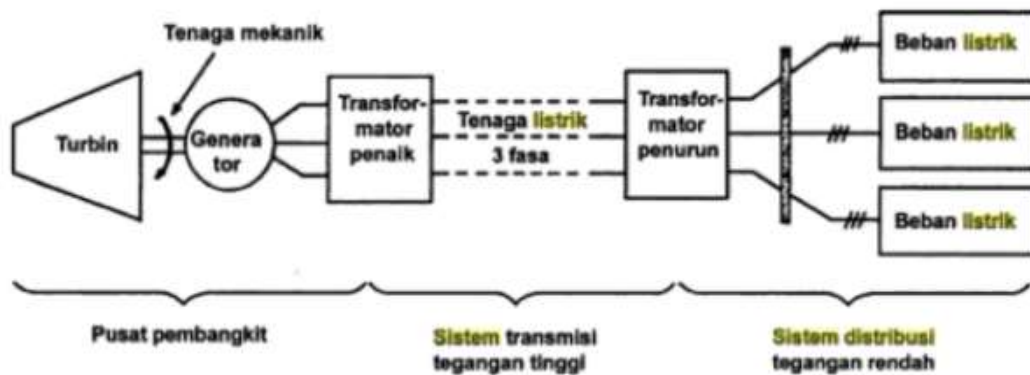


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan rangkaian instalasi tenaga listrik yang kompleks yang terdiri dari pusat pembangkit, saluran transmisi, dan jaringan distribusi yang dioperasikan secara serentak dalam rangka penyediaan tenaga listrik (Pasal 1 angka 6 UU No 20 Tahun 2002 tentang ketenagalistrikan). Sedangkan menurut Zuhail & Zhanggischian (2004: 10), sistem tenaga listrik digambarkan dalam suatu diagram tenaga listrik seperti pada gambar 2.1 dibawah ini:



Gambar 2.1 Diagram Sistem Tenaga Listrik

Sumber : Zuhail & Zhanggischian (2004:10)

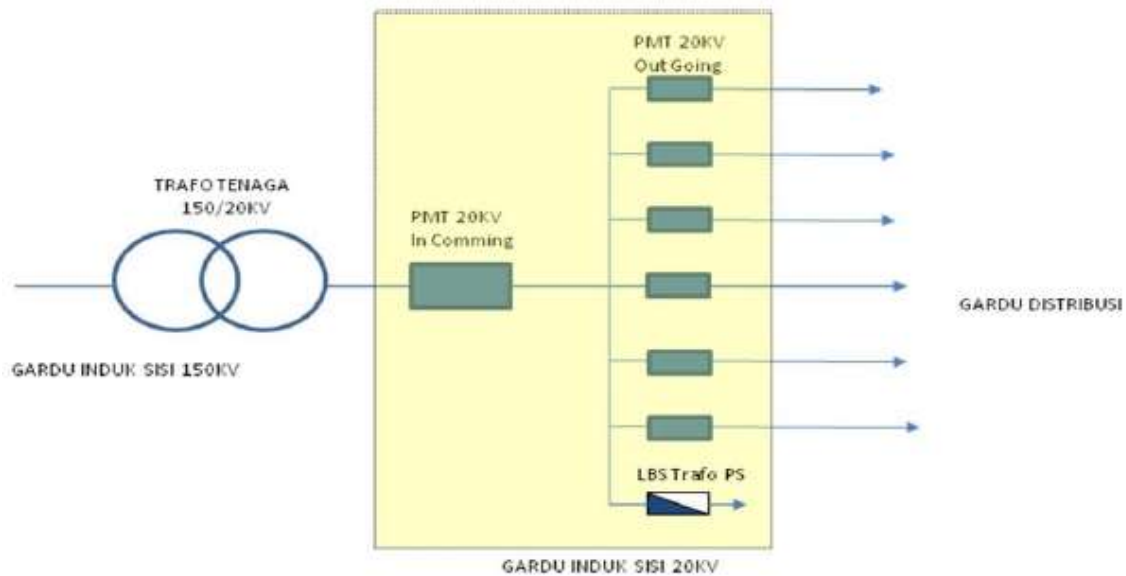
Pembangkit listrik adalah suatu rangkaian alat atau mesin yang mengubah energi mekanikal untuk menghasilkan energi listrik, biasanya rangkaian alat itu terdiri dari turbin dan generator listrik. Fungsi dari turbin adalah untuk memutar rotor dari generator listrik, sehingga dari putaran rotor itu dihasilkan energi listrik. Listrik yang dihasilkan dinaikkan dulu voltasenya menjadi 150 kV s/d 500 kV melalui Trafo *Step Up*. Penaikan tegangan ini berfungsi untuk mengurangi kerugian akibat hambatan pada kawat penghantar dalam proses transmisi. Dengan tegangan yang ekstra tinggi maka arus yang mengalir pada kawat penghantar menjadi kecil. Tegangan yang sudah dinaikkan kemudian ditransmisikan melalui jaringan Saluran



Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) ke Gardu Induk/GI, untuk diturunkan voltasenya menjadi tegangan menengah 20 kV, kemudian tegangan menengah disalurkan melalui Jaringan Tegangan Menengah (JTM), ke trafo-trafo distribusi. Di trafo-trafo distribusi voltasenya diturunkan dari 20 kV menjadi 220 volt dari trafo-trafo distribusi disalurkan melalui Jaringan Tegangan Rendah (JTR) ke pelanggan listrik (Suyitno, 2011: 81).

Kegiatan distribusi listrik (*electricity distribution*) menurut Esmeralda, dkk (2009: 33) merupakan tahap akhir dari penyampaian listrik kepada para pelanggan. Jaringan distribusi listrik biasanya meliputi pengadaan jaringan listrik tegangan rendah dan menengah (di bawah 50 kV), pembangunan gardu-gardu pendukung atau *substations* dan sejumlah transformator (untuk menurunkan tegangan listrik sampai ke tingkatan yang langsung dapat digunakan konsumen, yakni 100-230 V), jaringan kabel dan tiang listrik bertegangan rendah (biasanya yang memiliki tegangan di bawah 1000 V), jaringan kabel distribusi, sampai dengan pengadaan meteran-meteran listrik.

Tegangan sistem distribusi dapat dikelompokkan menjadi 2 bagian besar, yaitu distribusi primer dan distribusi sekunder. Jaringan distribusi 20 kV sering disebut jaringan distribusi sekunder atau Sistem Distribusi Tegangan Menengah sedangkan jaringan distribusi 380/220 V sering disebut jaringan distribusi sekunder atau Jaringan Tegangan Rendah 380/220 V, dimana tegangan 380 V merupakan besar tegangan antar fasa dan tegangan 220 V merupakan tegangan fasa-netral. Sistem distribusi sekunder seperti pada gambar 2.2 merupakan salah satu bagian dalam sistem distribusi, yaitu mulai dari trafo tenaga gardu induk hingga ke gardu distribusi.



Gambar 2.2 Sistem Distribusi Primer 20 KV

Sumber : <http://mtrpagi.blogspot.co.id/2012/09/pengetahuan-dasar-gardu-induk-20-kv.html>

Dari saluran distribusi primer inilah gardu-gardu distribusi mengambil tegangan untuk diturunkan tegangannya dengan trafo distribusi menjadi sistem tegangan rendah, yaitu 220/380 Volt. Selanjutnya disalurkan oleh saluran distribusi sekunder ke konsumen-konsumen. Dengan ini jelas bahwa sistem distribusi merupakan bagian yang penting dalam sistem tenaga listrik secara keseluruhan (Soleh, 2014: 27).

2.2 Transformator

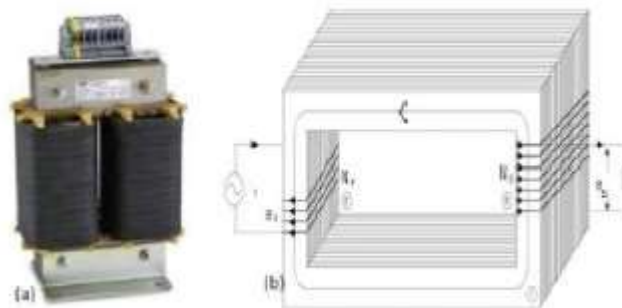
Transformator merupakan peralatan statis dimana rangkaian magnetik dan belitan yang terdiri dari 2 atau lebih belitan, secara induksi elektromagnetik, mentransformasikan daya (arus dan tegangan) sistem AC ke sistem arus dan tegangan lain pada frekuensi yang sama (IEC 60076-1 tahun 2011). Sementara menurut Berahim (1996: 87), dalam sistem tenaga listrik, transformator yakni peralatan atau piranti listrik yang dapat dipergunakan untuk mengubah energi yang satu ke energi listrik yang lain dimana tegangan keluaran (*output*) dapat dinaikkan atau diturunkan oleh piranti ini sesuai kebutuhan dan tanpa merubah frekuensi. Pemakaian trafo pada sistem tenaga dapat dibagi:



- a. Trafo penaik tegangan (*step up*) atau disebut trafo daya, untuk menaikkan tegangan pembangkitan menjadi tegangan transmisi.
- b. Trafo penurun tegangan (*step down*), dapat disebut trafo distribusi, untuk menurunkan tegangan transmisi menjadi tegangan distribusi.
- c. Trafo instrumen, untuk pengukuran yang terdiri dari trafo tegangan dan trafo arus, dipakai menurunkan tegangan dan arus agar dapat masuk ke meter-meter pengukuran.

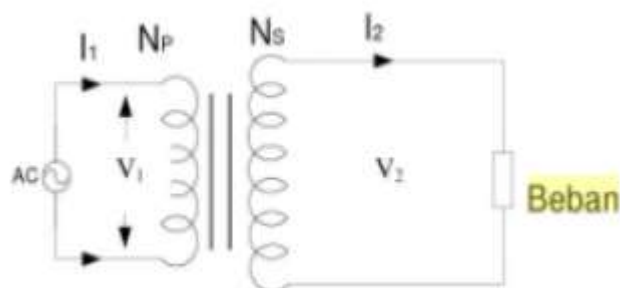
2.2.1 Konstruksi Transformator

Menurut Liklikwatil (2014: 195), adapun bagian terpenting dari suatu transformator seperti terlihat pada gambar 2.3 dibawah ini:



Gambar 2.3 Konstruksi Dasar Transformator, a) alat, b) diagram

Sumber : Liklikwatil (2014:195)



Gambar 2.4 Diagram Rangkaian Pengganti Transformator

Sumber : Liklikwatil (2014:195)



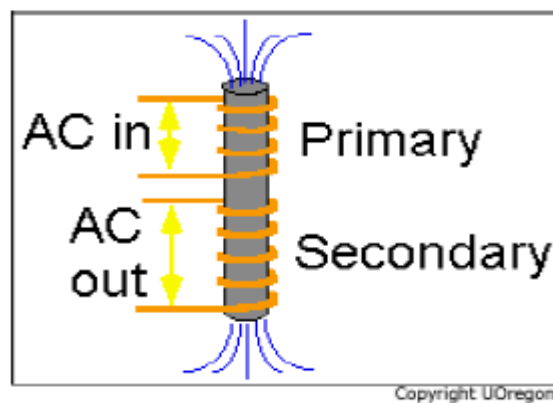
- V_1 = tegangan primer
 V_2 = tegangan sekunder
 I_1 = arus primer
 I_2 = arus sekunder
 e_p = GGL induksi pada kumparan primer
 e_s = GGL induksi pada kumparan sekunder

Menurut Berahim (1996: 88), umumnya konstruksi trafo terdiri dari:

- Inti yang terbuat dari lembaran-lembaran plat besi lunak atau baja silikon yang diklem jadi satu.
- Belitan dibuat dari tembaga yang cara membelitkan pada inti dapat konsentris atau spiral.
- Sistem pendinginan pada trafo-trafo dengan daya yang cukup besar.
- Bushing untuk menghubungkan rangkaian dalam trafo dengan rangkaian luar.

2.2.2 Prinsip Kerja Transformator

Prinsip kerja suatu transformator menurut Jatmiko (2015: 10) adalah induksi bersama (*mutual induction*) antara dua rangkaian yang dihubungkan oleh fluks magnet.



