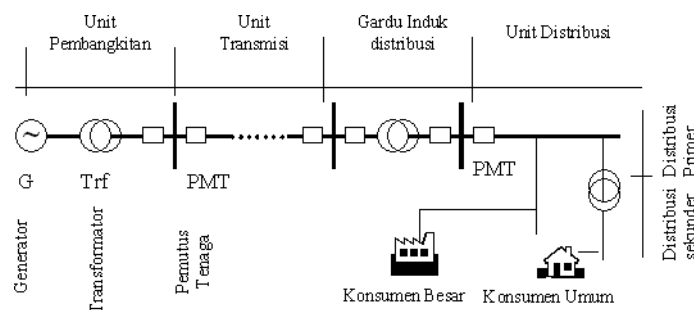


BAB II

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 oleh pusat tenaga listrik ini biasanya merupakan tegangan menengah. Kedua, suatu sistem transmisi, lengkap dengan gardu induk. Karena jarak yang biasanya jauh, maka diperlukan penggunaan Tegangan Tinggi (TT) dan/atau Tegangan 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 tegangan rendah, sedangkan pemakaian besar seperti industri menggunakan tegangan menengah atau tegangan tinggi. Gambar 2.1 memperlihatkan skema suatu sistem tenaga listrik. Perlu dikemukakan bahwa suatu sistem dapat terdiri atas beberapa sub sistem yang saling berhubungan, atau yang biasa disebut sebagai sistem terinterkoneksi. Sebagaimana diketahui, pada sistem distribusi terdapat dua bagian, yaitu distribusi primer, yang menggunakan tegangan menengah, dan distribusi sekunder, yang menggunakan tegangan rendah (Lumbantobing, 2016).



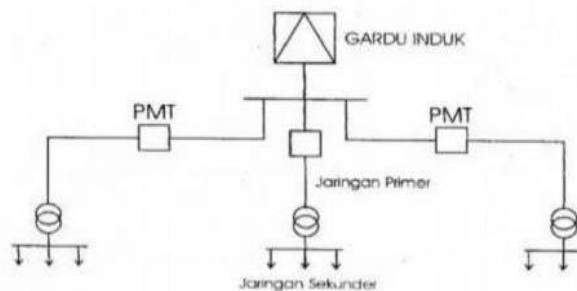
Gambar 2.1 Skema Sistem Tenaga Listrik (Sumber: Lumbantobing, 2016)

2.1.1. Distribusi Primer

Pada distribusi primer terdapat tiga jenis sistem, yaitu sistem *radial*, sistem *loop* dan sistem *spindel*.

1. Sistem *Radial*

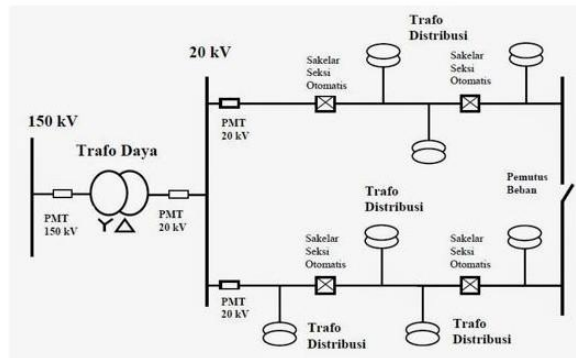
Sistem *radial* adalah konfigurasi jaringan primer dan setiap salurannya hanya mampu menyalurkan daya dari satu aliran daya. Sistem ini biasa dipakai untuk melayani daerah dengan tingkat kepadatan beban rendah. Dengan keuntungannya adalah kesederhanaan dari segi teknis serta biaya awal pembuatan lebih murah. Sedangkan kelemahannya adalah kontinuitas pelayanan tidak dapat dijamin dan apabila terjadi gangguan (terutama dekat dengan sumber), maka semua beban akan ikut terganggu hingga dapat diatasi, berarti terputusnya pelayanan ke pelanggan dan rugi daya dan tegangan juga tinggi (Siregar, 2013).



