

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Jaringan Distribusi

Secara Garis Besar, suatu sistem tenaga listrik yang lengkap mengandung empat unsur. *Pertama*, adanya suatu unsur pembangkit tenaga listrik. Tegangan yang dihasilkan pusat tenaga listrik ini biasanya merupakan tegangan menengah (TM). *Kedua*, suatu sistem transmisi, lengkap dengan Gardu Induk. Karena jaraknya yang biasanya jauh, maka diperlukan penggunaan tegangan tinggi (TT), atau tegan ekstra tinggi (TET). *Ketiga*, adanya saluran distribusi , yang biasanya terdiri atas saluran distribusi primer dengan tegangan menengah (TM) dan saluran distribusi sekunder dengan tegangan rendah (TR). *Keempat*, adanya unsur pemakaian atau utilisasi, yang terdiri atas instalasi pemakaian tenaga listrik. Instalasi rumah tangga biasanya memakai tegangah rendah (TR), sedangkan pemakain besar seperti Industri mempergunakan Tegangan Menengah (TM) ataupun Tegangan Tinggi (TT). Perlu dikemukakan bahwa suatu sistem dapat terdiri atas beberapa subsistem yang saling berhubungan, atau yang disebut sistem interkoneksi.

Sebagaimana diketahui , pada sistem distribusi terdapat dua bagian, yaitu distribusi primer yang mempergunakan tegangan menengah (TM), dan distribusi sekunder yang mempergunakan tegan rendah (TR).

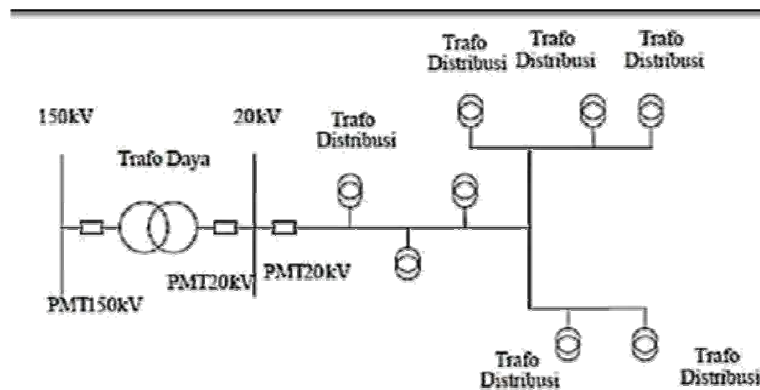
2.1.1. Jaringan Distribusi Primer

Distribusi Primer merupakan sistem tenaga listrik yang mendistribusikan/menyalurkan daya listrik dari gardu transmisi ke gardu distribusi dengan tegangan kerja 20 kV. Untuk tegangan menengah (TM) atau tegangan jaringan primer terdiri dari sistem 3 fasa. Jaringan distribusi primer berfungsi menyalurkan daya listrik, melewati daerah asuhan ke gardu/transmulator distribusi. Jaringan distribusi primer dilayani oleh gardu hubung (GH)/langsung dari gardu induk atau dari pusat pembangkit.

Pada Distribusi Primer terdapat tiga jenis dasar , yaitu sistem radial, sistem lup (loop), dan sistem jaringan primer.

2.1.1.1 Sistem Radial

Sistem Radial adalah struktur jaringan yang paling sederhana, baik di tinjau dari perencanaannya, maupun dari pengusahaannya. Penyaluran tenaga listrik dari penyulang berada pada kondisi satu arah. Akibatnya apabila terjadi gangguan pada salah satu titik pada rangkaian akan menyebabkan keseluruhan jaringan akan terkena dampaknya. Dengan demikian kontinuitas penyaluran tenaga listrik pada jaringan dengan struktur seperti ini sangat buruk. Karena apabila terjadi perbaikan pada salah satu akan menyebabkan seluruh jaringan harus dipadamkan.