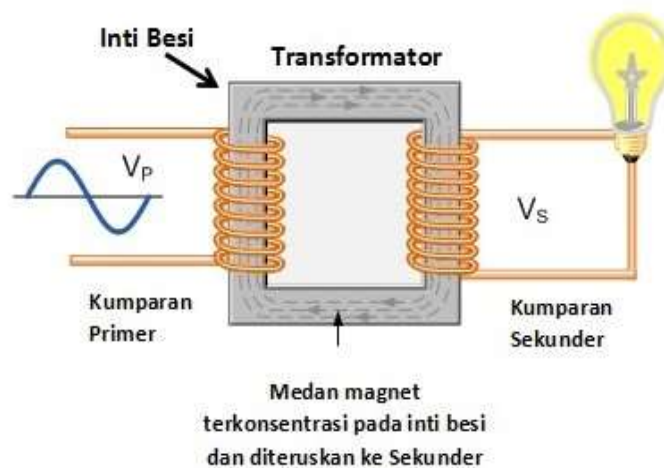
Gambar 2.5 Arus Bolak Balik Mengelilingi Inti Besi

Sumber : Materi Diklat Pemeliharaan PLN Puslitbang



Prinsip yang berlaku pada cara kerja trafo adalah hukum induksi faraday dan hukum lorentz dalam menyalurkan daya, dimana arus bolak balik yang mengalir mengelilingi suatu inti besi maka inti besi itu akan berubah menjadi magnet. Dan apabila magnet tersebut dikelilingi oleh suatu belitan maka pada kedua ujung belitan tersebut akan terjadi beda potensial (Gambar 2.5).

Arus yang mengalir pada belitan primer akan menginduksi inti besi transformator sehingga di dalam inti besi akan mengalir flux magnet dan flux magnet ini akan menginduksi belitan sekunder sehingga pada ujung belitan sekunder akan terdapat beda potensial (Gambar 2.6) .



Gambar 2.6 Prinsip Kerja Transformator

Sumber : https://rumus.co.id/transformator/#Prinsip_Kerja

Sementara menurut Lilikwatil (2014: 198), apabila kumparan primer dihubungkan dengan (sumber), maka akan mengalir arus bolak-balik I_1 menimbulkan fluks magnet yang juga berubah-ubah pada intinya. Akibat adanya fluks magnet yang berubah-ubah, pada kumparan primer akan timbul GGL induksi ep . Fluks magnet yang menginduksikan GGL induksi ep juga dialami oleh kumparan sekunder karena merupakan fluks bersama (mutual fluks). Dengan demikian fluks tersebut menginduksikan GGL induksi ep pada kumparan sekunder. Besarnya GGL induksi pada kumparan sekunder adalah:



$$e_s = -N_s \frac{d\Phi}{dt} \text{ Volt} \dots\dots\dots (2.1)$$

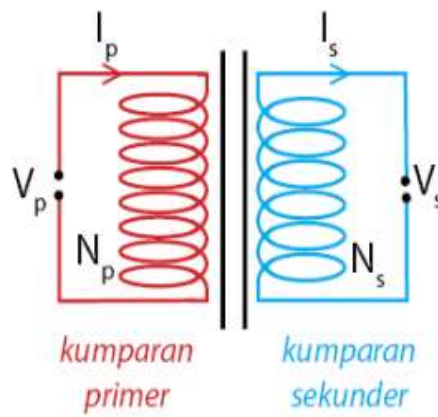
dimana:

e_s = GGL induksi pada kumparan sekunder

N_s = jumlah lilitan kumparan sekunder

$d\Phi$ = perubahan garis-garis gaya magnet dalam satuan weber (1 weber = 108 maxwel)

dt = perubahan waktu dalam satuan detik



Gambar 2.7 Hubungan Antara Lilitan Primer & Sekunder Trafo

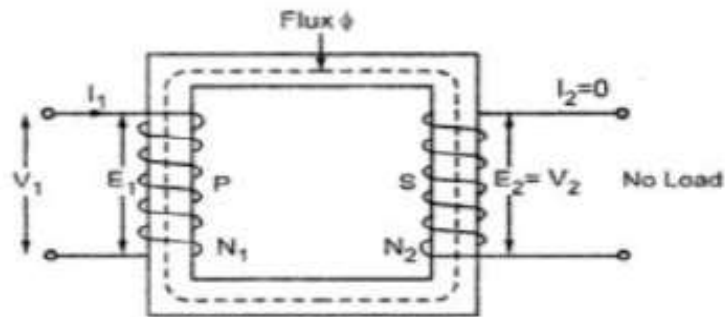
Sumber : <https://idschool.net/smp/transformator-perbedaan-trafo-step-up-dan-step-down/>

Hubungan antara tegangan primer, jumlah lilitan primer, tegangan sekunder, dan jumlah lilitan sekunder, dapat dinyatakan dalam persamaan:

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

2.2.3 Transformator Tanpa Beban

Menurut Rijono (1997: 6), trafo disebut tanpa beban jika kumparan sekunder dalam keadaan terbuka (*open circuit*), perhatikan gambar 2.8. Sedangkan menurut Zuhail & Zhanggishan (2004: 633), bila kumparan primer suatu transformator dihubungkan dengan sumber tegangan V_1 sinusoidal, akan mengalirkan arus primer I_0 yang juga sinusoidal dan dengan menganggap kumparan N_1 reaktif murni, I_0 akan tertinggal 90° dari V_1 . Arus primer I_0 menimbulkan fluks (Φ) yang sefasa dan juga sinusoidal.

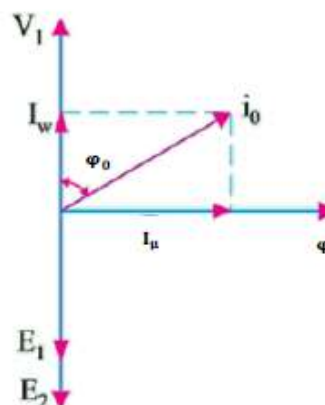


Gambar 2.8 Transformator dalam Keadaan Tanpa Beban

Sumber : Bakhsi & Bakhsi (2009 : 332)

Sedangkan menurut Theraja & Theraja (2005: 1126), ketika trafo diberi beban, terdapat rugi besi pada inti dan rugi tembaga di kumparan-kumparan (primer dan sekunder) dan rugi-rugi tersebut tidak sepenuhnya dapat diabaikan. Meskipun ketika trafo dalam keadaan tanpa beban, arus masuk pada kumparan primer tidak sepenuhnya reaktif. Arus masuk primer dalam keadaan tanpa beban menghasilkan rugi besi pada inti seperti rugi histeris dan rugi arus eddy; dan rugi tembaga dalam jumlah yang kecil di kumparan primer (tidak ada rugi tembaga di kumparan sekunder yang dalam keadaan terbuka atau tanpa beban). Karenanya, arus masuk primer dalam keadaan tanpa beban (I_0) tidak 90° di belakang V_1 , melainkan tertinggal dari sebuah sudut $\varphi_0 < 90^\circ$.

Daya masuk tanpa beban ketika $\cos \varphi_0$ merupakan faktor daya primer dalam keadaan tanpa beban. Trafo tanpa beban ditunjukkan secara vector pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Vektor Transformator dalam Keadaan Tanpa Beban

Sumber : Theraja & Theraja (2005 : 1126)



$$W_0 = V_1 I_0 \cos \varphi_0 \dots\dots\dots (2.3)$$

Seperti yang terlihat pada gambar 2.9, arus primer I_0 mempunyai dua komponen:

1. Sefasa dengan V_1 . Hal ini dikenal dengan *active* (aktif) atau *working* (bekerja) atau *iron* (rugi besi) yaitu komponen I_W karena menghasilkan rugi besi ditambah sejumlah kecil rugi tembaga primer.

$$I_W = I_0 \cos \varphi_0 \dots\dots\dots (2.4)$$

2. Komponen lainnya adalah dalam kuadrat dengan V_1 dan dikenal dengan komponen magnetasi I_μ karena fungsinya adalah untuk mempertahankan fluks bolak-balik pada inti.

$$I_\mu = I_0 \sin \varphi_0 \dots\dots\dots (2.5)$$

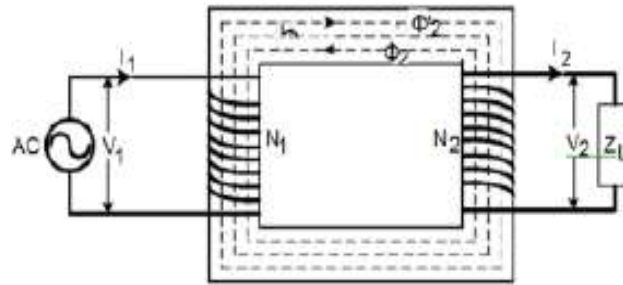
Jelaslah bahwa I_0 adalah penjumlahan vector dari I_W dan I_μ , oleh karena itu:

$$I_0 = \sqrt{I_W^2 + I_\mu^2} \dots\dots\dots (2.6)$$

Pada gambar 2.8 belitan sekunder tidak tersambung dengan alat pemakai (beban) oleh sebab itu belitan sekunder tidak mengeluarkan arus dan belitan primer dipandang sebagai belitan penghambat, tidak ada kehilangan tegangan $E_2 = V_2$. Arus yang mengalir pada kumparan primer disebut arus tanpa beban (I_0) karena pada belitan primer tetap ada arus yang mengalir yang diperlukan untuk membangkitkan fluks, arus ini menyebabkan jatuhnya tegangan sepanjang belitan primer sehingga gaya gerak listrik dalam primer tidak sama dengan sumber listrik V_1 , jadi E_1 tidak sama dengan V_1 (Anwar, 2008: 44).

2.2.4 Transformator Berbeban

Menurut Sumanto (1996: 6-7), apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban, maka pada lilitan sekunder mengalir arus sebesar I_2 . Belitan ampere sekunder ($I_2 N_s$) cenderung melemahkan fluks magnet pada inti sehingga e_p akan turun. Akan tetapi belitan ampere primer ($I_1 N_p$) mengimbangnya sehingga fluks magnet pada inti konstan (I_1 naik).



Gambar 2.10 Fluks Magnet pada Trafo Berbeban

Sumber : <https://www.slideshare.net/ahmadhaidaroh/transformator-stikom-artha-buana>

Arus beban I_2 ini akan menimbulkan gaya gerak magnet (ggm) $N_2 I_2$ yang cenderung menentang fluks (Φ) bersama (*mutual induction*) 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 :

$$I_1 = I_0 + I'_2 \dots\dots\dots (2.7)$$

Dan menurut Rijono (1997: 22) dengan mengabaikan rugi inti yang timbul pada trafo tersebut, maka besar $I_c = 0$, sehingga $I_0 = I_M$, maka:

$$I_1 = I_M + I'_2 \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana:

- I_1 = Arus pada sisi primer (Ampere)
- I_2 = Arus yg menghasilkan Φ_2' (Ampere)
- I_0 = Arus penguat (Ampere)
- I_M = Arus pemagnetan (Ampere)
- I_c = Arus rugi-rugi inti (Ampere)

Untuk menjaga agar fluks tetap tidak berubah sebesar ggm yang dihasilkan oleh arus pemagnetan I_M akibat pemasangan beban pada kumparan sekunder, maka berlaku hubungan:

$$N_1 I_M = N_1 I_1 - N_2 I_2 \dots\dots\dots (2.9)$$

$$N_1 I_M = N_1 (I_M + I'_2) - N_2 I_2 \dots\dots\dots (2.10)$$

$$N_1 I'_2 = N_2 I_2 \dots\dots\dots (2.11)$$



Karena I_M dianggap kecil atau $I_M \ll I_1$, maka $I'_2 = I_1$, sehingga:

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \dots\dots\dots (2.12)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \dots\dots\dots (2.13)$$

Sementara menurut (Anwar, 2008: 44), apabila tegangan V_1 yang berbentuk sinusoidal dihubungkan ke gulungan primer suatu transformator seperti pada gambar 2.10 maka pada gulungan tersebut akan mengalir arus listrik I_0 yang membangkitkan fluks bolak-balik yang mengalir ke seluruh inti sehingga menimbulkan gaya gerak listrik induksi E_1 pada belitan primer dan E_2 pada belitan sekunder, karena pada belitan sekunder diberi beban Z maka akan timbul arus I_2 (arus beban) yang melingkari kumparan sekunder.

