

BAB II

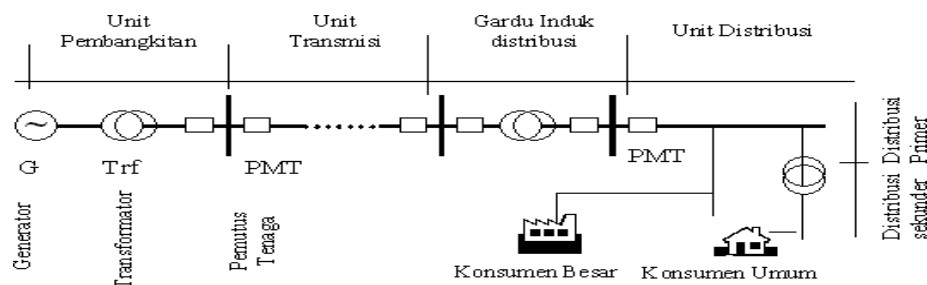
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Sistem Distribusi Tenaga Listrik¹

Sistem Distribusi berfungsi sebagai penyalur energi listrik dari sumber pembangkitan energi hingga sampai ke pelanggan atau konsumen. Adapun fungsi utama dari sistem distribusi tenaga listrik yakni:

- Membagikan atau mendistribusikan energi listrik ke beberapa tempat atau kepada konsumen.
- Merupakan sistem tenaga listrik yang mempunyai hubungan langsung kepada para pelanggan atau konsumen.

Dengan menaikkan tegangan listrik, maka kerugian-kerugian daya listrik pada saluran transmisi akan semakin minimal. Dari saluran transmisi, tegangan akan diturunkan menjadi 20 KV dengan trafo penurun tegangan yang terdapat pada gardu induk distribusi, kemudian dengan menggunakan sistem tegangan tersebut, penyaluran tenaga daya listrik selanjutnya dilakukan oleh saluran distribusi utama atau primer. Dari saluran distribusi utama atau primer ini, maka gardu distribusi akan mengambil tegangan listrik untuk kemudian diturunkan tegangannya dengan menggunakan trafo distribusi menjadi suatu sistem tegangan rendah, yaitu 220/380V yang selanjutnya akan disalurkan oleh jaringan distribusi sekunder kepada pelanggan-pelanggan atau konsumen.



Gambar 2.1 Line Diagram sistem tegangan tenaga listrik.

Syufrijal, Readysal Monantun, Jaringan Distribusi Tenaga Listrik, Kementerian Pendidikan Dasar Menengah dan Kebudayaan Republik Indonesia, 2014, hlm. 15.

¹ Syufrijal, Readysal Monantun, Jaringan Distribusi Tenaga Listrik, Kementerian Pendidikan Dasar Menengah dan Kebudayaan Republik Indonesia, 2014, hlm. 15.

2.2 Pengelompokan Jaringan Tenaga Listrik

Pengelompokan jaringan tenaga listrik serta pembatasan-pembatasannya di lakukan seperti pada gambar di atas:

2.2.1 Bagian Pembangkit (Generator)

Pembangkit listrik bekerja dengan mengubah energi potensial menjadi energi mekanik yang dimana energi mekanik ini akan digunakan untuk menghasilkan energi listrik. Jadi generator ini berfungsi untuk mengubah energi potensial. Energi potensial ini menggerakkan turbin yang dimana turbin ini akan menghasilkan energi mekanik. Energi mekanik ini akan digunakan untuk menghasilkan energi listrik.

2.2.2 Bagian Penyaluran (Transmisi)

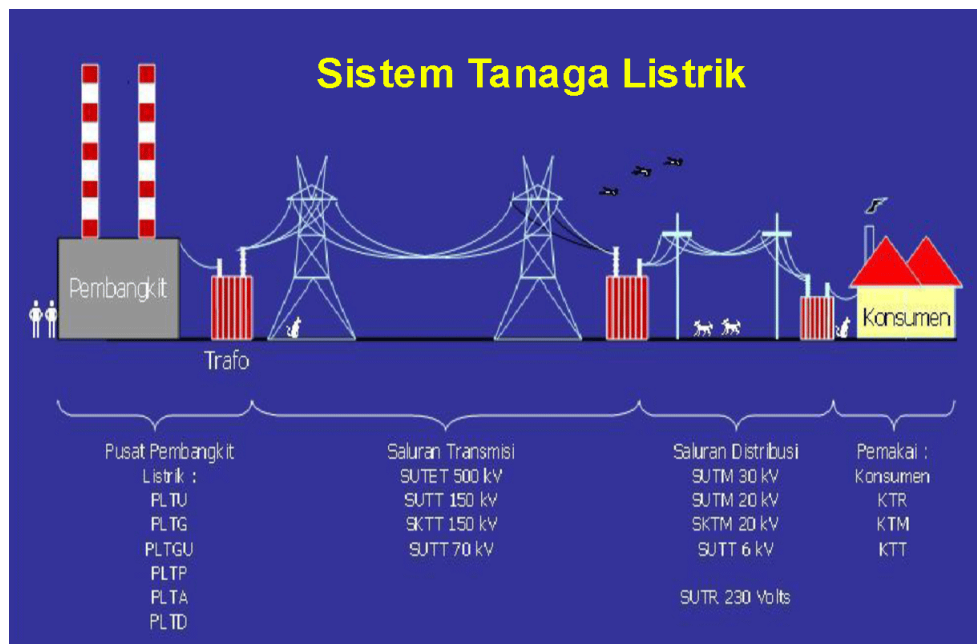
Sistem Transmisi ini merupakan penyaluran energi listrik dari suatu tempat ke tempat yang lainnya atau dari pembangkit listrik ke Gardu induk. Sebelum energi listrik disalurkan, hal pertama yang dilakukan adalah menaikkan tegangan yang di suplay dari generator menjadi 70 KV, 150 KV dan 500 KV. Karena tegangan padagenerator hanya mengeluarkan tegangan yang berkisar 6,6 KV – 24 KV. Tujuan untuk menaikkan suplay tegangan ini bertujuan untuk mengurangi rugi – rugi daya pada saluran transmisi dan juga untuk mengimbangi jauhnya jarak saluran transmisi karena semakin panjang kabel maka tegangan akan semakin susut. Energi listrik ini di transmisikan melalui SUTT (Saluran Utama Tegangan Tinggi) dan SUTET (Saluran Utama Tegangan Extra Tinggi).

2.2.3 Bagian Distribusi Primer

Distribusi primer ini disalurkan dari gardu induk (GI) di sisi sekunder trafo daya ke gardu distribusi (sisi primer) atau dari gardu induk langsung ke konsumen tegangan menengah 20 KV yang dimana tegangan ini diturunkan terlebih dahulu ke 20 KV melalui transformator step down. Contoh dari konsumen ini adalah Rumah Sakit, Mall, dan lain-lain.