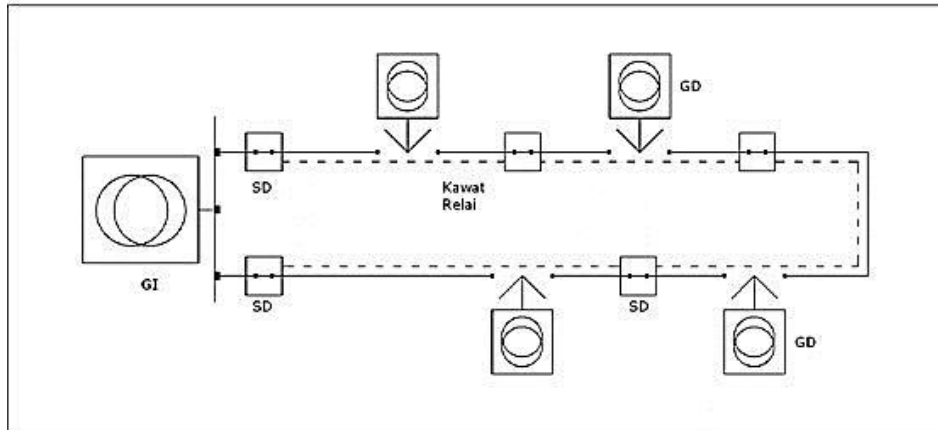
Gambar 2.1.Konfigurasi Jaringan Radial

Untuk kontinuitas penyaluran yang baik, maka struktur jaringan seperti ini dikembangkan menjadi struktur jaringan radial ganda. Pada struktur jaringan radial ganda, setiap gardu distribusi mendapat suplai dari dua penyulang radial yang berasal dari GI atau dari gardu distribusi lainnya. Dalam keadaan operasi normal, maka gardu hanya akan mendapat suplai tenaga listrik dari satu panyulang saja. Namun apabila terjadi gangguan, maka jaringan akan dipindahkan ke penyulang lainnya. Sehingga kontinuitas penyaluran tenaga listrik dapat diperbaiki.

2.1.1.2 Sistem *Loop* (Lingkar)

Suatu cara lain guna mengurangi lama interupsi daya yang disebabkan gangguan adalah dengan mendesain fider sebagai *lup* (*loop*) dengan menyambung kedua ujung saluran. Hal ini mengakibatkan suatu pemakai dapat memperoleh pasokan energi dari dua arah. Jika pasokan dari salah satu arah terganggu, pemakai tu akan disambung pada pasokan arah lainnya. Kapasitas cadangan yang cukup besar harus tersedia pada tiap fider. Sistem *lup* dapat dioperasikan secara terbuka ataupun tertutup.

kadang rangkaian telepon yang disewa dapat dipakai sebagai pengganti kawat pilot.



Gambar 2.3 Skema Rangkaian Lup Tertutup

Catatan :

SD1 : Saklar Daya, *normaly closed*

SD2 : Saklar Daya, *normaly open*

2.1.1.3 Sistem Jaringan Primer

Walaupun beberapa studi memberi indikasi bahwa pada kondisi - kondisi tertentu sistem jaringan primer lebih murah dan lebih andal daripada sistem radial, namun secara relatif tidak banyak sistem jaringan primer yang kini dioperasikan. Sistem ini terbentuk dengan menyambung saluran-saluran utama atau fider yang terdapat pada sistem radial sehingga menjadi suatu kisi-kisi atau jaringan (Gambar 2.4). Kisi-kisi ini diisi dari beberapa sumber atau gardu induk. Sebuah saklar daya antara transformator dan jaringan yang dikendalikan oleh relay-relay arus balik (*reverse current relay*) dan relay-relay penutupan

Catatan :

GI : Gardu Induk

GD : Gardu Distribusi

SD : Saklar Daya

GI : Gardu Induk
GD : Gardu Distribusi
SD : Saklar Daya

GD : Gardu Distribusi

SD : Saklar Daya

Terutama di kota yang besar, terdapat suatu jenis gardu tertentu yang tidak terdapat transformator daya. Gardu demikian dinamakan Gardu Hubung (GH). GH pada umumnya menghubungkan dua atau lebih bagian jaringan primer kota itu. Dapat pula terjadi bahwa pada suatu GH terdapat sebuah transformator pengatur tegangan. Karena

The diagram illustrates a 5-bus power system. The buses are labeled S, A, S, S1, and S2 from left to right. The system is divided into two protection zones by two relays: GI-1 (Rel GI-1 atau GH-1) and GH-2 (Rel GI-2 atau GH-2). The protection zones are defined by the buses S1 and S2. The diagram shows the following components and connections:

- Bus S:** The leftmost bus, connected to bus A.
- Bus A:** The second bus from the left, connected to bus S.
- Bus S1:** The third bus from the left, connected to bus A.
- Bus S2:** The rightmost bus, connected to bus S1.
- Relays:**
 - Rel GI-1 atau GH-1:** Located between bus S1 and bus S2.
 - Rel GI-2 atau GH-2:** Located between bus S2 and bus S.
- Protection Zones:**
 - Zone 1 (S1-S2):** The area between bus S1 and bus S2, containing two circuit breakers (CB) and a generator (GD).
 - Zone 2 (S-S1):** The area between bus S and bus S1, containing one circuit breaker (CB) and a generator (GD).