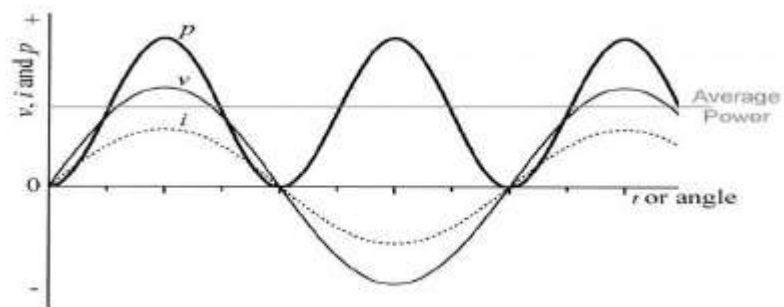
2.2.4.1 Beban Resistif

Beban (*load*,) istilah ini dapat digunakan dengan beberapa cara: untuk menunjuk sebuah alat atau kumpulan peralatan yang mengkonsumsi listrik; untuk menunjuk daya yang diperlukan dari suatu rangkaian suplai; daya atau arus yang sedang melewati suatu penghantar atau mesin (Weedy, 1988: 54).

Beban resistif atau beban hambatan murni dihasilkan oleh alat-alat listrik yang bersifat murni tahanan (resistor) seperti pada elemen pemanas dan lampu pijar. Beban resistif ini memiliki sifat yang "pasif", dimana ia tidak mampu memproduksi energi listrik, dan justru menjadi konsumen energi listrik.

Resistor bersifat menghalangi aliran elektron yang melewatinya (dengan jalan menurunkan tegangan listrik yang mengalir), sehingga mengakibatkan terkonversinya energi listrik menjadi panas. Dengan sifat demikian, resistor tidak akan merubah sifat-sifat listrik AC yang mengalirinya.

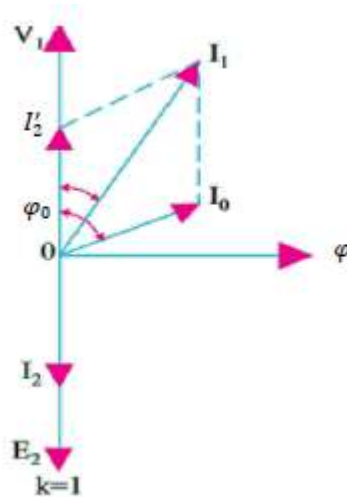
Gelombang arus dan tegangan listrik yang melewati resistor akan selalu bersamaan membentuk bukit dan lembah. Dengan kata lain, beban resistif tidak akan menggeser posisi gelombang arus maupun tegangan listrik AC. Menurut Rijono (1997: 14), jadi ternyata tegangan listrik yang ada pada hambatan murni adalah sefasa dengan arus listrik yang melaluinya. Dalam bentuk pulsa, hubungan arus dan tegangan ditunjukkan pada gambar 2.11 Sedangkan secara vektoris dapat digambarkan seperti pada gambar 2.12.



Gambar 2.11 Gelombang Sinusoidal Beban Resistif Listrik AC

Sumber : <http://artikel-teknologi.com/pengertian-beban-resistif-induktif-dan-kapasitif-pada-jaringan-listrik-ac/>

Nampak pada grafik di atas, karena gelombang tegangan dan arus listrik berada pada fase yang sama maka nilai dari daya listrik akan selalu positif. Inilah mengapa beban resistif murni akan selalu ditopang oleh 100% daya nyata.



Gambar 2.12 Grafik Arus dan Tegangan Berbeban Resistif

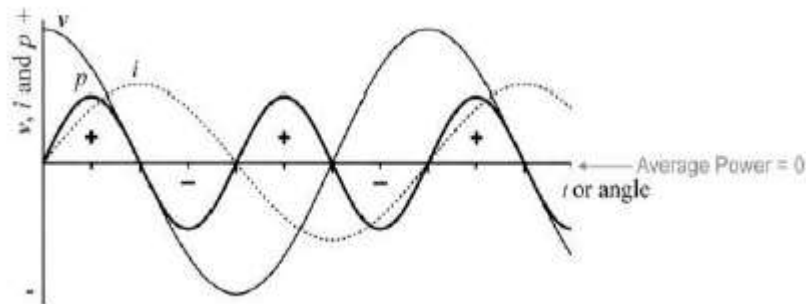
Sumber : Theraja & Theraja (2005 : 1129)

Pada gambar 2.12, I_2 adalah arus sekunder yang sefase dengan E_2 (yang seharusnya adalah V_2). Hal tersebut menimbulkan arus primer I_2' yang anti-fasa dengannya dan sama besar dengannya ($K=1$). Arus primer total I_1 adalah penjumlahan vektor dari I_0 dan I_2' dan tertinggal dari V_1 terhadap sebuah sudut ϕ_1 .



2.2.4.2 Beban Induktif

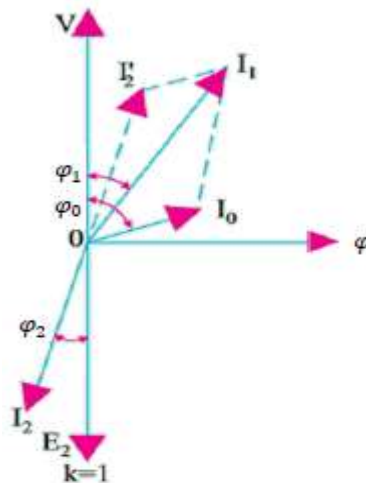
Beban induktif diciptakan oleh lilitan kawat (kumparan) yang terdapat di berbagai alat-alat listrik seperti motor, trafo, dan relay. Kumparan dibutuhkan oleh alat-alat listrik tersebut untuk menciptakan medan magnet sebagai komponen kerjanya. Pembangkitan medan magnet pada kumparan inilah yang menjadi beban induktif pada rangkaian arus listrik AC.



Gambar 2.13 Gelombang Sinusoidal Beban Induktif Listrik AC

Sumber: <http://artikel-teknologi.com/pengertian-beban-resistif-induktif-dan-kapasitif-pada-jaringan-listrik-ac/>

Nampak pada gelombang sinusoidal listrik AC di gambar 2.13, bahwa jika sebuah sumber listrik AC diberi beban induktif murni, maka gelombang arus listrik akan tertinggal sejauh 90° oleh gelombang tegangan (Rijono, 1997: 15). Atas dasar inilah beban induktif dikenal dengan istilah beban *lagging* (arus tertinggal tegangan). Nampak pula bahwa dikarenakan pergeseran gelombang arus listrik di atas, maka nilai daya listrik menjadi bergelombang sinusoidal. Beban jenis ini menyerap daya aktif dan daya reaktif.



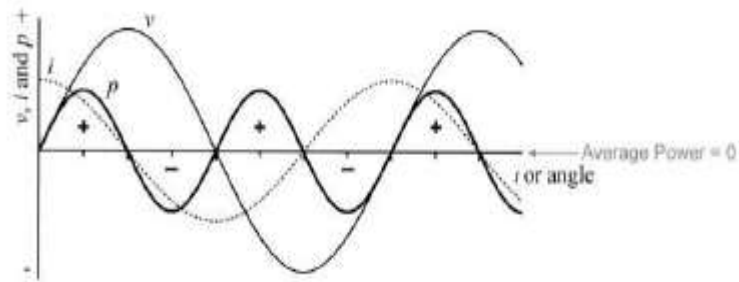
Gambar 2.14 Grafik Arus dan Tegangan Beban Induktif

Sumber: Theraja & Theraja (2005: 1129)

Pada gambar 2.14 I_2 tertinggal dari E_2 (sebenarnya V_2) terhadap φ_2 . Arus I_2' merupakan antifasa dari I_2 dan sama besar dengannya. Seperti sebelumnya, I_1 adalah penjumlahan vector dari I_2' dan I_0 dan tertinggal dibelakang V_1 terhadap φ_1 (Theraja & Theraja, 2005: 1130).

2.2.4.3 Beban Kapasitif

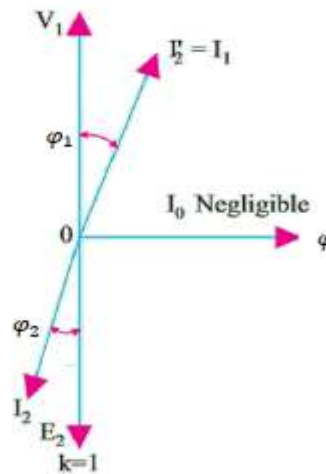
Beban kapasitif merupakan kebalikan dari beban induktif. Jika beban induktif menghalangi terjadinya perubahan nilai arus listrik AC, maka beban kapasitif bersifat menghalangi terjadinya perubahan nilai tegangan listrik. Sifat ini menunjukkan bahwa kapasitor bersifat seakan-akan menyimpan tegangan listrik sesaat. Mendapatkan *supply* tegangan AC naik dan turun, maka kapasitor akan menyimpan dan melepaskan tegangan listrik sesuai dengan perubahan tegangan masuknya.



Gambar 2.15 Gelombang Sinusoidal Beban Kapasitif Listrik AC

Sumber: <http://artikel-teknologi.com/pengertian-beban-resistif-induktif-dan-kapasitif-pada-jaringan-listrik-ac/>

Fenomena inilah yang mengakibatkan gelombang arus AC akan mendahului (*leading*) tegangannya sejauh 90° seperti Nampak pada gambar 2.15 (Rijono, 1997: 19). Beban jenis ini menyerap daya aktif dan mengeluarkan daya reaktif.



Gambar 2.16 Grafik Arus dan Tegangan Beban Kapasitif

Sumber: Wijaya (2001: 84)

Dapat diketahui bahwa ϕ_1 sedikit lebih besar dari ϕ_2 . Tetapi jika kita mengabaikan I_0 dibandingkan dengan I_2' seperti pada gambar 2.16, maka $\phi_1 = \phi_2$. Dengan kondisi di bawah ini:

$$\frac{I_2'}{I_2} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = K \dots\dots\dots (2.14)$$

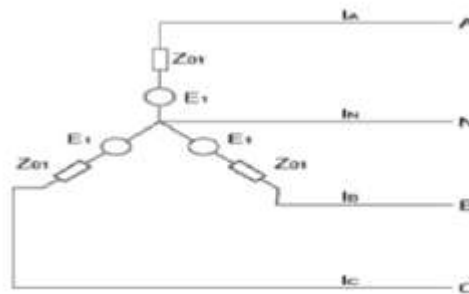


2.2.5 Hubungan Tiga Fasa dalam Transformator

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

2.2.5.1 Hubungan Wye (Y)

Menurut Lumbanraja (2008: 44), hubungan ini dapat dilakukan dengan menggabungkan ketiga belitan transformator yang memiliki rating yang sama.