2.2.4 Bagian Distribusi Sekunder

Distribusi sekunder ini di salurkan dari gardu induk (sisi sekunder trafo distribusi) ke konsumen tegangan rendah. Energi ini disalurkan melalui penyulang – penyulang yang berupa saluran udara tegangan rendah (SUTR) atau Saluran Kabel Tegangan Rendah (SKTR). Penyulang ini biasanya terletak pada dekat gardu induk yang dimana dari penyulang ini akan masuk ke jurusan listrik setempat atau akan masuk ke kubikel. Fungsi gardu distribusi ini untuk menurunkan tegangan dari distribusi primer menuju ke distribusi sekunder dengan tegangan 220/380 Volt.



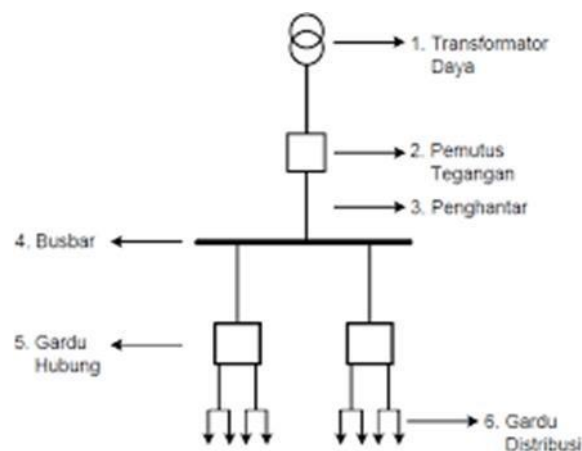
Gambar 2.2 Sistem Tenaga Listrik.

Syufrijal, Readysal Monantun, Jaringan Distribusi Tenaga Listrik, Kementrian Pendidikan Dasar Menengah dan Kebudayaan Republik Indonesia, 2014, hlm. 15.

2.3 Jaringan Sistem Distribusi Primer

Sistem jaringan distribusi primer atau sering disebut jaringan distribusi tegangan menengah (JDTM) terletak diantara gardu induk dengan gardu pembagi (kubikel), yang memiliki tegangan sistem lebih dari tegangan terpakai untuk konsumen. Standar tegangan untuk jaringan distribusi primer ini adalah 6 kV, 10 kV dan 20 kV (sesuai standar PLN). Sistem distribusi primer ini dibagi menjadi:

- a. Transformator daya, berfungsi untuk menaikkan dan menurunkan tegangan
- b. Pemutus Tegangan, berfungsi sebagai pengaman yaitu pemutus daya
- c. Penghantar, berfungsi sebagai penghubung daya atau penyaluran daya
- d. Gardu Hubung, berfungsi untuk menyalurkan daya ke gardu distribusi tanpa mengubah mengubah tegangan.
- e. Gardu Distribusi, berfungsi untuk menurunkan tegangan 20 kV menjadi tegangan 220/380V.

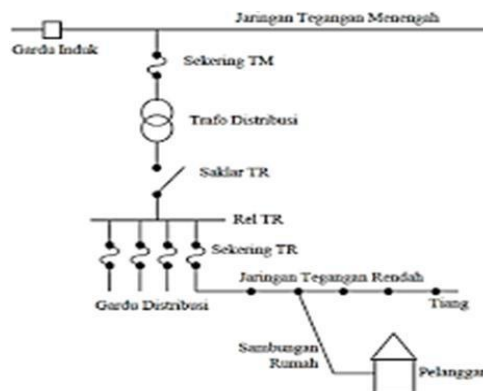


Gambar 2.3 Bagian sistem distribusi primer.

Syufrijal, Readysal Monantun, Jaringan Distribusi Tenaga Listrik, Kementerian Pendidikan Dasar Menengah dan Kebudayaan Republik Indonesia, 2014, hlm. 15.

2.4 Jaringan sistem distribusi Sekunder

Sistem jaringan distribusi sekunder atau sering disebut jaringan distribusi tegangan rendah (JDTM), merupakan jaringan yang berfungsi sebagai penyalur energi listrik dari gardu pembagi (kubikel) ke pusat beban (konsumen tenaga listrik). Besarnya standar tegangan jaringan untuk jaringan distribusi sekunder ini adalah 127/220 Volt pada sistem lama, dan 220/380 Volt pada sistem baru untuk perumahan, serta 440/550 Volt untuk keperluan industri.



Gambar 2.4 Bagian sistem distribusi sekunder.

Syufrijal, Readysal Monantun, Jaringan Distribusi Tenaga Listrik, Kementerian Pendidikan Dasar Menengah dan Kebudayaan Republik Indonesia, 2014, hlm. 15.

Dari tata letaknya, dapat diketahui ialah diketahui bahwa sistem ini ialah sistem yang berhubungan langsung dengan konsumen, sehingga sistem ini memiliki fungsi menerima dan mengirimkan sumber listrik dari transformator distribusi ke konsumen. Penyaluran daya listrik pada jaringan sekunder dapat dibedakan menjadi dua yaitu;

- a. SUTR (Saluran Udara Tegangan Rendah) merupakan jenis penghantar yang digunakan tanpa isolasi, seperti AAAC (*All Aluminium Alloy Conductor*), dan ACSR (*Aluminum Conductors Steel Reinforced*).
- b. SKTUR (Saluran Kabel Udara Tegangan Rendah) merupakan jenis penghantar yang dipakai dengan isolasi seperti kabel LVTC (*Low Voltage Twisted Cable*).

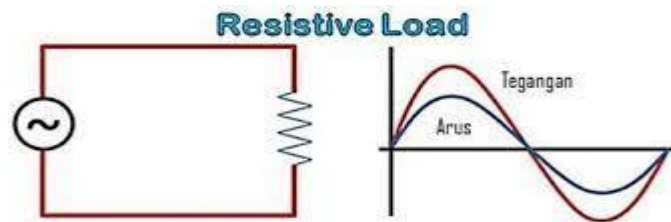
2.5 Macam – macam beban²

Macam – macam beban listrik antara lain :

2.5.1 Beban Resistif

Beban Resistif adalah sebuah peralatan listrik yang didalamnya terdapat komponen yang bekerja dengan sistem resistansi. Jadi, jenis beban ini hanya mengonsumsi daya aktif. Beban resistif tidak akan mengakibatkan perubahan pada faktor daya, sehingga memiliki nilai *cos phi* yang tetap.

² Jumadi, Analisis Pengaruh Jenis Beban Listrik Terhadap Kinerja Pemutus Daya Listrik di Gedung Cyber Jakarta, dalam Jurnal Energi dan Kelistrikan, Vol. 7, No. 2, Juni – Desember, 108.



Gambar 2.5 Gambar Beban Resistif.

Jumadi, Analisis Pengaruh Jenis Beban Listrik Terhadap Kinerja Pemutus Daya Listrik di Gedung *Cyber* Jakarta, dalam Jurnal Energi dan Kelistrikan, Vol. 7, No. 2, Juni – Desember, 108.