Catatan :

GH: Gardu Hubung

S : Saklar

B : Pengisi biasa dengan beban GD

2.1.2. Jaringan Distribusi Sekunder

Distribusi Sekunder mempergunakan tegangan rendah. Sebagaimana halnya dengan Distribusi Primer, terdapat pula pertimbangan-pertimbangan perihal keandalan pelayanan dan regulasi tegangan. Sistem Sekunder dapat terdiri atas empat jenis umum,

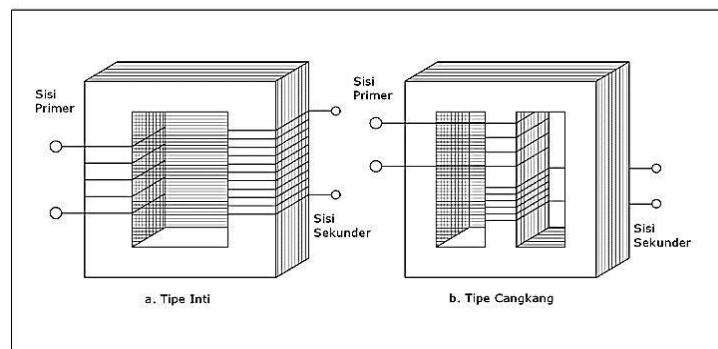
yaitu :

1. Sebuah Transformator tersendiri untuk tiap pemakaian.
2. Penggunaan satu transformator dengan saluran tegangan rendah untuk sejumlah pemakai.
3. Penggunaan satu saluran tegangan rendah yang tersambung pada beberapa transformator secara paralel. Sejumlah pemakai dilayani dari saluran tegangan rendah ini. Transformator-transformator diisi dari satu sumber energi. Hal ini disebut *banking* sekunder transformator.
4. Suatu jaringan tegangan rendah yang agak besar diisi oleh beberapa transformator, yang pada gilirannya diisi oleh dua sumber energi atau lebih. Jaringan tegangan rendah ini melayani suatu jumlah pemakai yang cukup besar. Hal ini dikenal sebagai jaringan sekunder atau jaringan tegangan rendah.

2.2. Transformator

Transformator (trafo) merupakan suatu alat magnetoelektrik yang sederhana, handal, dan efisien untuk mengubah tegangan arus bolak-balik dari satu tingkat ke tingkat yang lain. Pada umumnya terdiri atas sebuah inti yang terbuat dari

besi berlapis dan dua buah kumparan, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Rasio perubahan tegangan akan tergantung dari rasio jumlah lilitan pada kedua kumparan itu. Biasanya kumparan terbuat dari kawat tembaga yang dibelit seputar ‘kaki’ inti transformator. Secara umum dapat dibedakan dua jenis transformator menurut konstruksinya, yaitu tipe inti dan tipe cangkang. Pada tipe inti terdapat dua kaki, dan masing-masing kaki dibelit oleh satu kumparan. Sedangkan tipe cangkang mempunyai tiga buah kaki, dan hanya kaki yang tengah-tengah dibelit oleh kedua kumparan. Kedua kumparan dalam tipe cangkang ini tidak tergabung secara elektrik, melainkan saling tergabung secara magnetik melalui inti. Bagian datar dari inti dinamakan ‘pemikul’.