Gambar 2.17 Hubungan Wye (Y)

Sumber: Lumbanraja (2008: 44)

Dari gambar 2.17 dapat diketahui sebagai berikut:

$$I_A = I_B = I_C = I_{L-L} (A) \dots\dots\dots (2.15)$$

$$I_{L-L} = I_{ph} (A) \dots\dots\dots (2.16)$$

Dimana:

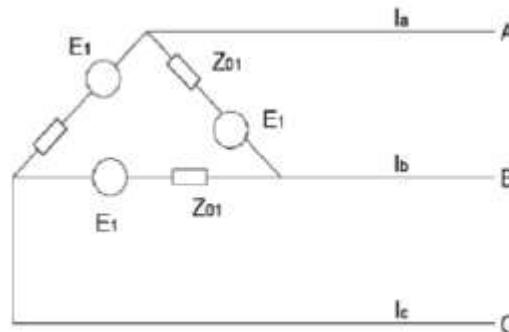
I_{L-L} = Arus line to line

I_{ph} = Arus Arus line to netral



2.2.5.2 Hubungan Delta (Δ)

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



Gambar 2.18 Hubungan Delta (Δ)

Sumber: Lumbanraja (2008: 45)

Dari gambar 2.18 dapat kita ketahui sebagai berikut:

$$I_A = I_B = I_C = I_{L-L} \text{ (A)} \dots\dots\dots (2.17)$$

$$I_{L-L} = \sqrt{3} I_{ph} \text{ (A)} \dots\dots\dots (2.18)$$

Dan:

$$V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = V_{L-L} \text{ (V)} \dots\dots\dots (2.19)$$

$$V_{L-L} = \sqrt{3} V_{ph} = \sqrt{3} E_1 \text{ (V)} \dots\dots\dots (2.20)$$

Dimana:

V_{L-L} = Tegangan line to line

V_{ph} = Tegangan line to netral

Dengan menetapkan/mengambil sebuah tegangan referensi dan sudut fasa nol, maka dapat ditentukan sudut phasa yang lainnya pada sistem tiga fasa tersebut.

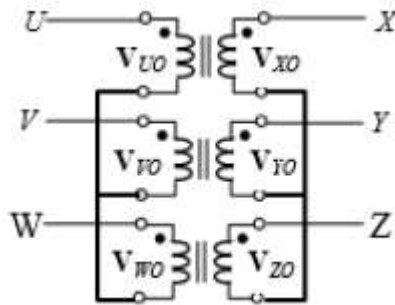
2.2.6 Jenis-Jenis Hubungan Belitan Transformator Tiga Fasa

Dalam sistem tenaga listrik transformator tiga fasa digunakan karena pertimbangan ekonomis dan efisien. Pada transformator tiga fasa terdapat dua hubungan belitan utama yaitu hubungan delta (Δ) dan hubungan bintang (Y). Dan ada empat kemungkinan lain hubungan transformator tiga fasa, yaitu:



2.2.6.1 Hubungan Wye-Wye (Y-Y)

Hubungan ini ekonomis digunakan untuk melayani beban yang kecil dengan tegangan transformasi yang tinggi. Hubungan Y-Y pada transformator tiga fasa dapat dilihat pada gambar 2.19 berikut ini:



Gambar 2.19 Hubungan Wye-Wye (Y-Y)

Sumber: Sudirham (2011: 18)

Fasa primer disebut dengan fasa U-V-W sedangkan fasa sekunder disebut fasa X-Y-Z. Fasor tegangan fasa primer kita sebut V_{UO} , V_{VO} , V_{WO} dengan nilai V_{FP} , dan tegangan fasa sekunder kita sebut V_{XO} , V_{YO} , V_{ZO} dengan nilai V_{FS} . Nilai tegangan saluran (tegangan fasa-fasa) primer dan sekunder kita sebut V_{LP} dan V_{LS} . Nilai arus saluran primer dan sekunder masing-masing kita sebut I_{LP} dan I_{LS} sedang nilai arus fasanya I_{FP} dan I_{FS} . Pada hubungan Y-Y, tegangan primer pada masing-masing fasa adalah:

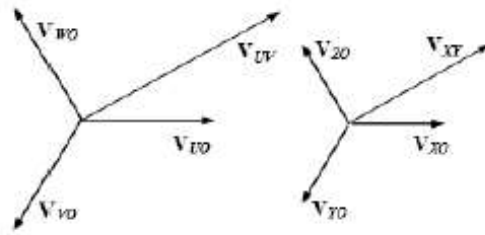
$$V_{L1} = \sqrt{3} V_{F1} \text{ (V)} \dots\dots\dots (2.21)$$

Tegangan fasa-fasa primer sama dengan $\sqrt{3}$ kali tegangan fasa primer dengan perbedaan sudut fasa 30° , tegangan fasa-fasa sekunder sama dengan $\sqrt{3}$ kali tegangan fasa sekunder dengan perbedaan sudut fasa 30° . Perbandingan tegangan fasa-fasa primer dan sekunder adalah:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}V_{FP}}{\sqrt{3}V_{FS}} = a \dots\dots\dots (2.22)$$

$$\frac{I_{LP}}{I_{LS}} = \frac{I_{FP}}{I_{FS}} = \frac{1}{a} \dots\dots\dots (2.23)$$

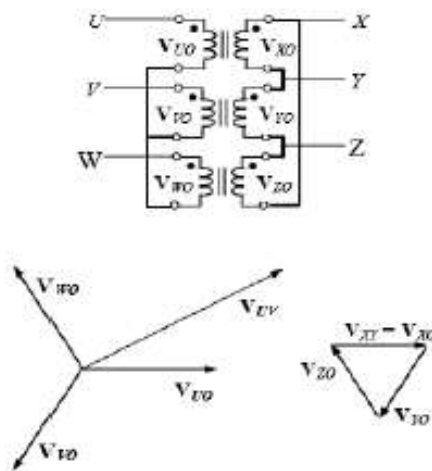
Antara fasor tegangan fasa-fasa primer dan sekunder tidak terdapat perbedaan sudut fasa.



Gambar 2.20 Diagram Fasor Hubungan Wye-Wye (Y-Y)
 Sumber: Sudirham (2011: 18)

2.2.6.2 Hubungan Wye-Delta (Y - Δ)

Digunakan sebagai penurun tegangan untuk sistem tegangan tinggi. Hubungan Y-Δ pada transformator tiga fasa dapat dilihat pada gambar 2.21 berikut ini:



Gambar 2.21 Hubungan Wye-Delta (Y - Δ)
 Sumber: Sudirham (2011: 19)

Tegangan fasa-fasa primer sama dengan $\sqrt{3}$ kali tegangan fasa primer dengan perbedaan sudut fasa 30° , sedangkan tegangan fasa-fasa sekunder sama dengan tegangan fasa sekunder. Dengan mengabaikan rugi-rugi diperoleh. Fasor tegangan fasa-fasa primer mendahului sekunder 30° .

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{FP}\sqrt{3}}{V_{FS}} = \alpha\sqrt{3} \dots\dots\dots (2.24)$$

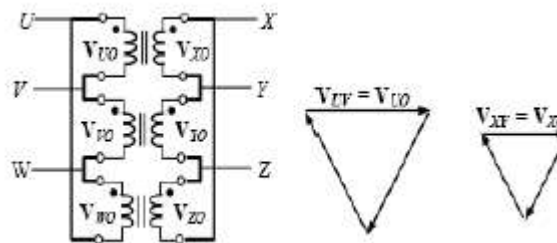
$$\frac{I_{LP}}{I_{LS}} = \frac{I_{FP}}{I_{FS}\sqrt{3}} = \frac{1}{\alpha\sqrt{3}} \dots\dots\dots (2.25)$$



Tidak ada masalah yang serius pada saat melayani beban yang tidak seimbang karena hubungan delta pada sisi sekunder akan mendistribusikan beban tidak seimbang tersebut pada masing-masing fasa. Masalah harmonisa ketiga pada tegangan disisi sekunder pun dapat dihapus karena telah disirkulasikan melalui hubungan delta disisi sekunder.

2.2.6.3 Hubungan Delta-Delta (Δ - Δ)

Hubungan ini ekonomis digunakan untuk melayani beban yang besar dengan tegangan pelayanan yang rendah. Hubungan Δ - Δ ini pada transformator tiga fasa ditunjukkan pada gambar 2.22 berikut:



Gambar 2.22 Hubungan Delta-Delta (Δ - Δ)

Sumber: Sudirham (2011: 17)

Pada waktu menghubungkan tiga transformator satu fasa untuk melayani sistem tiga fasa, hubungan sekunder harus diperhatikan agar sistem tetap seimbang.

Diagram hubungan ini diperlihatkan pada gambar 2.22 Rasio tegangan fasa primer terhadap sekunder $V_{FP} / V_{FS} = a$. Dengan mengabaikan rugi-rugi untuk hubungan Δ - Δ kita peroleh:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{FP}}{V_{FS}} = a \dots \dots \dots (2.26)$$

$$\frac{I_{LP}}{I_{LS}} = \frac{I_{FP}\sqrt{3}}{I_{FS}\sqrt{3}} = \frac{1}{a} \dots \dots \dots (2.27)$$

Salah satu keuntungan pemakaian transformator tiga fasa hubungan Δ - Δ adalah perbedaan fasa pada hubungan ini tidak ada dan stabil terhadap beban tidak seimbang dan harmonisa. Selain itu keuntungan lain yang dapat diambil adalah apabila transformator ini mengalami gangguan pada salah satu belitannya maka



transformator ini dapat terus bekerja melayani beban walaupun hanya menggunakan dua buah belitan.

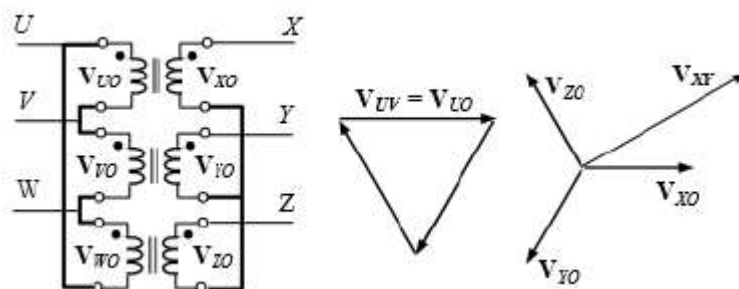
2.2.6.4 Hubungan Delta-Wye ($\Delta - Y$)

Tegangan fasa-fasa primer sama dengan tegangan fasa primer, sedangkan tegangan fasa-fasa sekunder sama dengan $\sqrt{3}$ kali tegangan fasa sekunder dengan perbedaan sudut fasa 30° mendahului tegangan sisi primer. Dengan mengabaikan rugi-rugi kita peroleh

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{FP}}{V_{FS}} = \frac{a}{\sqrt{3}} \dots \dots \dots (2.28)$$

$$\frac{I_{LP}}{I_{LS}} = \frac{V_{FP}}{V_{FS}} = \frac{\sqrt{3}}{a} \dots \dots \dots (2.29)$$

Salah satu keuntungan pemakaian transformator tiga fasa hubungan $\Delta-\Delta$ adalah perbedaan fasa pada hubungan ini tidak ada dan stabil terhadap beban tidak seimbang dan harmonisa. Selain itu keuntungan lain yang dapat diambil adalah apabila transformator ini mengalami gangguan pada salah satu belitannya maka transformator ini dapat terus bekerja melayani beban walaupun hanya menggunakan dua buah belitan.



Gambar 2.23 Hubungan Delta-Wye ($\Delta - Y$)

Sumber: Sudirham (2011: 17)

Dengan memperhatikan ketahanan insulation, transformator hubungan Delta-Wye (Δ -Y) bisa digunakan baik sebagai transformator *step-up* (penaik tegangan), namun secara umum banyak digunakan pada aplikasi *step-down* (penurun tegangan). Dengan adanya titik netral pada sisi sekunder, transformator



hubungan Wye-Delta ($Y-\Delta$) banyak digunakan sebagai transformator distribusi karena bisa menyuplai beban tiga fasa maupun satu fasa. Sedangkan hubungan delta di sisi primer dapat meminimalkan beban tidak seimbang yang sering dihadapi pada setiap transformator distribusi.