Adapun rumus daya pada beban resistif yaitu :

$$P = V \times I \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan

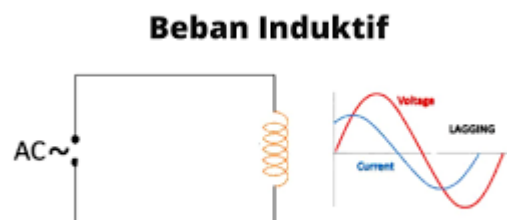
P = Daya (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

2.5.2 Beban Induktif

Beban induktif adalah alat listrik yang menggunakan beban induktif biasanya beroperasi dengan prinsip kerja induksi. Tidak hanya itu saja, alat listrik yang menggunakan beban induktif juga memakai kawat penghantar. Umumnya kawat ini dililitkan pada bagian inti kumparan untuk menghambat laju arus pada rangkaian instalasi listrik. Karakteristik lain dari alat yang menggunakan beban induktif yakni adanya daya harmonik yang dihasilkan. Daya ini nantinya bisa menyerap daya aktif sekaligus daya reaktif dalam rangkaian. Akhirnya daya cosphi pada rangkaian listrik juga akan mengalami penurunan.



Gambar 2.6 Beban Induktif.

Jumadi, Analisis Pengaruh Jenis Beban Listrik Terhadap Kinerja Pemutus Daya Listrik di Gedung *Cyber* Jakarta, dalam Jurnal Energi dan Kelistrikan, Vol. 7, No. 2, Juni – Desember, 108.

Maka rumus untuk beban induktif satu fasa yaitu :

$$P = V \times I \times \text{Cosphi} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana :

P = Daya (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

Coshphi = Faktor daya dengan nilai <1

Rumus untuk beban induktif 3 fasa yaitu :

$$P = V \times I \times \text{Coshphi} \times \sqrt{3} \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana :

P = Daya (Watt)

V = Tegangan (Volt)

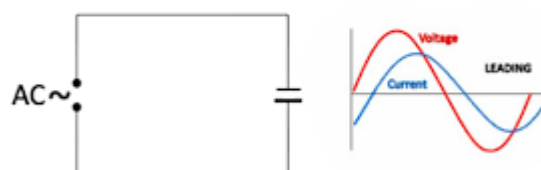
I = Arus (Ampere)

Coshphi = Faktor daya dengan nilai <1

2.5.3 Beban kapasitif

Beban Resistif adalah alat-alat listrik yang bekerja dengan beban kapasitif biasanya memiliki kemampuan kapasitansi. Bisa dikatakan kapasitansi yakni tingkat kemampuan penyerapan energi listrik sementara. Jadi nantinya daya aktif akan diserap dan sebaliknya daya reaktif ini akan dihilangkan.

Beban Kapasitif



Gambar 2.7 Beban Kapasitif.



Maka rumus untuk beban kapasitif satu fasa yaitu :

$$P = V \times I \times \text{Cosphi} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana :

P = Daya (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

Coshphi = Faktor daya dengan nilai <1

Rumus untuk beban kapasitif 3 fasa yaitu :

$$P = V \times I \times \text{Coshphi} \times \sqrt{3} \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana :

P = Daya (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

Coshphi = Faktor daya dengan nilai <1

Sehingga alat-alat yang berkerja dengan sistem ini memang biasanya digunakan untuk memperbaiki faktor daya. Namun tentunya dalam kapasitas tertentu, justru alat yang beroperasi dengan beban kapasitif juga berfungsi untuk memperkecil nilai cosphi.

2.6 Tipe – Tipe Jaringan Distribusi³

Ada beberapa tipe – tipe jaringan distribusi, antara lain

2.6.1 Sistem Radial

Merupakan jaringan distribusi primer yang sederhana dan murah biaya investasinya. Pada jaringan ini arus yang paling besar adalah yang paling dekat dengan Gardu Induk. Tipe ini dalam penyaluran energi listrik kurang handal karena bila terjadi gangguan pada penyulang maka akan menyebabkan terjadinya pemadaman pada penyulang tersebut.

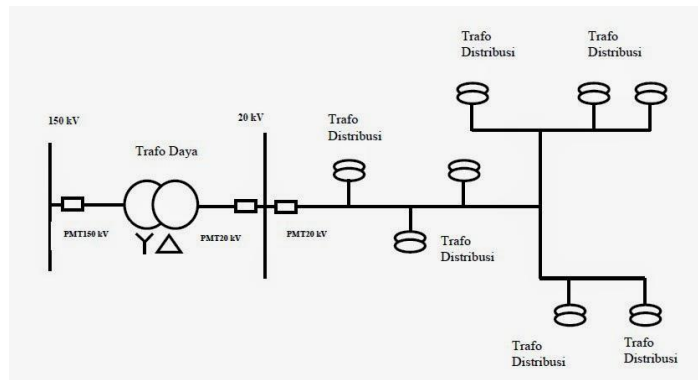
Kelebihan:

- a. Lebih Murah Biaya investasinya
- b. Lebih sederhana pengendalian dan sistemnya

³ <https://iaeeta.org/2017/09/29/tipe-tipe-jaringan-distribusi-listrik/>. (diakses 15 juni 2022)

Kekurangan:

- a. Kuliatan listrik yang kurang baik.
- b. Jika mengalami gangguan pada satu titik maka semua titik yang lain akan padam.



Gambar 2.8 Sistem Radial

2.6.2 Sistem Ring/Loop

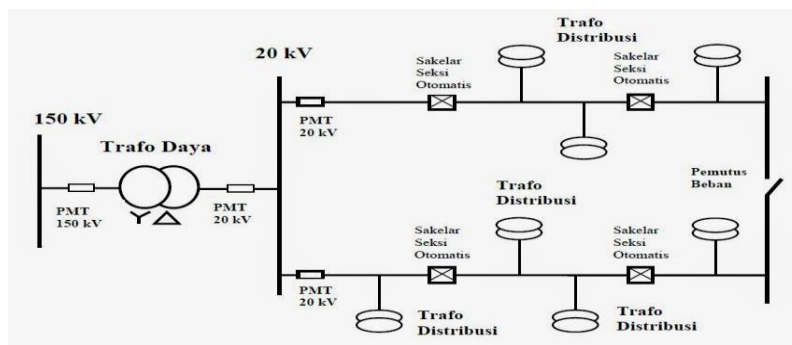
Tipe ini merupakan jaringan distribusi primer, gabungan dari dua tipe Jaringan radial dimana ujung kedua jaringan dipasang PMT. Pada keadaan normal tipe ini bekerja secara radial dan pada saat terjadinya gangguan PMT dapat dioperasikan sehingga gangguan dapat terlokalisir. Tipe ini lebih handal dalam penyaluran tenaga listrik dibandingkan tipe radial namun biaya investasinya lebih mahal.

Kelebihan:

- a. Kualitas listrik lebih baik/handal
- b. Jika mengalami gangguan pada satu titik maka titik yang lain dapat di aliri arus listrik dari PMT yang lain.