Gambar 2.6 Jenis Transformator Menurut Konstruksinya Prinsip Kerja Transformator

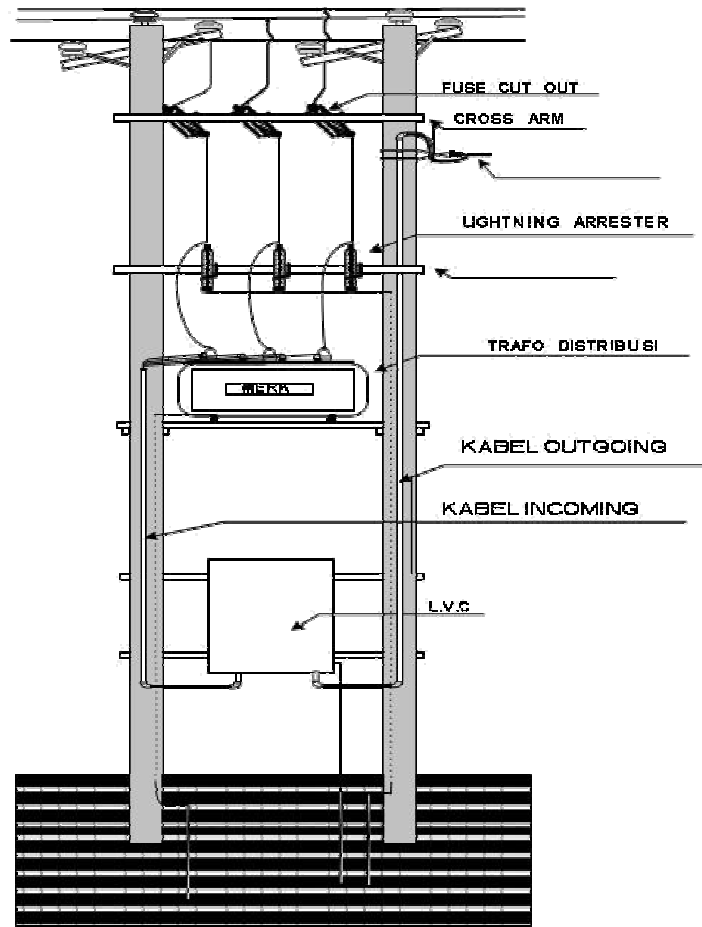
2.2.1 Transformator Distribusi

Transformator distribusi merupakan alat yang memegang peran penting dalam sistem distribusi. Transformator distribusi mengubah tegangan menengah menjadi tegangan rendah.

Transformator distribusi yang umum digunakan adalah transformator *step-down* 20 kV/400V. Tegangan fasa ke fasa sistem jaringan tegangan rendah adalah 380 V. Karena terjadi drop tegangan, maka pada rak tegangan rendah

dibuat di atas 380V agar tegangan pada ujung penerima tidak lebih kecil dari 380 V.

Pada kumparan primer akan mengalir arus jika kumparan primer dihubungkan ke sumber tegangan bolak-balik, sehingga pada inti transformator yang terbuat dari bahan ferromagnet akan terbentuk sejumlah garis-garis gaya magnet (fluks = Φ). Karena arus yang mengalir merupakan arus bolak-balik, maka fluks yang terbentuk pada inti akan mempunyai arah dan jumlah yang berubah-ubah. Jika arus yang mengalir berbentuk sinusoidal, maka fluks yang terjadi akan berbentuk sinusoidal pula. Karena fluks tersebut mengalir melalui inti yang mana pada inti tersebut terdapat belitan primer dan sekunder, maka pada belitan primer dan sekunder tersebut akan timbul ggl (gaya gerak listrik) induksi, tetapi arah ggl induksi primer berlawanan dengan arah ggl induksi sekunder. Sedangkan frekuensi masing-masing tegangan sama dengan frekuensi sumbernya.



Gambar 2.7 Trafo Distribusi.

2.2.2 Rugi - rugi dan Efisiensi Transformator

Rugi -rugi pada transformator ada 2 macam yaitu rugi tembaga (P) dan rugi besi(P) , dimana rugi besi sendiri terdiri atas rugi histerisis dan rugi arus eddy.

2.2.2.1 Rugi Tembaga (P)

Adalah rugi yang disebabkan oleh arus beban yang mengalir pada kawat tembaga. Besarannya adalah :

$$P = I^2 R \quad (2.1)$$

Dimana :

$I =$ rugi tembaga (watt)

$I =$ arus beban yang mengalir pada kawat tembaga (Ampere)

$R =$ tahanan kawat tembaga (Ω)

Karena arus beban berubah-ubah, rugi tembaga juga tidak tetap tergantung pada beban.