2.2.7 Kelompok Vektor

Dalam Dhuha & Amien (2015: 49-50), vektor group adalah istilah yang dibuat oleh standar IEC dan manufaktur transformator sampai saat ini. Ini menunjukkan cara menghubungkan belitan dan posisi fasa dari pandangan vektor tegangan. Ada beberapa macam transformator yang membedakan oleh kelompok vektor dan titik netralnya yaitu:

Tabel 2.1 Vektor Grup dan Daya Transformator 3 Fasa

No	Vektor Group	Daya (kVA)	Keterangan
1	Yzn5	50 100 160	Untuk sistem 3 kawat
2	Dyn5	200 250 315 400 500 630	Untuk Sistem 3 Kawat
3	Ynyn0	50 100 160 200 250 315 400 500 630	Untuk Sistem 4 kawat



Ditunjukkan dengan:

1. Huruf menunjukkan konfigurasi dari phasa kumparan. Di sistem 3 phasa, hubungan belitan dikategorikan oleh Delta (D,d), Bintang atau Wye (Y, y), *interconnected star* atau zigzag (Z, z) dan belitan *open* atau *independent*. Huruf kapital menunjukkan ke belitan tegangan tinggi (HV), dan tegangan rendah (LV).
2. Huruf (N, n) dimana menunjukkan netral dari belitan hubungan bintang yang digunakan.
3. Nomor menunjukkan pergeseran phasa antara tegangan sisi tegangan tinggi. Nomor ini kelipatan dari 300 , menunjukkan sudut dimana vektor dari tegangan rendah (LV) *lags* atau tertinggal dari kumparan tegangan tinggi (HV). Sudut dari masingmasing kumparan tegangan rendah ditunjukkan dengan “notasi jam”, oleh karena itu jam ditunjukkan oleh pasor belitan ketika belitan tegangan tinggi (HV) ditunjukkan oleh jam 12.

Tabel 2.2 Golongan Hubungan Trafo 3 Fasa dengan Sistem Jam

Angka jam	Kelompok hubungan	TT Tegangan Tinggi	lr Tegangan rendah	Hubungan lilitan TT	Hubungan lilitan lr	Perbandingan lilitan a
0	Dd0					$\frac{N_1}{N_2}$
	Yy0					$\frac{N_1}{N_2}$
	Dz0					$\frac{2N_1}{3N_2}$
5	Dy5					$\frac{N_1}{\sqrt{3}N_2}$
	Yd5					$\frac{\sqrt{3}N_1}{N_2}$
	Yz5					$\frac{2N_1}{\sqrt{3}N_2}$
6	Dd6					$\frac{N_1}{N_2}$
	Yy6					$\frac{N_1}{N_2}$
	Dz6					$\frac{2N_1}{3N_2}$
11	Dy11					$\frac{N_1}{\sqrt{3}N_2}$
	Yd11					$\frac{\sqrt{3}N_1}{N_2}$
	Yz11					$\frac{2N_1}{\sqrt{3}N_2}$



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

$$S = \sqrt{3} V.I \dots\dots\dots (2.29)$$

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

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} V_{\text{sekunder}}} \dots\dots\dots (2.30)$$

2.2.8 Gardu Induk

Menurut buku pedoman Operasi dan Pemeliharaan Gardu Induk PT. PLN Pusdiklat (2009), gardu induk merupakan simpul di dalam sistem tenaga listrik 34 yang terdiri dari susunan rangkaian sejumlah perlengkapan yang dipasang menempati suatu lokasi tertentu untuk menerima dan menyalurkan tenaga listrik, menaikkan dan menurunkan tegangan sesuai dengan tingkat tegangan kerjanya, tempat melakukan kerja *switching* rangkaian suatu sistem tenaga listrik dan untuk menunjang keandalan sistem tenaga listrik terkait.

Sedangkan menurut Riyanto & Suheta (2014: 1), gardu induk adalah suatu instalasi dari kumpulan peralatan listrik yang disusun menurut pola tertentu, dan merupakan penghubung penting di dalam sistem tenaga listrik yang menyalurkan dan mengatur proses penyaluran serta pelayanan tenaga listrik dan pembangkitan ke konsumen.

Gardu Induk (biasanya disingkat GI) merupakan sistem peralatan listrik tegangan tinggi yang berfungsi untuk menyalurkan dan mengendalikan daya listrik dengan menggunakan peralatan material utama (MTU) antara lain transformator tenaga, transformator arus (CT), transformator tegangan (PT), pemutus tenaga (PMT), pemisah (PMS), dan *arrester* (LA) (SPLN T5.005, 2014: 2) yang nantinya akan dijelaskan satu persatu di subbab 2.1.3 ini. Fungsi utama dari gardu induk adalah:

- Untuk mengatur aliran daya listrik dari saluran transmisi ke saluran transmisi lainnya yang kemudian didistribusikan ke konsumen.
- Sebagai tempat kontrol.



- Sebagai pengaman operasi sistem.
- Sebagai tempat untuk menurunkan tegangan transmisi menjadi tegangan distribusi.

2.2.8.1 Transformator Tenaga

Trafo tenaga merupakan peralatan statis dimana rangkaian magnetik dan belitan yang terdiri dari 2 atau lebih belitan, secara induksi elektromagnetik, mentransformasikan daya (arus dan tegangan) sistem AC ke sistem arus dan tegangan lain pada frekuensi yang sama (IEC 60076-1 : 2011). Pembahasan secara rinci mengenai trafo telah dijelaskan di subbab 2.1.2.

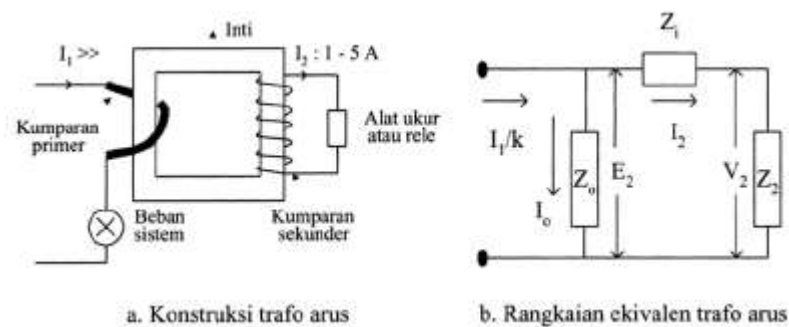


Gambar 2.24 Transformator Tenaga

Sumber: <https://materiselamasekolah.wordpress.com/2016/02/23/peralatan-bantu-transformator-daya/>

2.2.8.2 Transformator Arus (CT)

Menurut Tobing (2012: 116), transformator arus atau *Current Transformer* (CT) digunakan untuk pengukuran arus yang besarnya ratusan ampere dan arus yang mengalir dalam jaringan tegangan tinggi. Disamping untuk pengukuran arus, trafo arus juga dibutuhkan untuk pengukuran daya dan energi, pengukuran jarak jauh dan rele proteksi. Kumparan primer trafo arus dihubungkan seri dengan jaringan atau peralatan yang akan diukur arusnya, sedang kumparan sekunder dihubungkan dengan meter atau rele proteksi. Pada umumnya peralatan ukur dan rele membutuhkan arus 1 atau 5 A.



a. Konstruksi trafo arus

b. Rangkaian ekivalen trafo arus

Gambar 2.25 Kontruksi Trafo Arus

Sumber: Tobing (2012: 193)

Pada gambar 2.25 ditunjukkan skema konstruksi suatu trafo arus dan rangkaian ekivalennya dilihat dari sisi sekunder. Prinsip kerjanya sama dengan trafo daya satu fasa. Sedangkan menurut Buku Pedoman Pemeliharaan Trafo Arus (CT) PLN, Fungsi dari trafo arus adalah:

1. Mengkonversi besaran arus pada sistem tenaga listrik dari besaran primer menjadi besaran sekunder untuk keperluan pengukuran sistem metering dan proteksi.
2. Mengisolasi rangkaian sekunder terhadap rangkaian primer, sebagai pengamanan terhadap manusia atau operator yang melakukan pengukuran.
3. Standarisasi besaran sekunder, untuk arus nominal 1 Amp dan 5 Amp (Rusdjaja, 2014:3).

Setiap trafo arus mempunyai spesifikasi yang berisi detail komponen trafo arus tersebut. Spesifikasi trafo (CT) arus antara lain:

1. Ratio CT, rasio CT merupakan spesifikasi dasar yang harus ada pada CT, dimana representasi nilai arus yang ada di lapangan dihitung dari besarnya rasio CT. Misal CT dengan rasio 2000/5A, nilai yang terukur di sekunder CT adalah 2.5A, maka nilai aktual arus yang mengalir di penghantar adalah 1000 A. Kesalahan rasio ataupun besarnya presentasi error (%err) dapat berdampak pada besarnya kesalahan pembacaan di alat ukur, kesalahan penghitungan tarif, dan kesalahan operasi sistem proteksi.



2. *Burden* atau nilai maksimum daya (dalam satuan VA) yang mampu dipikul oleh CT. Nilai daya ini harus lebih besar dari nilai yang terukur dari terminal skunder CT sampai dengan koil relay proteksi yang dikerjakan. Apabila lebih kecil, maka relay proteksi tidak akan bekerja untuk mengetriapkan CB/PMT apabila terjadi gangguan.

Tabel 2.3 Burden Relay Pada Arus Nominal

Alat Ukur	Burden (VA)
Relai Arus Lebih	2
Relai Arus Lebih Waktu Terbalik	1,5 – 5
Relai Arus Balik	1,8
Relai Daya Balik	0,07 – 3,
Relai Daya	50,23 – 11,5
Relai Differensial	0,8 – 6
Relai Jarak	2 - 25

3. *Class*, kelas CT menentukan untuk sistem proteksi jenis apakah core CT tersebut. Misal untuk proteksi arus lebih digunakan kelas 5P20, untuk kelas tarif metering digunakan kelas 0.2 atau 0.5, untuk sistem proteksi busbar digunakan Class X atau PX.
4. *Kneepoint*, adalah titik saturasi/jenuh saat CT melakukan eksitasi tegangan. Umumnya proteksi busbar menggunakan tegangan sebagai penggerak koilnya. Tegangan dapat dihasilkan oleh CT ketika skunder CT diberikan impedansi seperti yang tertera pada Hukum Ohm. *Kneepoint* hanya terdapat pada CT dengan Class X atau PX. Besarnya tegangan *kneepoint* bisa mencapai 2000 Volt, dan tentu saja besarnya *kneepoint* tergantung dari nilai atau desain yang diinginkan.
5. *Secondary Winding Resistance* (R_{ct}), atau impedansi dalam CT. Impedansi dalam CT pada umumnya sangat kecil, namun pada Class X nilai ini ditentukan dan tidak boleh melebihi nilai yang tertera disana. Misal:



<2.5Ohm, maka impedansi CT pada Class X tidak boleh lebih dari 2.5Ohm atau CT tersebut dikembalikan ke pabrik untuk dilakukan penggantian.

Fungsi trafo arus berdasarkan lokasi pemasangannya menurut Buku Pedoman Pemeliharaan Trafo Arus (CT) PLN, terbagi menjadi dua kelompok:

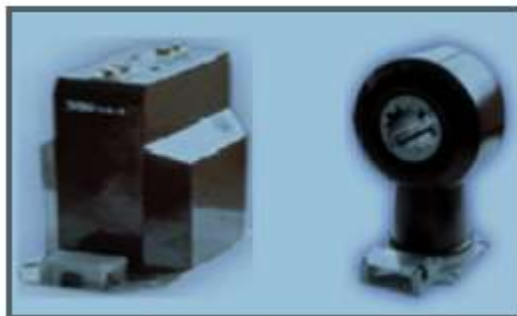
1. Trafo arus pemasangan luar ruangan (*outdoor*) yang memiliki konstruksi fisik yang kokoh, isolasi yang baik, biasanya menggunakan isolasi minyak untuk rangkaian elektrik internal dan bahan keramik/*porcelain* untuk isolator eksternal.



Gambar 2.26 Trafo Arus Pemasangan Luar Ruangan

Sumber: <https://blog91ku.blogspot.com/2015/11/trafo-arus.html>

2. Trafo arus pemasangan dalam ruangan (*indoor*) yang biasanya memiliki ukuran lebih kecil dari trafo arus pemasangan luar ruangan, menggunakan isolator dari bahan resin.



