambar. Untuk mengetahui kontinuitas antar komponen dapat dicek dengan *Continuity Check* pada menu bar utama.

Pemakaian *Continuity Check* dapat diketahui hasilnya dengan melihat warna komponen/*branch*. Warna hitam berarti telah terhubung, warna abu-abu berarti belum terhubung.