Rugi Besi terdiri atas :

a. Rugi Histeris (P_h), yaitu rugi yang disebabkan fluks bolak-balik

pada inti besi. Besarnya rugi histeris berbanding dengan luas histeris loop atau dinyatakan sebagai berikut :

$$P_h = \frac{1}{2} B_m H_m \times 10^{-4} \times 10^6 \quad (2.2)$$

Dimana :

$P_h =$ rugi histeris (watt)

$B_m =$ fluks density maksimum (Tesla)

$H_m =$ konstanta histeris

$f =$ frekuensi (Hz)

$k =$ koefisien Steinmetz di dapat dari data eksperimen,

besarnya antara 1,6 – 2,0 .

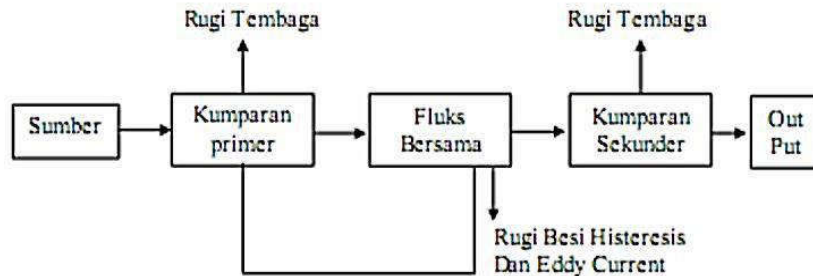
b. Rugi Arus Eddy (P_e), yaitu rugi yang disebabkan arus pusar pada inti besi.

$$P_e = \frac{1}{2} \pi^2 f^2 B_m^2 \times 10^{-4} \times 10^6 \quad (2.3)$$

Dimana :

$P_e =$ rugi arus eddy (watt)

= konstanta
 Jadi , rugi besi (rugi inti) = $h +$



Gambar 2.8 Diagram Rugi-rugi pada Transformator

2.2.3 Perhitungan Arus Beban Penuh dan Arus Hubung Singkat

Daya kerja pada transformator menandakan kapasitas transformator tersebut. Karena sudah diketahui rating tegangan pada sisi primer dan sekunder, maka berdasarkan persamaan 1 dapat dihitung arus beban penuh pada sisi primer dan sekunder.

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana :

S = daya transformator (kVA)

V = tegangan sisi primer transformator (kV)

I = arus jala-jala (A)

Dengan demikian , untuk menghitung arus beban penuh (*full load*)

dapat menggunakan rumus:

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

Dimana :

I = arus beban penuh (A)

S = daya transformator (kVA)

V = tegangan sisi sekunder transformator (kV)

Sedangkan untuk menghitung arus hubung singkat pada transformator digunakan rumus:

$$I = \frac{S}{V} \cdot \frac{100}{\%Z} \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana :

I = arus hubung singkat (A)

S = daya transformator (kVA)

V = tegangan sisi sekunder transformator (kV)

$\%Z$ = persen impedansi transformator

2.3.Ketidakseimbangan Beban

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.

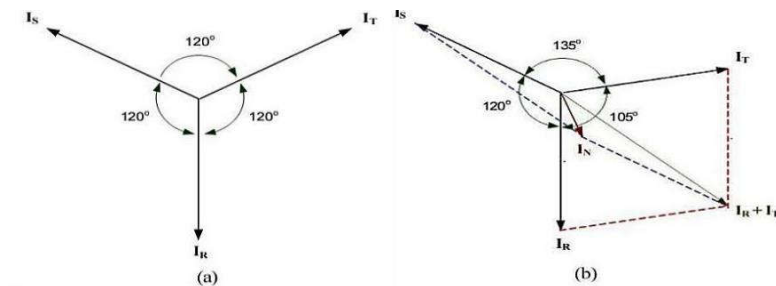
Tiap-tiap fasa transformator dinyatakan dengan keadaan seimbang apabila memenuhi syarat berikut:

- a. Ketiga vektor arus dari masing-masing fasa (R, S, T) mempunyai nilai yang sama besar
- b. Perbedaan sudut dari ketiga vektor fasa adalah masing-masing berbeda 120°

Sebaliknya, apabila salah satu atau kedua syarat diatas tidak terpenuhi, maka bisa dikatakan bahwa trafo tersebut mengalami keadaan tidak seimbang. Dilihat

dari vektornya, ada beberapa hal yang terjadi apabila transformator mengalami keadaan tidak seimbang:

- Vektor arus pada fasa R, S, dan T mempunyai nilai yang sama besar tetapi sudut antar fasa satu dengan yang lain tidak membentuk 120°
- Sudut pada vektor antar fasa sebenarnya sudah membentuk 120° namun nilai vektor pada fasa R, S, dan T terdapat perbedaan
- Nilai vektor pada fasa R, S, dan T terdapat perbedaan sekaligus sudut pada vektor antar fasa tidak membentuk 120°



Gambar 2.9 (a) Vektor Diagram Arus dalam keadaan seimbang dan
(b) Vektor diagram arus yang tidak seimbang

Gambar 2.9 (a) menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , dan I_T) adalah sama dengan nol sehingga tidak muncul arus netral (I_N). Sedangkan pada Gambar 2.9 (b) menunjukkan vektor diagram arus yang tidak seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , dan I_T) tidak sama dengan nol, sehingga muncul sebuah besaran yaitu arus netral (I_N) yang besarnya tergantung dari berapa besar faktor ketidakseimbangannya.

2.3.1. Perhitungan Ketidakseimbangan Beban

$$I_{\text{Rata-rata}} = \frac{+ +}{3} \dots\dots\dots (2.7)$$

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

$$\left. \begin{array}{l} a = - \\ b = - \\ - \\ c = \end{array} \right\} \dots\dots\dots (2.8)$$

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

$$= \frac{\{ |-1| + |-1| + |-1| \}}{3} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.9)$$

2.4. Beban Distribusi

Secara umum, beban yang dilayani oleh sistem distribusi dibagi menjadi beberapa sektor, yaitu sektor residensial / rumah tangga, sektor industry, dan sektor komersil. Masing-masing sektor beban tersebut mempunyai karakteristik yang berbeda, sebab hal ini berkaitan dengan konsumsi energi pada masing-masing konsumen di sektor tersebut.

Beban-beban energy listrik dapat diklasifikasikan atas :

1. Beban rumah tangga/residensial

Beban reisdensial merupakan beban listrik di dareah perumahan. Pada umumnya beban rumah tangga berupa lampu untuk penerangan, tv, AC, computer, mesin cuci, lemari es, pompa air, dll. Beban rumah tangga biasanya memuncak pada malam hari.

2. Beban komersial (usaha)

Beban komersial adalah beban listrik pada daerah perdagangan, toko, hotel, dan lain-lain. Kebutuhan energi listrik pada beban komersial digunakan untuk lampu penerangan, mesin-mesin, kipas angin, AC, dll.

3. Beban industri

Beban industri merupakan beban listrik yang berasal dari peralatan-peralatan listrik di daerah industri. Energi listrik pada daerah industri umumnya digunakan untuk penerangan, motor-motor listrik untuk alat-alat penggerak, dll

2.5. Losses Pada Penghantar Netral

Penyebab losses:

Luas penampang terlalu kecil (penampang tidak sesuai dengan beban) semakin kecil kawat semakin besar ruginya. Panjang jaringan : terlalu panjang sehingga listrik yang mengalir banyak yang hilang. Terlalu panjang jaringannya juga menyebabkan arusnya besar sehingga tegangannya turun. Sambungan tidak baik juga dapat mengakibatkan adanya loss contact, sambungan antar kawat tidak rapat sehingga terdapat celah udara yang seharusnya kedap udara sehingga menyebabkan alat cepat rusak. Sambungan tidak baik kadang disebabkan adanya ranting pohon layang-layang yang menempel pada kabel. Umur alat : alat yang terlalu tua dapat menurunkan kinerja alat tersebut. Arus yang terlalu besar dapat menimbulkan panas sehingga dapat merusak alat dan terjadi losses. Terlalu banyak percabangan saluran SR (tarikan SR maksimal 7) untuk sambungan pelayanan. Bila arus listrik yang mengalir ke R, S, T tidak seimbang maka yang terjadi arus akan mengalir ke ground sehingga menyebabkan adanya

hambatan di ground yang besar. (maksimal 5Ω) Adanya arus yang mengalir di hantaran netral, idealnya arus yang mengalir disepanjang hantaran netral adalah nol tetapi karena pengaruh dari beban yang tidak seimbang maka hantaran netral akan berarus sehingga arus yang melalui hantaran ini sebagian berubah menjadi panas yang didisipasikan ke lingkungan sekitar sebagai losses. Walaupun terdapat pentanahan netral kadang-kadang pentanahan netral tidak mampu membuang arus netral yang cukup besar akibat dari beban yang tidak seimbang. hambatan besar. ($\text{losses} = I^2 \cdot R$)