Gambar 2.27 Trafo Arus Pemasangan Dalam Ruangan

Sumber: <https://blog91ku.blogspot.com/2015/11/trafo-arus.html>



2.2.8.3. Transformator Tegangan (PT)

Trafo tegangan adalah trafo satu fasa *step-down* yang mentransformasikan tegangan sistem ke suatu tegangan rendah yang besarnya sesuai untuk lampu indikator, alat ukur, relai, dan alat sinkronisasi (Tobing, 2012: 95). Menurut Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tegangan (CVT) PLN, fungsi trafo tegangan yaitu:

1. Mentransformasikan besaran tegangan sistem dari yang tinggi ke besaran tegangan listrik yang lebih rendah sehingga dapat digunakan untuk peralatan proteksi dan pengukuran yang lebih aman, akurat, dan teliti.
2. Mengisolasi bagian primer yang tegangannya sangat tinggi dengan bagian sekunder yang tegangannya rendah untuk digunakan sebagai sistem proteksi dan pengukuran peralatan di bagian primer.
3. Sebagai standarisasi besaran tegangan sekunder (100, $100/\sqrt{3}$, $110/\sqrt{3}$, dan 110 volt) untuk keperluan peralatan sisi sekunder.
4. Memiliki 2 kelas, yaitu kelas proteksi (30, 6P) dan kelas pengukuran (0,1; 0,2; 0,5; 1; 3) (Rusdjaja, 2014: 1). Berikut pada gambar 2.28 adalah gambar transformator tegangan.



Gambar 2.28 Trafo Tegangan Kutub Tunggal Tanpa *Bushing*

Sumber: Tobing (2012: 100)

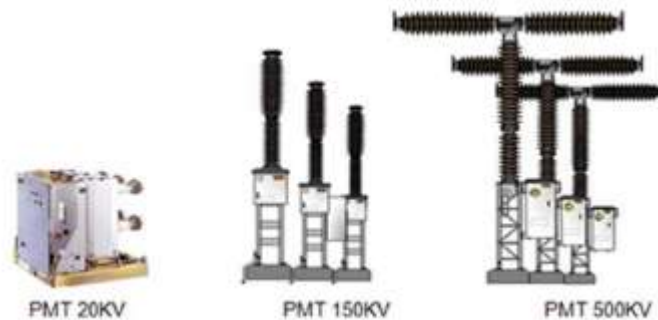
Trafo tegangan dibagi menjadi dua jenis yaitu trafo tegangan magnetik (*Magnetic Voltage Transformer / VT*) yang disebut juga trafo tegangan induktif



yang salah satu jenisnya dapat dilihat pada gambar 2.10 dan trafo tegangan kapasitif (*Capasitive Voltage Transformer / CVT*).

2.2.8.4 Pemutus Tenaga (PMT)

Berdasarkan *IEV (International Electrotechnical Vocabulary)* 441-14-20 disebutkan bahwa *Circuit Breaker (CB)* atau Pemutus Tenaga (PMT) merupakan peralatan saklar/switching mekanis, yang mampu menutup, mengalirkan dan memutus arus beban dalam kondisi normal serta mampu menutup, mengalirkan (dalam periode tertentu) dan memutus arus beban dalam kondisi abnormal/gangguan seperti kondisi hubung singkat (*Short Circuit*).



Gambar 2.29 Pemutus Tenaga (PMT)

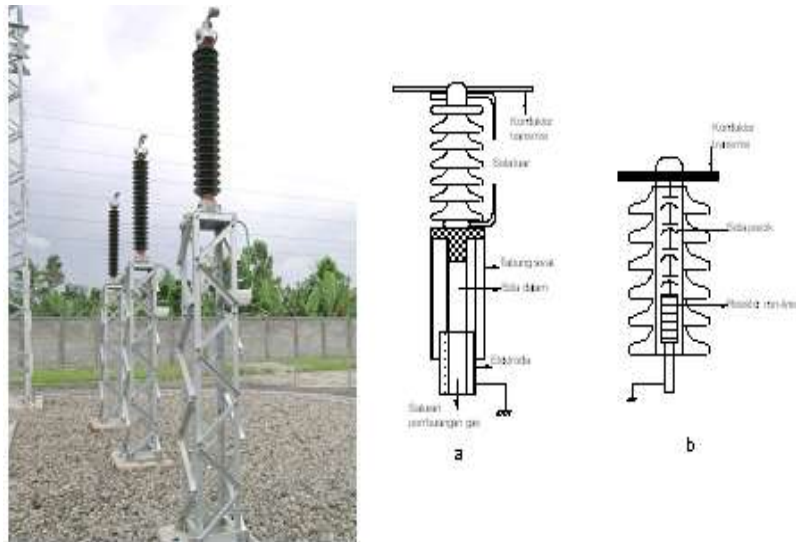
Sumber: <https://www.bloglistrik.com/2016/06/pemutus-tenaga-pmt.html>

Sedangkan definisi PMT berdasarkan *IEEE C37.100:1992 (Standard Definitions for Power Switchgear)* adalah merupakan peralatan saklar/switching mekanis, yang mampu menutup, mengalirkan dan memutus arus beban dalam kondisi normal sesuai dengan ratingnya serta mampu menutup, mengalirkan (dalam periode tertentu) dan memutus arus beban dalam spesifik kondisi abnormal/gangguan sesuai dengan ratingnya.



2.2.8.5 Lightning Arrester (LA)

Menurut Buku Pedoman Pemeliharaan *Lightning Arrester* PLN, LA merupakan peralatan yang berfungsi untuk melindungi peralatan listrik lain dari tegangan surja (baik surja hubung maupun surja petir) (Radjaja, 2014: 1).



Gambar 2.30 *Lightning Arrester (LA)*

Sumber: <http://electrobuzzzz.blogspot.com/2015/08/gardu-induk-pembangkit-listrik.html>

2.2.8.6. Kubikel Tegangan Menengah (TM)

Berdasarkan Buku Pedoman Pemeliharaan Kubikel Tegangan Menengah PLN, kubikel TM adalah seperangkat peralatan listrik yang dipasang pada Gardu Induk dan Gardu Distribusi/Gardu Hubung yang berfungsi sebagai pembagi, pemutus, penghubung, pengontrol, dan pengaman sistem penyaluran tenaga listrik tegangan menengah (Radjaja, 2014: 1). Berdasarkan fungsi/penempatannya, kubikel TM di gardu induk terbagi menjadi enam macam, diantaranya:

1. Kubikel *Incoming*, berfungsi sebagai penghubung dari sisi sekunder trafo daya ke rel tegangan menengah.
2. Kubikel *Outgoing*, berfungsi sebagai penghubung/penyalur dari rel ke beban.



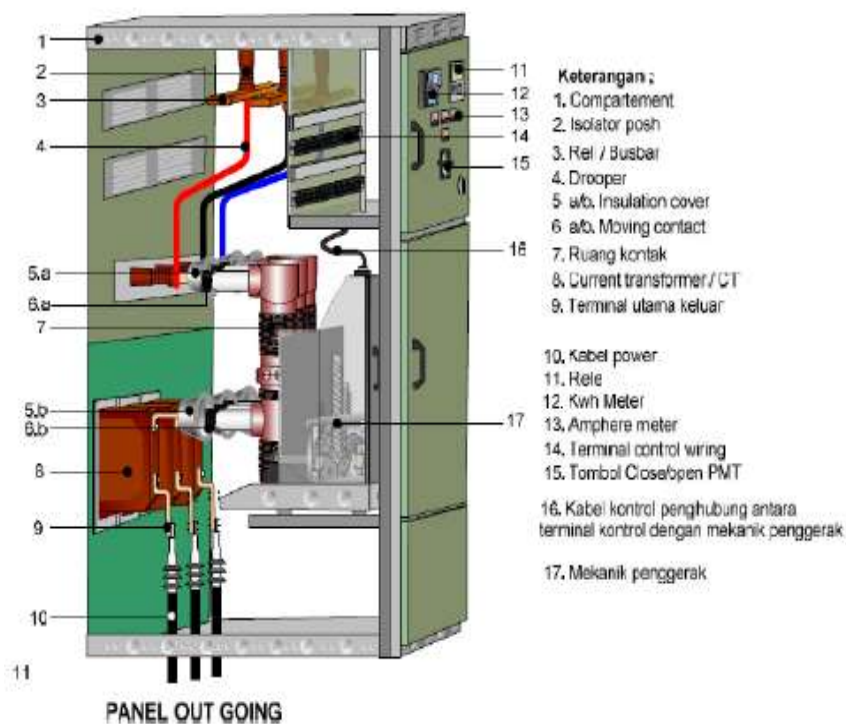
3. Kubikel Pemakaian Sendiri (Trafo PS), berfungsi sebagai penghubung dari rel ke beban pemakaian sendiri GI.
4. Kubikel Kopel (Bus Kopling), berfungsi sebagai penghubung antara rel 1 dengan rel 2. Rel biasa juga disebut seksi.
5. Kubikel PT, berfungsi sebagai sarana pengukuran dan pengaman.
6. Kubikel Bus *Riser* / Bus *Tie* (*Interface*), berfungsi sebagai penghubung antar kubikel.



Gambar 2.31 Kubikel Tegangan Menengah

Sumber: Dokumentasi Pribadi

Di dalam kubikel sendiri terdapat beberapa komponen yang umumnya merupakan komponen isolator dan pengukuran (telah dijabarkan di subbab-subbab sebelumnya). Bagian-bagian pada kubikel TM *outgoing* dapat dilihat pada gambar 2.32.



Gambar 2.32 Bagian-Bagian Kubikel TM Tipe *Outgoing*

Sumber: Radjaja (2014: 7)

2.2.9 Klasifikasi Beban Konsumen Energi Listrik

Berdasarkan jenis konsumen energi listrik, secara garis besar, ragam beban dapat diklasifikasikan ke dalam :

1. Beban rumah tangga, pada umumnya beban rumah tangga berupa lampu untuk penerangan, alat rumah tangga, seperti kipas angin, pemanas air, lemari es, penyejuk udara, mixer, oven, motor pompa air dan sebagainya. Beban rumah tangga biasanya memuncak pada malam hari.
2. Beban komersial, pada umumnya terdiri atas penerangan untuk reklame, kipas angin, penyejuk udara dan alat – alat listrik lainnya yang diperlukan untuk restoran. Beban hotel juga diklasifikasikan sebagai beban komersial (bisnis) begitu juga perkantoran. Beban ini secara drastis naik di siang hari untuk beban perkantoran dan pertokoan dan menurun di waktu sore.



3. Beban industri dibedakan dalam skala kecil dan skala besar. Untuk skala kecil banyak beroperasi di siang hari sedangkan industri besar sekarang ini banyak yang beroperasi sampai 24 jam.
4. Beban Fasilitas Umum

Pengklasifikasian ini sangat penting artinya bila kita melakukan analisa karakteristik beban untuk suatu sistem yang sangat besar. Perbedaan yang paling prinsip dari empat jenis beban diatas, selain dari daya yang digunakan dan juga waktu pembebanannya. Pemakaian daya pada beban rumah tangga akan lebih dominan pada pagi dan malam hari, sedangkan pada beban komersil lebih dominan pada siang dan sore hari. Pemakaian daya pada industri akan lebih merata, karena banyak industri yang bekerja siang-malam. Maka dilihat dari sini, jelas pemakaian daya pada industri akan lebih menguntungkan karena kurva bebannya akan lebih merata. Sedangkan pada beban fasilitas umum lebih dominan pada siang dan malam hari. Beberapa daerah operasi tenaga listrik memberikan ciri tersendiri, misalnya daerah wisata, pelanggan bisnis mempengaruhi penjualan kWh walaupun jumlah pelanggan bisnis jauh lebih kecil dibanding dengan pelanggan rumah tangga. (Kadaffi,2015:1)

2.2.10 Pengaturan Beban Transformator

Transformator mempunyai dua sisi kumparan, yaitu sisi primer dan sekunder. Pada gardu induk, transformator yang digunakan adalah trafo tenaga jenis *step-down* yang bertugas menurunkan tegangan dari 150 kV menjadi 20 kV. Sisi primer trafo tenaga gardu induk terhubung dengan sumber, yaitu sistem transmisi 150 kV. Sedangkan sisi sekunder terhubung dengan beban, atau di gardu induk beban tersebut disebut sebagai penyulang (*feeder*). Dan penyulang ini lah yang nantinya akan menyalurkan listrik ke gardu-gardu distribusi melalui penghantar bawah tanah yang pada akhirnya sampai ke konsumen. Dapat juga dikatakan bahwa tiap gardu induk (GI) sesungguhnya merupakan pusat beban untuk suatu daerah pelanggan tertentu, bebannya berubah-ubah sepanjang waktu sehingga daya yang di bangkitkan dalam pusat-pusat listrik harus selalu berubah. Perubahan daya yang



dilakukan di pusat pembangkit ini bertujuan untuk mempertahankan tenaga listrik tetap pada frekuensi 50Hz. Proses perubahan ini dikoordinasikan dengan Pusat Pengaturan Beban (P3B).