Kekurangan:

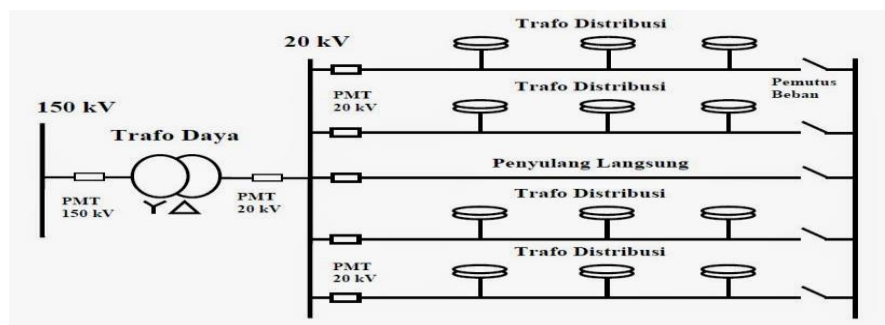
- a. Lebih Mahal biaya investasinya.
- b. Lebih rumit pengendalian dan sistemnya.



Gambar 2.9 Sistem Loop/Ring

2.6.3 Sistem Spindel

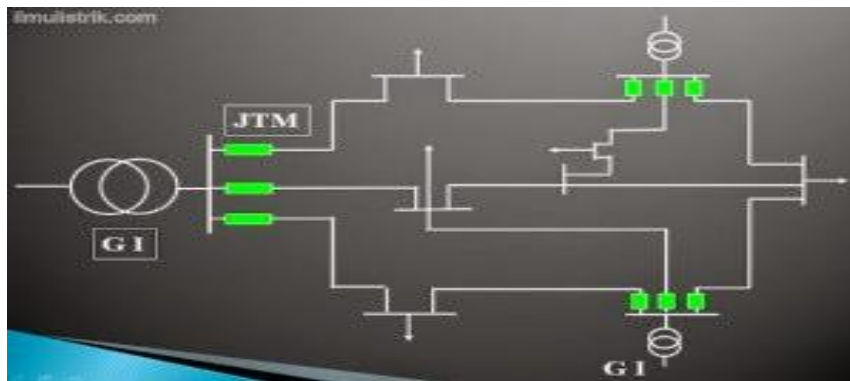
Jaringan ini merupakan jaringan distribusi primer gabungan dari struktur radial yang ujung – ujungnya dapat disatukan pada gardu hubung dan terdapat penyulang express. Penyulang express (*express feeder*) ini harus selalu dalam keadaan bertegangan dan siap terus menerus untuk menjamin bekerjanya sistem dalam menyalurkan energi listrik ke beban pada saat terjadi gangguan atau pemeliharaan. Dalam keadaan normal tipe ini beroperasi secara radial.



Gambar 2.10 Sistem Spindel

2.6.4 Sistem Mesh

Struktur jaringan distribusi ini dibentuk dari beberapa Gardu Induk yang saling berhubungan sehingga daya beban disuplai oleh lebih dari satu gardu induk dibandingkan dengan dua tipe sebelumnya, tipe ini lebih handal dan biaya investasinya lebih mahal.



Gambar 2.11 Gambar Mesh

2.7 Macam – macam gardu distribusi⁴

2.7.1 Gardu Distribusi

Gardu distribusi merupakan bangunan instalasi yang terdiri atas peralatan seperti, pemutus, pengaman, penghubung dan trafo distribusi yang digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik yang dibutuhkan konsumen. Peralatan ini berfungsi untuk menunjang pencapaian penyaluran tenaga listrik untuk menjamin kontinuitas dan mutu yang tinggi serta keselamatan bagi makhluk hidup. Gardu distribusi memiliki fungsi sebagai berikut:

- a. Menyalurkan tenaga listrik ke konsumen tegangan rendah
- b. Sebagai papan hubung bagi tegangan rendah (PHB TR)

Pada gardu Distribusi biasanya digunakan trafo distribusi yang fungsinya untuk menurunkan tegangan listrik dari jaringan distribusi tegangan tinggi menjadi tegangan rendah yang terpakai pada jaringan distribusi tegangan rendah (step down transformator). misalkan tegangan 20 KV menjadi tegangan 380 Volt atau 220 Volt. Sedangkan trafo yang digunakan untuk menaikkan tegangan energi listrik atau transformator (step up), biasanya digunakan ketika pusat pembangkit tenaga listrik supaya tegangan yang di distribusikan pada satu jaringan panjang dan tidak mengalami penurunan tegangan energi listrik yang berarti tidak melebihi ketentuan kelebihan tegangan yang diperkenankan adalah 5% dari tegangannya yang semula.

⁴ Wahyudi Sarimun, Buku Saku Pelayanan Teknik, Depok : Garamond, 2014, hal. 34

2.7.2 Gardu Beton

Gardu Beton adalah gardu distribusi yang terbuat dari tembok dengan atap yang cor dari semen, gardu ini memiliki komponen berupa trafo dan alat proteksi/pengaman pada gardu tersebut. Gardu beton ini memiliki *PIEL BANJIR* yang berfungsi untuk mengetahui batas ketinggian air disekitar lingkungan gardu distribusi.

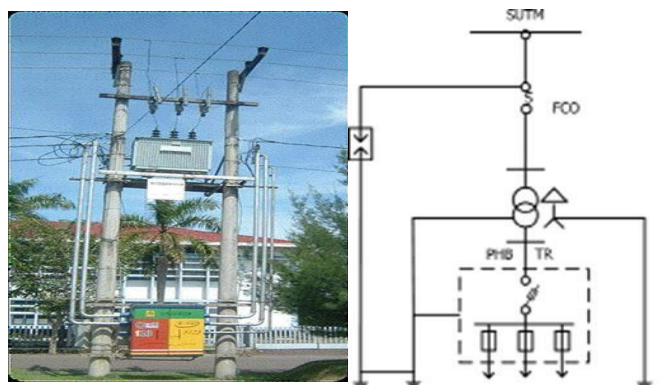


Gambar 2.12 Gardu Beton

2.7.3 Gardu Portal

Gardu Portal pada umumnya digunakan dengan penghantar saluran udara teganga menengah (SUTM). Kapasitas trafo pada gardu distribusi ini adalah 100 kVA, 250 kVA, 315 kVA dan 400 kVA dengan trafo yang kedap air.

Pemasangan trafo ini harus dilengkapi dengan *NH FUSE* (pengaman pada trafo sisi TM), *Arrester* = 24 kV, 5 kA atau 10 kA, Pembumian yang harus ($<3 \Omega$), dan PHB TR yang harus dipasang pada gardu distribusi.