Cara mengurangi losses:

Usaha untuk memperkecil rugi-rugi pada sistem distribusi tenaga listrik antara lain: memilih ukuran penghantar, jenis penghantar yang sesuai untuk digunakan pada kondisi pembebanan jaringan tersebut dan sesuai dengan kemampuan hantar arus memperpendek jarak lintas jaringan, mengatur letak-letak beban sehingga jatuh tegangan pada titik-titik percabangan ke beban masih dalam batas yang diijinkan (untuk sistem 20KV, batas tegangan jatuh yang diijinkan pada kondisi beban penuh sebesar 4% untuk jaringan tegangan rendah) (SPLN 1978), pemilihan penggunaan trafo distribusi yang sesuai dengan kondisi faktor beban pada lokasi yang dilayani, pemilihan kapasitas trafo distribusi pada suatu lokasi beban, biasanya berdasarkan besar beban yang akan dilayani serta pertimbangan kemungkinan penambahan (perluasan) pada lokasi yang bersangkutan. Dalam hubungannya untuk menjaga agar tegangan jatuh yang terjadi sampai pada konsumen sekecil mungkin, kapasitas trafo yang digunakan harus lebih besar dari kapasitas beban yang dilayani, sedangkan pemilihan lokasi penempatan dari trafo distribusi tidak terlalu jauh dengan masing-masing

beban yang terpasang pada GTT tersebut sehingga tegangan yang jatuh pada konsumen dapat sekecil mungkin. Pemilihan tegangan pada jaringan ditentukan oleh besarnya beban dan jarak penyaluran dayanya.

Seringkali dalam proses penyampaian tenaga listrik banyak terjadi kehilangan daya listrik sebelum sampai pada konsumen, hal ini dikarenakan terlalu jauh dengan letak trafo sehingga sebelum sampai kepelanggan dayanya berkurang, penghantar terlalu kecil dan panjang, jumlah sambungan rumah pada satu tiang JTR yang dapat mempengaruhi drop tegangan, jumlah tarikan SR dan panjang SR yang terlalu panjang. Untuk menguranginya dengan memperbaiki saluran tenaga listrik dengan cara memindahkan beban dari phasa yang lebih besar arusnya ke phasa yang lebih kecil, Memperpendek jarak antara tiang TR dengan pelanggan, menambah tiang TR, menambah gardu sisipan, memperbesar penampang konduktor, mengganti jenis konduktor dengan konduktor yang memiliki tahanan jenis lebih kecil, memperpendek jaringan. Memindahkan sebagian tarikan SR deret ke SR yang lebih dekat.

Alat yang terlalu tua dapat menurunkan kinerja kerja. Agar alat dapat digunakan lebih lama dan tanpa adanya penurunan kinerja alat yang bisa menyebabkan *losses* maka diperlukan adanya pemeliharaan dan pemeriksaan yang teratur, sehingga dapat diketahui dengan cepat adanya kerusakan dan dapat diperbaiki sebelum terjadi hal-hal yang tidak diinginkan.

Adapun tujuan utama dari dilakukannya pemeliharaan terhadap jaringan distribusi dan peralatan adalah :

1. Mengurangi tingkat kerusakan atau gangguan dari peralatan
2. Memperpanjang umur dari peralatan

3. Menekan pengeluaran biaya
4. Mempertahankan kemampuan dari peralatan
5. Menurunkan susut
6. Meningkatkan keandalan sistem.

Losses (rugi-rugi) Akibat Adanya Arus Netral pada Penghantar Netral Transformator. Sebagai akibat dari ketidakseimbangan beban antara tiap-tiap fasa pada sisi sekunder trafo (fasa R, fasa S, fasa T) mengalirlah 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 :

$$P_N = I_N^2 \times R_N \dots\dots\dots (2.10)$$

Dimana :

P_N : Rugi-rugi daya atau *losses* pada penghantar netral (Watt)

I_N : Arus pada penghantar netral (A)

R_N : Tahanan pada penghantar netral (Ω)

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

$$P_G = I_G^2 \times R_G \dots\dots\dots (2.11)$$

Dimana :

P_G : *Losses* akibat arus netral yang mengalir ke tanah (Watt)

I_G : Arus netral yang mengalir ke tanah (A)

R_N : Tahanan pembumian netral trafo (Ω)