Suatu faktor utama yang paling penting dalam perencanaan sistem distribusi adalah karakteristik dari berbagai beban. Karakteristik beban diperlukan agar sistem tegangan dan pengaruh termis dari pembebanan dapat dianalisis dengan baik. Analisis tersebut termasuk dalam menentukan keadaan awal yang akan di proyeksikan dalam perencanaan selanjutnya. Penentuan karakteristik beban listrik suatu gardu distribusi sangat penting artinya untuk mengevaluasi pembebanan gardu tersebut, ataupun dalam merencanakan suatu gardu yang baru. Karakteristik beban ini sangat memegang peranan penting dalam memilih kapasitas transformator secara tepat dan ekonomis. Di lain pihak sangat penting artinya dalam menentukan rating peralatan pemutus rangkaian, analisa rugi-rugi dan menentukan kapasitas pembebanan dan cadangan tersedia dan suatu gardu. Karakteristik beban listrik suatu gardu sangat tergantung pada jenis beban yang dilayaninya. Hal ini akan jelas terlihat dan hasil pencatatan kurva beban suatu interval waktu.

Tenaga listrik yang didistribusikan ke pelanggan (konsumen) digunakan sebagai sumber daya untuk bermacam-macam peralatan yang membutuhkan tenaga listrik sebagai sumber energinya. Peralatan tersebut umumnya bisa berupa lampu (penerangan), beban daya (untuk motor listrik), pemanas, dan sumber daya peralatan elektronik (Fadillah, 2015: 2). Seperti kita ketahui fluktansi beban di Indonesia secara umum sangat tajam perbedaan antara beban puncak dan di luar beban puncak. Hal ini bila ditinjau dari segi efisiensi trafo menjadi kurang baik terutama pada beban yang sangat rendahnya, selanjutnya bila penyediaan kapasitas trafo didasarkan pada beban (beban puncak) bila dikaitkan pada segi ekonomi, menjadi kurang efisien. Sebab bisa jadi hanya untuk memikul beban yang rendah dilayani oleh trafo dengan kapasitas yang besar. Beban pada trafo distribusi tergantung dari sifat dan jenis beban, yaitu:

1. Sifat beban untuk pelanggan rumah tangga: beban puncak malam hari jauh lebih tinggi dari pada beban puncak siang hari.



2. Sifat beban untuk pelanggan industri: beban puncak siang hari jauh lebih tinggi dari pada beban puncak malam hari.

Transformator mengatur secara otomatis arus inputnya untuk mendapatkan arus output atau beban yang diperlukan. Arus penguat adalah jumlah arus yang sangat rendah untuk mempertahankan rangkaian magnetis. Pengaturan transformator tergantung pada gaya elektromotif lawan yang dibangkitkan pada kumparan primernya oleh magnetismenya sendiri dan magnetisme berlawanan yang dihasilkan oleh arus yang ditarik oleh beban pada kumparan sekunder.

Pengaturan beban trafo menyesuaikan kebutuhan beban konsumen. Kebutuhan tersebut semakin lama semakin meningkat sesuai dengan pertumbuhan penduduk dan ekonomi. Peningkatan kebutuhan listrik membuat beban trafo semakin besar yang kemudian akan membuat trafo tersebut *overload*. Maka diperlukan penyesuaian beban pada trafo untuk mencegah atau meminimalisir kerugian yang ditimbulkan dari kondisi *overload*.

2.2.10.1 Beban Transformator *Overload*

Transformator daya akan bekerja secara kontinyu apabila transformator tersebut berada pada beban nominalnya. Namun apabila beban yang dilayani lebih besar dari 100%, maka transformator tersebut akan mendapat pemanasan lebih dan hal ini akan mempersingkat umur isolasi transformator keadaan beban lebih berbeda dengan arus lebih. Pada beban lebih, besar arus hanya kira-kira 10% di atas nominal dan dapat diputuskan setelah berlangsung beberapa puluh menit. Sedangkan pada arus lebih, besar arus mencapai beberapa kali arusunominal dan harus diputuskan secepat mungkin (Sumanto, 1996: 31).

Overload terjadi karena beban yang terpasang pada trafo melebihi kapasitas maksimum yang dapat dipikul trafo dimana arus beban melebihi arus beban penuh (*full load*) dari trafo. Beban lebih yang terjadi seringkali secara perlahan dalam periode waktu tertentu menimbulkan kerusakan pada trafo. Namun jika pembebanan trafo sudah terlanjut mencapai 80%, maka pengaturan/penyesuaian



beban trafo dapat dilakukan dengan mengalihkan sebagian beban ke sumber lain. Ada beberapa pilihan menyesuaikan kondisi di lapangan, diantaranya:

1. Pengalihan ke trafo lain yang masih di dalam satu gardu induk

Pada umumnya, setiap gardu induk mempunyai lebih dari satu trafo tenaga. Jika keadannya demikian, maka sebagian beban trafo yang mengalami *overload*, dapat dialihkan ke trafo lain di gardu induk tersebut yang belum mengalami *overload*. Terdapat juga gardu induk yang mempunyai trafo cadangan, artinya trafo tersebut memang dikhususkan untuk menggantikan trafo yang *overload* atau mengalami gangguan dan tidak dioperasikan secara aktif. Beban trafo yang mengalami gangguan atau *overload* juga dapat otomatis dialihkan ke trafo cadangan ini jika memang trafo aktif lain di gardu tersebut juga tidak memungkinkan untuk ditambahkan bebannya. Pilihan pertama ini lebih efisien dalam hal waktu dan tenaga karena manuver/tindakan yang dapat dilakukan masih dalam satu gardu induk.

2. Pengalihan ke gardu induk lain

Tak jarang ditemui gardu induk yang tidak mempunyai trafo yang dikhususkan menjadi trafo cadangan, hanya terdapat trafo-trafo yang dioperasikan secara aktif. Jika salah satu trafo mengalami gangguan atau *overload*, dan trafo lain yang masih di satu gardu induk juga tidak memungkinkan untuk ditambah beban, serta gardu induk tersebut tidak mempunyai trafo cadangan, maka harus dilakukan pengalihan ke gardu induk lain yang masih terkoneksi dengan gardu induk yang trafonya bermasalah tersebut. Karena biasanya suatu gardu induk akan terhubung dengan beberapa gardu induk lain yang terdekat. Maka koordinasi dengan gardu induk lain diperlukan agar pengalihan beban dapat terlaksana. Ini memerlukan waktu dan tenaga yang lebih.

3. Pelepasan beban

Jika pilihan 1 dan 2 tidak dapat dilakukan, maka untuk mencegah kerugian yang lebih besar yang dapat ditimbulkan akibat trafo *overload* seperti meledaknya trafo tersebut, maka pelepasan sebagian atau seluruh beban trafo harus dilakukan. Pilihan ketiga ini merupakan pilihan terakhir yang terpaksa dilakukan.



Pendistribusian listrik ke konsumen pun terhenti karena tidak adanya lagi sumber yang dapat memasok listrik.

2.2.11 Daya Listrik

Menurut Cekdin & Barlian (2013: 6), daya listrik didefinisikan sebagai energi yang dikeluarkan atau kerja yang dilakukan setiap detik oleh arus dalam 1 A yang pada tegangan 1 V, dengan persamaan sebagai berikut:

$$P = I \times V \dots\dots\dots (2.31)$$

$$P = I^2 \times R \dots\dots\dots (2.32)$$

2.2.11.1 Daya Aktif

Daya aktif atau daya nyata adalah daya yang digunakan untuk menimbulkan cahaya, panas, gerak, dan lain lain yang dalam rangkaian listrik digambarkan berupa beban resistif. Simbol daya aktif adalah P dan satuannya adalah Watt. Menurut Daryanto (2010: 104), untuk tenaga listrik nyata (wujud) yang dikeluarkan oleh arus bolak-balik yang mempunyai fasa ϕ^0 dengan tegangan bolak-balik yaitu:

$$W = E \times I \times \cos \phi \dots\dots\dots (2.33)$$

L-L/ 3 fasa;

$$P = \sqrt{3} \times V_{L-L} \times I \times \cos \phi \dots\dots\dots (2.34)$$

$\cos \phi$ (dibaca cosinus phi) dinamakan factor kerja (*power factor*).

2.2.11.2 Daya Reaktif

Menurut Daryanto (2010: 105), daya reaktif adalah daya yang secara elektrik bisa diukur. Secara vector merupakan penjumlahan vector dari perkalian $E \times I$ di mana arus mengalir pada komponen resistor sehingga arah vector searah dengan tegangan (referensinya), dan vector yang arah 90° terhadap tegangan, tergantung pada beban seperti induktif atau kapasitif. Biasanya daya yang searah dengan tegangan disebut dengan daya aktif sedangkan yang lain disebut dengan



daya reaktif. Simbol daya reaktif adalah Q dan satuannya adalah Volt Amper Reaktif (VAR). Untuk tenaga listrik reaktif yang dikeluarkan oleh arus bolak-balik, yang mempunyai fasa ϕ^0 dengan tegangan bolak-balik, yaitu:

$$\text{Tenaga reaktif (VAR)} = E \times I \times \sin \phi \dots\dots\dots (2.35)$$

Daya reaktif adalah daya imajiner yang menunjukkan adanya pergeseran grafik sinusoidal arus dan tegangan listrik AC akibat adanya beban reaktif. Daya reaktif ada dua yaitu daya reaktif induktif dan daya reaktif kapasitif. Daya reaktif induktif adalah daya yang timbul karena adanya medan magnet yang berubah dalam suatu penghantar yang dialiri arus listrik bolak balik. Daya reaktif induktif yang dominan, timbul pada kumparan seperti motor listrik, trafo, generator, reaktor dan lain lain yang dalam rangkaian listrik digambarkan berupa beban Induktif XL.

Daya reaktif kapasitif adalah daya yang timbul karena adanya medan listrik yang ditimbulkan oleh suatu penghantar yang bertegangan listrik bolak balik. Daya reaktif kapasitif, timbul pada suatu kapasitor, kabel tenaga dan lain-lain yang dalam rangkaian listrik digambarkan berupa beban Kapasitif XC.

2.2.11.3 Daya Semu

Daya semu merupakan gabungan, penjumlahan daya aktif dan daya reaktif secara vektor. Daya ini melalui suatu penghantar transmisi atau distribusi dan merupakan hasil perkalian antara tegangan dan arus yang melalui penghantar. Daya semu atau *apparent power* S dinyatakan dalam satuan Volt-Ampere (VA) menyatakan kapasitas peralatan listrik, seperti yang tertera pada peralatan generator, transformator dan bahkan di KWh meter rumah kita (Edminister & Nahvi, 2003: 150).

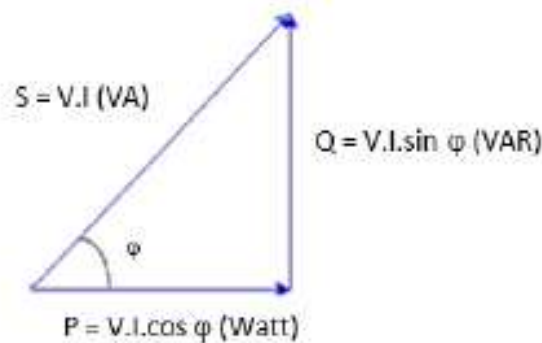
$$L - L / 3 \text{ fasa ; } S_3 = \sqrt{3} \times V_{L-L} \times I \dots\dots\dots (2.36)$$

2.2.11.4 Segitiga Daya

Segitiga daya merupakan grafik hubungan yang terbentuk oleh tiga jenis daya yang diawali dari besaran listrik yang terjadi saat proses penyaluran, seperti



tegangan dan arus listrik karena saat proses penyaluran tenaga listrik dari pembangkit menuju konsumen, akan terdapat arus yang mengalir pada penghantar yang menghasilkan medan magnet dan terbentuklah nilai induktansi (L) selanjutnya pada penghantar tersebut juga terdapat tegangan yang menyebabkan terjadinya medan magnet sehingga timbulah nilai kapasitansi (C). Dari hal tersebut, daya listrik digambarkan sebagai segitiga siku seperti pada gambar 2.37, yang secara



vektoris adalah penjumlahan daya aktif dan reaktif. Adapun sebagai resultaninya ialah daya semu atau daya buta (Daryanto, 2010: 105).