Gambar 2.13 Gardu Portal dan diagram satu garis gardu portal

2.7.4 Gardu Cantol

Pada gardu distribusi tipe cantol, trafo tenaga yang terpasang adalah trafo tenaga dengan daya <math><100\text{ kVA}</math> (3 fasa atau 1 fasa). Trafo tenaga terpasang adalah jenis CSP (*completely self protected transformer*) yaitu peralatan *switching* dan proteksinya sudah terpasang lengkap dalam tangki trafo tenaga. Perlengkapan perlindungan trafo tenaga tambahan LA (*lightning arrester*) dipasang terpisah dengan penghantar pentanahannya yang dihubung langsung dengan beban transformator. Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Rendah (PHB TR) dengan maksimal 2 jurusan dengan saklar pemisah pada sisi masuk dan sisi pengaman lebur (*type NH*) sebagai pengaman jurusan.



Gambar 2.14 Gardu Cantol

2.7.5 Gardu Kiosk

Gardu tipe ini adalah bangunan prefabricated terbuat dari konstruksi baja, fiberglass atau kombinasi nya, yang dapat di rangkai di lokasi rencana pembangunan gardu distribusi. Terdapat beberapa jenis konstruksi, yaitu kiosk kompak, kiosk modular, dan kios bertingkat. Gardu kiosk, umumnya dipergunakan untuk pasokan listrik yang bersifat sementara.

Mobil deteksi adalah mobil yang berisi peralatan deteksi untuk mencari titik gangguan di saluran kabel bawah tanah yang mempergunakan tegangan DC 50kV. Pekerjaan deteksi adalah pekerjaan yang mengusut titik gangguan di saluran kabel tegangan menengah, dimana tegangan impuls diperoleh dari mobil deteksi dengan tegangan DC 50 kV yang ditempatkan di gardu Induk atau gardu tengah (*sistem spidle*), untuk mengubah titik gangguan ada petugas yang memonitor di jaringandengan alat penangkap impuls.



Gambar 2.15 Gardu kiost dan mobil deteksi

2.7.6 Gardu Mobil

Pemakaian gardu mobil ini bersifat sementara, hanya untuk mengatasi adanya pemadaman listrik karena adanya kerusakan pada gardu distribusi (trafo tenaga, kubikel, dan lain-lain). Pasokan listriknya mempergunakan tegangan rendah 220 – 380 Volt.



Gambar 2.16 Gardu mobil

2.7.7 Gardu hubung

Pemakaian gardu hubung dipergunakan untuk jaringan kabel tanah yang mempergunakan sistem *spidle* atau jaringan udara. Khusus jaringan ini udara (SUTM) sebaiknya kubikel keluar di lengkapi dengan pengaman OCR dan GFR dan pasokannya tenaga listrik, sebagai cadangan jaringan bila SUTM terjadi gangguan hubung singkat dapat manuver ke pasokan tenaga listrik lain atau jaringan lain. Gardu hubung ini juga sering di sebut dengan kubikel. Kubikel

adalah unit peralatan listrik yang dipasang pada gardu distribusi, yang bersifat sebagai pembagi, pemutus, penghubung dan proteksi sistem instalasi listrik tegangan menengah 20 kV. Kubikel 20 kV dipasang dalam ruangan gardu distribusi listrik atau GH.

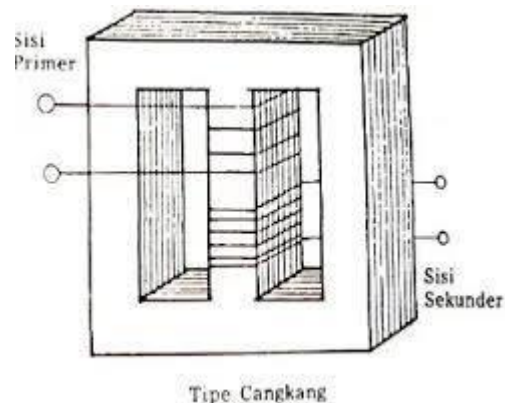


Gambar 2.17 Gardu Hubung

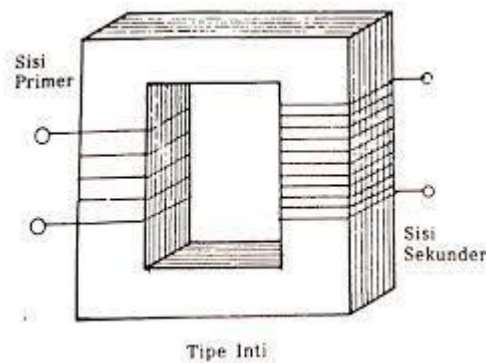
2.8 Transformator

Transformator adalah suatu peralatan listrik elektromagnetik statis yang berfungsi untuk memindahkan dan mengubah daya listrik dari suatu rangkain listrik ke rangkain listrik lainnya, dengan frekuensi yang sama melalui suatu gandingan magnet berdasarkan prinsip induksi elektromagnetis

Pada umumnya transformator terdiri atas sebuah inti, yang terbuat dari besi berlapis dan dua buah kumparan, yaitu kumparan sisi primer dan kumparan sisi sekunder. Rasio perubahan tegangan tergantung pada kedua kumparan itu. Biasanya kumparan terbuat dari kawat tembaga yang dibelit di seputar kaki inti transformator. Berdasarkan letak kumparan terhadap inti, transformator terdiri dari dua macam konstruksi, yaitu tipe inti (*core type*) dan tipe cangkang (*shell type*). Kedua tipe ini menggunakan inti berlaminasi yang terisolasi satu sama lainnya dengan tujuan untuk mengurangi rugi – rugi.



Gambar 2.18 Transformator tipe cangkang.



Gambar 2.19 Transformator tipe inti

2.9 Transformator distribusi

Transformator distribusi adalah salah satu peralatan yang memiliki peran penting dalam sistem distribusi tenaga listrik. Tegangan menengah pada direduksi menjadi tegangan rendah oleh transformator distribusi. Pada umumnya transformator distribusi yang digunakan adalah transformator *step-down* 20 kV/400

V. 380 V merupakan tegangan antara fasa pada sistem jaringan tegangan rendah. Untuk mengurangi terjadinya rugi *dropvoltage*, maka tegangan pada rak dibuat diatas 380 V sehingga tegangan pelanggan yang berada di ujung saluran tidak lebihkecil dari 380 V.

Kontinuitas penyaluran tenaga listrik akan terganggu akibat kerusakan pada transformator sehingga akan menyebabkan pemutusan atau pemadaman dalam penyaluran energi listrik. Pemadaman merupakan suatu kegiatan yang menyebabkan biaya – biaya pembangkitan akan meningkat tergantung biaya

kwh yang tidak tejual. Pemeliharaan rating trafo distribusi harus disesuaikan dengan kebutuhan yang ada agar nilai jatuh tegangan yang jika penempatannya kurang baik berpengaruh pada konsumen.