Gambar 2.33 Segitiga Daya

Sumber: Materi Diklat Pemeliharaan Trafo PLN Puslitbang

Sesuai dengan hubungan segitiga di atas maka hubungan antara daya nyata, daya reaktif dan daya semu dapat diekspresikan ke dalam sebuah persamaan pitagoras berikut ini:

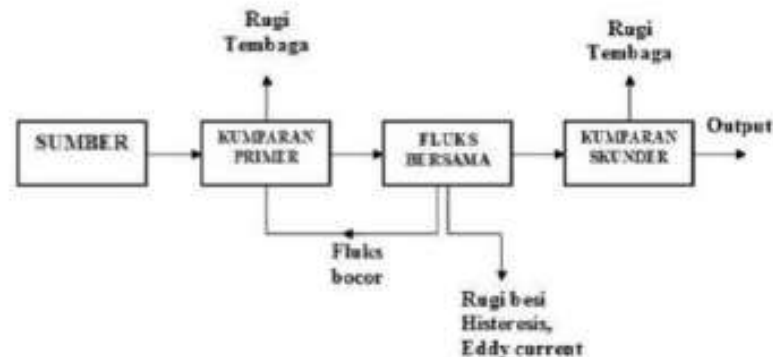
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \dots \dots \dots (2.37)$$

2.2.12 Rugi-Rugi Transformator

Menurut Rijono (1997: 23) rugi-rugi daya transformator berupa rugi inti atau rugi besi dan rugi tembaga yang terdapat pada kumparan primer maupun sekunder. Untuk mengurangi rugi besi haruslah diambil inti besi yang penampangnya cukup besar agar fluks magnet mudah mengalir di dalamnya. Untuk memperkecil rugi tembaga, harus diambil kawat tembaga yang penampangnya cukup besar untuk mengalirkan arus listrik yang diperlukan. Rugi inti terdiri dari rugi arus eddy dan rugi histerisis. Rugi arus eddy timbul akibat adanya arus pusar



pada inti yang menghasilkan panas. Adapun arus pusar inti ditentukan oleh tegangan induksi pada inti yang menghasilkan perubahan- perubahan fluks magnet.



Rugi histerisis merupakan rugi tenaga yang disebabkan oleh fluks magnet bolak-balik pada inti. Gambar di bawah ini adalah diagram rugi-rugi pada transformator:

Gambar 2.34 Diagram Rugi-Rugi Transformator

Sumber: Rijono (1997: 23)

2.2.12.1 Rugi Tembaga (Pcu)

Arus yang mengalir pada kumparan akan menimbulkan rugi-rugi tembaga sedang fluks pada inti akan menimbulkan rugi-rugi arus Eddy dan rugi-rugi histeris, kedua rugi-rugi ini disebut rugi-rugi inti. Semua rugi-rugi ini akan menimbulkan suhu yang tinggi pada isolasi trafo (Tobing, 2012: 193). Rugi yang disebabkan arus beban mengalir pada kawat tembaga dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P_{CU} = I^2 R \dots \dots \dots (2.38)$$

Karena arus beban berubah-ubah, rugi tembaga juga tidak tetap atau bergantung pada beban (Liklikwatil, 2014: 204). Pada saat arus mengalir melewati koil, resistansi kawat koil akan menghasilkan rugi-rugi yang dikenal dengan nama rugi-rugi tembaga atau seperti pada persamaan 2.38, yang berarti bahwa daya yang diserap oleh kawat sebanding dengan kuadrat arus dan didisipasikan sebagai panas. Dengan meningkatnya temperatur kawat, resistansinya juga akan bertambah besar dan oleh karenanya rugi-rugi pada persamaan 2.38 kawat juga semakin besar. Di samping itu, temperatur yang tinggi dapat mengakibatkan degradasi isolasi kawat yang pada gilirannya dapat memperpendek usia transformator (Hayt, 2005:27).



2.2.12.2 Rugi Besi (P_i)

Menurut (Liklikwatil, 2014: 204), rugi besi terdiri atas:

- a) Rugi Histerisis, yaitu rugi yang disebabkan fluks bolak-balik pada inti besi yang dinyatakan sebagai:

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{maks} \dots\dots\dots (2.39)$$

Keterangan:

K_h = konstanta

B_{maks} = fluks maksimum (weber) (1 weber = 108 maxwel)

- b) Rugi arus eddy, yaitu rugi yang disebabkan arus pusar pada inti besi. Dirumuskan sebagai:

$$P_e = K_e \cdot f^2 \cdot B_{maks} \dots\dots\dots (2.40)$$

$$B_M = \frac{\phi_M}{A} \dots\dots\dots (2.41)$$

Dimana,

$$\phi_M = \frac{10^8 \cdot (E_{ff})_2}{4,44 \cdot f \cdot N_2} \dots\dots\dots (2.42)$$

Dan

$$(E_{ff})_2 = 4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot \phi_M \cdot 10^8 \text{ Volt} \dots\dots\dots (2.43)$$

Jadi, rugi besi (rugi inti) adalah:

$$P_i = P_h + P_e \dots\dots\dots (2.44)$$



2.2.12.3. Efisiensi Transformator

Efisiensi dinyatakan sebagai:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + \Sigma \text{rugi}} = 1 - \frac{\Sigma \text{rugi}}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.45)$$

Keterangan:

η = efisiensi (%)

P_{out} = daya keluar (watt)

P_{in} = daya masuk (watt)

Dimana:

$$\Sigma \text{rugi} = P_{Cu} + P_i \dots\dots\dots (2.46)$$

2.2.13 Software ETAP

ETAP (*Electrical Transient Analyzer Program*) adalah *software* yang berfungsi untuk menganalisis sistem tenaga listrik yang menampilkan secara GUI (*Graphical User Interface*). *Software* ini dapat bekerja secara *offline* dan *online*, dimana secara *offline software* ini digunakan untuk mensimulasikan tenaga listrik, sedangkan secara *online software* ini untuk pengelolaan data secara *real time*. Berbagai macam analisa tenaga listrik yang dapat dilakukan dengan menggunakan *software* ETAP seperti, analisa aliran daya, analisa hubungan singkat.

Dalam membuat rancangan dan analisis sistem tenaga listrik dalam simulasi ETAP 16.0 ada beberapa tahap yang harus dilakukan, berikut ini langkah-langkah yang harus dikerjakan:

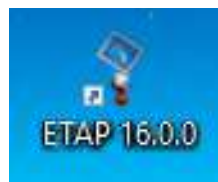
1. Mengumpulkan data-data yang diperlukan
2. Membuat *single line* diagram
3. Analisis *load flow*



4. Mencetak hasil *load flow*

Langkah pertama adalah mengumpulkan data-data seperti gambar jaringan yang dibutuhkan, data penghantar seperti jenis dan panjang, spesifikasi transformator, beban transformator seperti rating dan level tegangan. Setelah data lengkap langkah kedua, ketiga dan keempat dilakukan dalam ETAP 16.0. berikut di bawah ini cara memulai menjalankan simulasi ETAP 16.0.

1. Buka *Software* ETAP 16.0



Gambar 2.35 Software ETAP 16.0

Sumber : Dokumentasi Pribadi

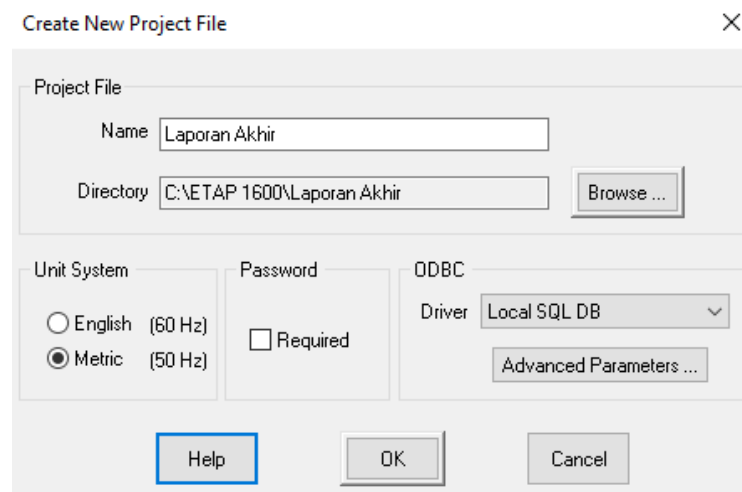
2. Klik *icon New* pada *Toolbar Options*



Gambar 2.36 Icon New pada Toolbar Options

Sumber : Dokumentasi Pribadi

3. Beri nama file, kemudian klik OK



Gambar 2.37 Tampilan Input Nama File



Sumber : Dokumentasi Pribadi

4. Isi Nama user, kemudian klik OK

User Information [X]

User Name: [OK]

Full Name: [Cancel]

Description:

Password: [Delete]

Confirmed Password: [Help]

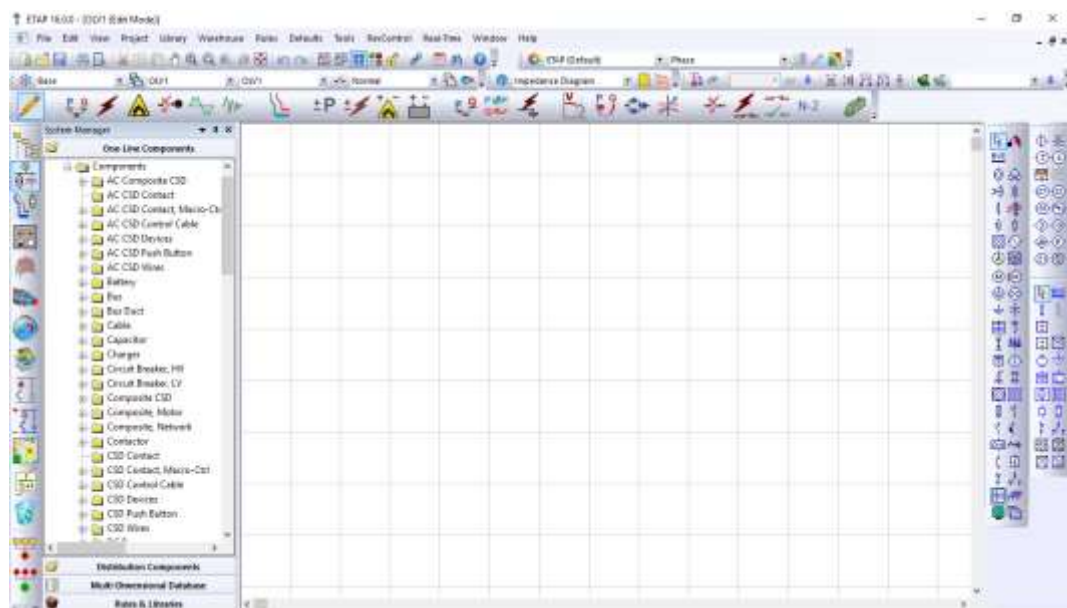
Access level permissions

<input checked="" type="checkbox"/> Administrator	<input checked="" type="checkbox"/> Revision Editor	<input checked="" type="checkbox"/> Librarian
<input checked="" type="checkbox"/> Project Editor	<input checked="" type="checkbox"/> Checker	<input checked="" type="checkbox"/> Controller
<input checked="" type="checkbox"/> Base Editor	<input checked="" type="checkbox"/> Browser	<input checked="" type="checkbox"/> Operator

Gambar 2.38 Tampilan Nama User

Sumber : Dokumentasi Pribadi

5. Tampilan lembar kerja ETAP 16.0



Gambar 2.39 Tampilan Lembar Kerja ETAP 16.0



Sumber : Dokumentasi Pribadi