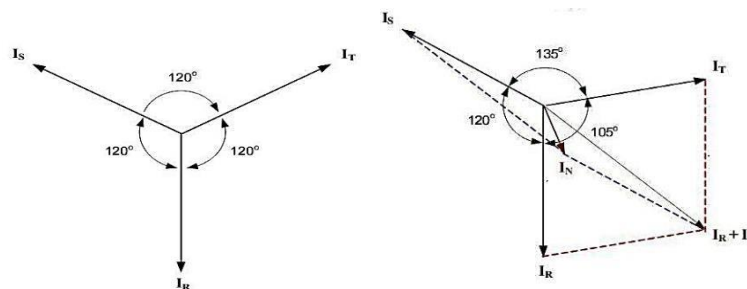
2.10 Ketidakseimbangan Beban⁵

Ketidakseimbangan adalah suatu keadaan yang terjadi apabila salah satu atau semua fasa pada transformator mengalami perbedaan. Perbedaan ini bisa dilihat dari besarnya vektor arus/tegangan dan sudut dari masing-masing fasa tersebut. Yang dimaksud dengan keadaan seimbang adalah suatu keadaan di mana:

- Ketiga vektor arus / tegangan sama besar.
- Ketiga vektor saling membentuk sudut 120° satu sama lain.

Sedangkan yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang adalah keadaan di mana salah satu atau kedua syarat keadaan seimbang tidak terpenuhi. Kemungkinan keadaan tidak seimbang ada 3 yaitu:

- 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



Gambar 2.20 Vektor Diagram Arus

⁵ Julius Sentosa Setiadji dkk., Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses Pada Trafo Distribusi, dalam Jurnal Teknik Elektro, Vol. 6, No. 1, Maret 2006: 68-73

Pada gambar diatas di sebelah kiri menunjukkan diagram vektor arus dalam keadaan seimbang. Disini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (IR, IS, IT) adalah sama dengan nol sehingga tidak muncul arus netral (IN). Gambar 2.13 sebelah kanan menunjukkan vektor diagram arus yang tidak seimbang. Disini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (IR, IS, IT) tidak sama dengan nol sehingga muncul sebuah besaran yaitu arus netral (IN) yang besarnya bergantung dari beberapa besar faktor ketidakseimbangannya.

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 :

$$P = 3 \cdot V_p \cdot I_p \cdot \cos \phi$$

Dimana :

P = daya transformator 3

fasa (W) V_p = tegangan fasa-netral

(Volt) $\cos \phi$ = faktor daya

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 dengan koefisien a, b dan c sebagai berikut :

$$[IR] = a \text{ Ampere}$$

$$[IS] = b \text{ Ampere}$$

$$[IT] = c \text{ Ampere}$$

Dengan IR, IS dan IT berturut-turut adalah arus di fasa R, S dan T. Bila faktor daya di ketiga fasa dianggap sama walaupun besarnya arus berbeda, besarnya daya yang disalurkan dapat dinyatakan sebagai :

$$p = (a+b+c).V_p.I_p.\cos \phi$$

Apabila kedua persamaan daya di atas menyatakan daya yang besarnya sama, maka dari kedua persamaan itu dapat diperoleh persyaratan untuk koefisien a, b, dan c yaitu :

$$a + b + c = 3$$

Dimana pada keadaan seimbang, nilai $a = b = c = 1$.

Koefisien a, b, dan c dapat diketahui besarnya, dimana besarnya arus fasa dalam keadaan seimbang (I) sama besarnya dengan arus rata-rata (I_{rata-rata}) dapat dirumuskan sebagai berikut.

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

$$IR = a \times I_{rata - rata} \text{ maka } a = \frac{IR}{I_{rata-rata}}$$

$$IS = b \times I_{rata - rata} \text{ maka } b = \frac{IS}{I_{rata-rata}}$$

$$IT = c \times I_{rata - rata} \text{ maka } c = \frac{IT}{I_{rata-rata}}$$

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

$$\% \text{Ketidakseimbangan Beban} = \frac{\{|a-1|+|b-1|+|c-1|\}}{3} \times 100\%$$

2.11 Pola Pembebanan Transformator

Transformator overload apabila beban transformator melebihi dari kapasitas transformator (name plate) atau arus nominal (I_n). Untuk menghindari terjadinya kerugian dan pemanasan trafo distribusi, maka pembebanan trafo maksimum 80% dari kapasitas trafo. Pembebanan trafo yang melebihi 80% dapat mengganggu kontinuitas penyaluran energi listrik. Selain itu, efisiensi trafo akan rendah karena rugi rugi trafo semakin meningkat.

Untuk mengetahui arus pada sisi primer (I_p), dapat menggunakan persamaan:

$$I_p = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V}$$

Dimana:

I_p = Arus pada sisi primer (A)

S = Daya transformator (kVA)

V = Tegangan primer (20kV)

Untuk mengetahui arus pada sisi sekunder (I_s), dapat menggunakan persamaan:

$$I_s = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot v}$$

Dimana:

I_s = Arus pada sisi sekunder (A)

S = Daya transformator (kVA)

V = Tegangan primer (400V)

2.12 Perhitungan Pembebanan Transformator Pada Setiap Jurusan

Pembebanan transformator pada setiap jurusan dapat dihitung dengan persamaan daya semu sebagai berikut:

$$S = V \cdot I_1$$

Dimana:

S = Daya Semu (kVA)

V = Tegangan (V)

I_1 = Arus jurusan yang akan dihitung (A)

2.12.1 Persentase Pembebanan Trafo

Menentukan daya transformator dari sisi tegangan tinggi (*primer*) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \text{ (VA)}$$

Dimana:

S = Daya transformator (KVA)

V = Tegangan primer transformator (V)

I = Arus (A)

Sehingga, untuk menghitung arus beban penuh (*full load*) dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V}$$

$$I_{ideal} = 80\% \times I_{FL}$$

Dimana:

I_{FL} = Arus beban penuh (A)

S = Daya pengenal transformator (kVA)

V_{1-1} = Tegangan sekunder transformator (V)

Dalam menghitung persentase pembebanan suatu transformator dapat diketahui dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\% \text{pembebanan} = \frac{(V_{\text{phasa}} \times I_{\text{phasa}})}{\text{Daya Transformator}/3} \times 100\%$$

$$\% \text{pembebanan} = \frac{\sqrt{3} \times V_L \times I_L}{\text{Daya Transformator}} \times 100\%$$

$$\% \text{pembebanan} = \frac{(V_{RN} \times I_R) + (V_{SN} \times I_S) + (V_{TN} \times I_T)}{\text{Daya Transformator}} \times 100\%$$

2.13 Up-Rating Transformator

Dalam mengatasi beban berlebih pada transformator, salah satunya ialah dengan meningkatkan kapasitas dari transformator tersebut atau sering dikenal dengan *up-rating* transformator. Dengan melakukan *up-rating* transformator maka dapat memenuhi kebutuhan daya listrik yang setiap tahunnya mengalami kenaikan sesuai dengan kondisi daerah tersebut. Syarat dalam melakukan *up-rating* transformator ialah bila kapasitas beban telah melebihi kapasitas daya dari transformator, atau mengalami pembebanan sebesar 80% (*overblast*) hingga sebesar atau lebih dari 100% (*overload*).

Pemilihan kapasitas transformator distribusi didasarkan pada beban yang akan dilayani. Diusahakan presentasi pembebanan transformator distribusi berada pada *range* 40% - 80%. Untuk menentukan rating trafo yang akan dipasang maka dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$S = \frac{I_{max}}{0,8} \times \sqrt{3} \times \frac{380}{1000}$$

Dimana;

S = Daya Pengenal Transformator (KVA).

I_{max} = Arus beban maksimum yang di tanggung oleh trafo.

0,8 = Standar pembebanan pada transformator 80%.

380 = Tegangan 3 phase

2.14 Daya Listrik⁶

Daya listrik merupakan energi listrik yang dihasilkan oleh sumber listrik atau yang diserap oleh peralatan listrik persatuan waktu dalam rangkaian arus listrik. Secara garis besar daya listrik dapat dibedakan menjadi tiga yaitu daya aktif, daya reaktif, dan daya semu.

2.14.1 Daya Aktif

Daya aktif merupakan daya listrik yang digunakan atau diubah oleh suatu peralatan listrik menjadi bentuk lain persatuan waktu, misalnya: energi panas, mekanik, cahaya, dan sebagainya. Besarnya daya aktif yang digunakan oleh peralatan listrik biasanya tercantum dalam *name plate* alat tersebut. Menurut (Muhaimin, 1995:128) daya aktif sering disebut juga daya efektif yang dinyatakan dengan huruf P, dan dinyatakan dalam Watt (W).

Daya aktif yang digunakan oleh peralatan listrik satu fasa adalah:

$$P = V \cdot I \cdot \cos\phi$$

Daya aktif yang digunakan oleh peralatan listrik tiga fasa adalah:

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos\phi$$

⁶ <https://www.teknikelektro.com/2020/06/memahami-segitiga-daya.html?m=1> (diakses Pada 25 juni 2022).

Dimana:

P = Daya Aktif (Watt).

I = Arus Line (A)

V = Tegangan fasa (V)

$\cos \phi$ = Faktor daya beban

2.14.2 Daya Reaktif

Daya reaktif merupakan energi yang diperlukan oleh peralatan listrik yang bekerja berdasarkan sistem elektromagnetik, yaitu untuk pembentukan medan elektromagnetiknya. Satuan daya reaktif yang dilambangkan dengan huruf (Q) didefinisikan sebagai VAR (Volt Ampere Reaktif).

Daya reaktif untuk sistem satu fasa adalah:

$$Q = V.I \sin \phi.$$

Daya reaktif untuk sistem tiga fasa adalah:

$$Q = \sqrt{3}.V.I \sin \phi$$

Dimana:

Q = Daya Reaktif Line (V)

I = Arus Line (A)

V = Tegangan fasa (V)

$\sin \phi$ = Faktor daya beban

Daya reaktif untuk sistem tiga fasa adalah:

$$Q = \sqrt{3}.V.I \sin \phi$$

Dimana:

Q = Daya Reaktif Line (V)

I = Arus Line (A)

V = Tegangan fasa (V)

$\sin \phi$ = Faktor daya beban

Daya reaktif untuk sistem tiga fasa adalah:

$$Q = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \sin \phi$$

Dimana:

Q = Daya Reaktif Line (V)

I = Arus Line (A)

V = Tegangan fasa (V)

$\sin \phi$ = Faktor daya beban

2.14.3 Daya Semu

Daya semu merupakan daya yang diperoleh dari hasil perkalian arus dan tegangan tanpa tergantung dari sudut fasanya. Daya semu juga disebut daya kompleks yang merupakan penjumlahan dari daya aktif dan daya reaktif secara vektor. Daya yang dibangkitkan pada sumber pembangkit listrik adalah daya semu dengan satuan VA (Volt Ampere).

Menurut (Muhaimin, 1995:131) secara sistematis dapat ditulis sebagai berikut: Daya Semu untuk sistem satu fasa adalah:

$$S = V \cdot I$$

Daya Semu untuk sistem tiga fasa adalah:

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I$$

Dimana:

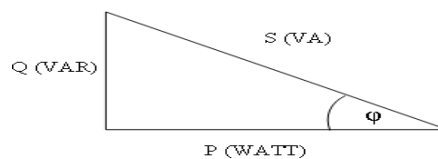
S = Daya Semu (VA).

V = Tegangan Line (V).

I = Arus Line (A).

2.14.4 Segitiga Daya

Segitiga daya merupakan segitiga yang menggambarkan hubungan matematika antara tipe – tipe daya yang berbeda (Daya Aktif, Daya Reaktif, dan Daya Semu).



Gambar 2.21 Segitiga Daya



Daya aktif (P) digambarkan dengan garis horizontal yang lurus. Daya reaktif

(Q) berbeda sudut sebesar 90^0 dari daya aktif. Sedangkan daya semu (S) adalah hasil penjumlahan secara vektor antara daya aktif dengan daya reaktif. Jika mengetahui dua dari ketiga daya maka dapat menghitung salah satu daya yang belum diketahui.

2.15 *Losses* (rugi-rugi) Akibat Adanya Arus Netral pada Penghantar Netral Transformator⁷

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

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N$$

dimana:

P_N = *losses* pada penghantar netral trafo (*watt*)

I_N = arus yang mengalir pada netral trafo (A)

R_N = tahanan penghantar netral trafo (Ω)

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

$$P_G = I_G^2 \cdot R_G$$

dimana:

P_G = *losses* akibat arus netral yang mengalir ke tanah (*watt*)

I_G = arus netral yang mengalir ke tanah (A)

R_G = tahanan pembumian netral trafo (Ω)

⁷ Markus Dwiyanto Tobi Sogen, Analisa Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap arus Netral dan *Losses* Pada Transformator Distribusi Di PT. PLN (Persero) Area Sorong, Dalam Jurnal Elektro luecat, Vol. 4, No. 1, Juli 2018:1

2.16 Komponen Utama Gardu Portal⁸

Adapun komponen utama dari Gardu Portal antara lain:

2.16.1 FCO (*Fuse Cut Out*)

Fuse cut out adalah pengaman paling sederhana dibandingkan dengan alat pengaman lainnya, namun kelemahan dari pengaman jenis ini adalah penggunaan terbatas pada daya yang kecil. Fungsi *Fuse Cut Out* ini adalah untuk mengamankan jaringan tegangan menengah dari gangguan hubung singkat antar fasa maupun fasa tanah, sedangkan FCO yang dipasang di atas trafo berfungsi untuk mengamankan gangguan hubung singkat pada trafo. Didalam FCO ini terdapat Fuse Link, Fuse Link adalah kawat pemutus sejenis skring yang digunakan paada pemutus Jaringan Tegangan Menengah (JTM). Fuse Link ini dipasang dalam tabung CO (*Cut Out*) yang berfungsi sebagai pemutus jika ada arus yang melebihi kapasitas ukuran fuse link. Untuk ukuran fuse link yang dipasang ditentukan dari beban tegangan yang ada, dengan rumus:

$$I = \frac{\text{Daya Trafo}}{\text{Tegangan TM} \times 1,73} \dots\dots\dots(2.6)$$

Dimana:

I = Arus

Daya Trafo = Daya pengenalan pada trafo

Tegangan TM = 20 KV



Gambar 2.22 Fuse Link dan Cut out

⁸ Suparmono dkk., Studi Pemeliharaan Komponen Utama Pada Gardu Distribusi tipe Portal di PT. PLN (Persero) Rayon Medan Baru, dalam jurnal RELE (Rekayasa Elektrikal dan Energi), vol. 4, No. 1, Juli 2021, Hal. 42

2.16.2 LA (*Lightning Arrester*)

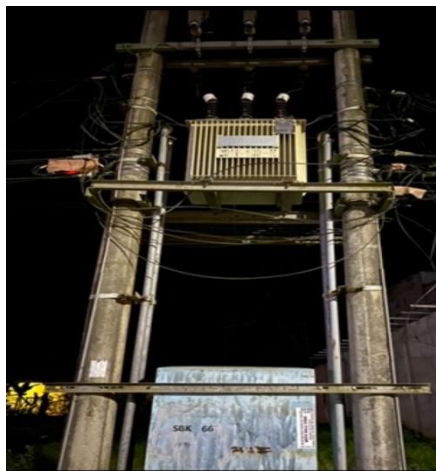
Lightning Arrester adalah suatu alat bagi pelindung suatu sistem tenaga listrik terhadap surja petir. Alat pelindung terhadap surja petir ini berfungsi sebagai untu melindungi peralatan sistem tenaga listrik dengan cara membatasi surja tegangan lebih yang datang dan mengalirkannya ke tanah.



Gambar 2.23 Lightning Arrester

2.16.3 Trafo Distribusi

Transformator distribusi adalah salah satu peralatan yang memiliki peran penting dalam sistem distribusi tenaga listrik. Tegangan menengah pada direduksi menjadi tegangan rendah oleh transformator distribusi. Pada umumnya transformator distribusi yang digunakan adalah transformator *step-down* 20 kV/400 V. Tegangan 20 KV ini untuk sisi Primer dan tegangan 400 V ini untuk sisi sekunder. Daya pengenal trafo ini biasanya di pergunakan mulai dari 50 kVa – 400 kVa sesuai dengan kebutuhan pembangunan gardu.



Gambar 2.24 Transformator Distribusi

2.16.4 Panel Hubung Bagi Tegangan Rendah (PHB TR)

PHB TR adalah sebuah panel listrik yang ada di gardu distribusi dan merupakan tempat percabangan sirkuit utama yang akan terbagi beberapa jurusan kemudian diteruskan ke pelanggan/konsumen. Jumlah kelompok / jurusan ditentukan berdasarkan banyaknya pelanggan yang ada di daerah tersebut. PHB TR yang berada di perkotaan memiliki banyak percabangan (jurusan) dibandingkan PHB TR perdesaan, biasanya jumlah jurusan pada PHB TR ini berjumlah 1 – 4 Jurusan. Fungsi utama pada PHB TR ini adalah sebagai penghubung antara *output* transformator menuju ke sistem tenaga listrik melalui kabel jurusan.



Gambar 2.25 PHB TR

2.16.5 Saklar Utama

Saklar utama berfungsi untuk menghubungkan dan memutuskan aliran listrik dari output transformator menuju busbar (untuk pembagian jurusan) yang nantinya akan diteruskan ke jaringan tegangan rendah. Saklar utama ini berbentuk seperti tuas (pegangan) yang dapat dioperasikan dengan cara mengarahkannya ke kiri atau ke kanan.



Gambar 2.26 Saklar Utama

2.16.6 NH Fuse

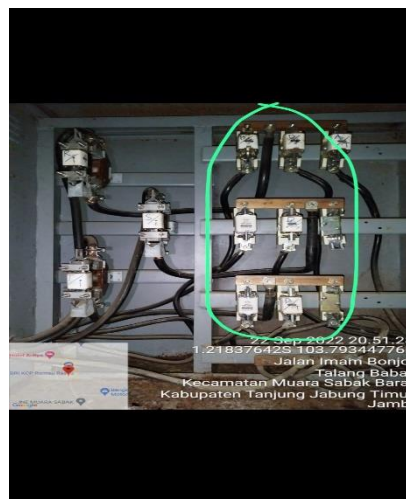
NH Fuse merupakan alat proteksi (Pengaman) yang ada di dalam PHB TR. Nh fuse ini akan bekerja dengan cara melebur apabila nilai arus melewati batas maksimum NH Fuse yang terpasang. Akibat adanya gangguan. Apabila NH Fuse melebur maka aliran listrik yang terhubung Ke JTR akan terputus. Berikut rumus untuk mencari NH FUSE:

$$I = \frac{P}{V \times \sqrt{3}} \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana :

P = Daya Trafo (VA)

V = Tegangan (V)



Gambar 2.27 NH Fuse

2.16.7 Busbar (Rel Tembaga)

Rel Tembaga pada PHB TR berfungsi untuk menghubungkan sirkit utama (saklar utama) ke beberapa jurusan. Ada 3 rel tembaga untuk fasa dan 1 rel untuk netral. Output dari saklar utama di hubungkan dengan rel tembaga (Busbar) ini.



Gambar 2.28 Busbar

2.16.8 Sistem Pentanahan (Grounding)

PHB TR dilengkapi dengan terminal pentanahan yang dihubungkan dengan sistem pentanahan yang telah terpasang baik. Selain itu ada sistem pentanahan yang terhubung ke body panel sehingga arus listrik yang bocor ke body diteruskan ke tanah/bumi. Pembumian pada gardu distribusi terdapat 3 pembumian. Pembumian pada Lightning arrester dengan tahanan isolasi 2,5 Ω , pembumian pada Trafo dengan tahanan isolasi 2,5 Ω dan pembumian pada body trafo dengan tahanan isolasi 5 Ω .

2.17 Efisiensi Trafo⁹

Untuk setiap mesin atau peralatan listrik, efisiensi ditentukan oleh besarnya rugi – rugi yang selama operasi normal. Efisiensi dari mesin – mesin berputar/bergerak umumnya antara 50-60 %. Karena ada rugi gerak dan rugi angin. Transformator tidak memiliki bagian yang bergerak/berputar, maka rugi – rugi ini tidak muncul.

Efisiensi transformator adalah perbandingan antara daya output dengan daya input. Berikut cara mencari efisiensi trafo:

⁹ Darsono dkk., Analisis Efisiensi Trafo Frekuensi tinggi Pada Sumber Tegangan Tinggi *Cockcroft Walton MBE Lateks*, *Ganendra Journal Of Nuclear Science and Technology*, Vol. 17, No. 2, Juli 2014: 101-110



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

$$P_{in} = P_{out} + \text{Rugi} - \text{rugi}$$

Jadi:

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

Dimana:

η = Efisiensi

P_{out} = Daya Keluar (Watt)

P_{in} = Daya Masuk (Watt)