Gambar 2.2 Jaringan Distribusi Sistem *Radial* (Sumber: Watiningsih, 2012)

2. Sistem *Loop*

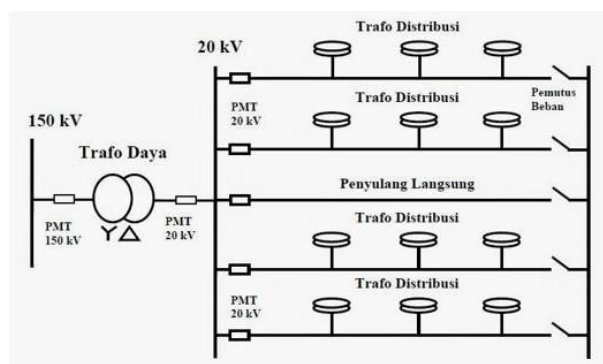
Sistem konfigurasi *loop* adalah jaringan yang dimulai dari satu titik pada rel daya dan dikelilingi beban kemudian kembali lagi ke titik rel daya semula. Jaringan konfigurasi biasa dipakai pada sistem distribusi yang melayani beban dengan kontinuitas dan pelayanan dengan baik (lebih baik dari sistem radial) serta banyak digunakan di daerah industri kecil dan daerah komersial. Karena sistemnya berbentuk *loop* maka sering dinamakan sistem cincin/gelang, dengan keuntungannya adalah gangguan akan dapat di lokalisir sekecil mungkin sebab kedua ujung penyulang tersambung pada sumber sehingga pelayanan kontinuitas dapat dijamin (Siregar, 2013).



Gambar 2.3 Jaringan Distribusi Sistem *Loop* (Sumber: D. Suswanto, 2009)

3. Sistem *Spindel*

Sistem distribusi dengan pola *spindel* merupakan pengembangan dari pola radial dan *loop* terpisah. Beberapa saluran yang keluar dari satu gardu induk diarahkan menuju satu tempat yang disebut gardu hubung (GH), kemudian antara gardu induk dengan gardu hubung tersebut dihubungkan dengan satu saluran yang disebut *Feeder Express*. Gardu Distribusi pada sistem ini terdapat di sepanjang saluran kerja dan terhubung secara seri. Pada keadaan normal sistem ini bekerja secara radial, namun dalam keadaan darurat atau terjadi gangguan bekerja secara *loop*. Dengan keuntungannya sangat sederhana dalam hal teknis dalam pengoperasian secara radial dan kontinuitas lebih baik dari sistem radial atau *loop* (Siregar, 2013).



Gambar 2.4 Jaringan Distribusi Sistem *Spindle* (Sumber: D. Suswanto, 2009)

2.1.2. Distribusi Sekunder

Distribusi sekunder menggunakan tegangan rendah. Seperti halnya distribusi primer, terdapat pula pertimbangan-pertimbangan perihal keandalan pelayanan dan regulasi tegangan (Lumbantobing, 2016). Sistem sekunder dapat terdiri atas empat jenis umum, yaitu:

1. Sebuah transformator tersendiri untuk tiap pemakai.
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 akhirnya 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 Gardu Distribusi

Gardu distribusi merupakan salah satu komponen dari suatu sistem distribusi yang berfungsi untuk menghubungkan jaringan ke konsumen atau untuk membagikan/mendistribusikan tenaga listrik pada beban/konsumen baik konsumen tegangan menengah maupun konsumen tegangan rendah.

Pengertian umum gardu distribusi tenaga listrik yang paling dikenal adalah suatu bangunan gardu listrik berisi atau terdiri dari instalasi Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Menengah (PHB-TM), Transformator Distribusi (TD) dan Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Rendah (PHB-TR) untuk memasok kebutuhan tenaga listrik bagi para pelanggan baik dengan Tegangan Menengah (TM 20 kV) maupun Tegangan Rendah (TR 220/380V). Konstruksi gardu distribusi dirancang berdasarkan optimalisasi biaya terhadap maksud dan tujuan penggunaannya yang kadang kala harus disesuaikan dengan peraturan Pemda setempat. Secara garis besar gardu distribusi dibedakan atas (Lumbantobing, 2016):

- a) Jenis pemasangannya:
- Gardu pasangan luar: gardu portal, gardu cantol
 - Gardu pasangan dalam: gardu beton, gardu kios
- b) Jenis konstruksinya:
- Gardu beton (bangunan sipil: batu, beton)
 - Gardu tiang: gardu portal, gardu cantol
 - Gardu kios

2.2.1 Gardu Portal

Umumnya konfigurasi gardu tiang yang dicatu dari SUTM adalah *T section* dengan peralatan Pengaman Lebur *Cut-Out* (FCO) sebagai pengaman hubung singkat transformator dengan elemen pelebur (pengaman lebur *link type expulsion*) dan *Lightning Arrester* (LA) sebagai sarana pencegah naiknya tegangan pada transformator akibat *surja* petir (Lumbantobing, 2016).



Gambar 2.5 Gardu Portal (Sumber: PLN UP3 Merauke 2024)

2.2.2 Gardu Cantol

Gardu cantol adalah gardu distribusi tipe tiang untuk pasangan terbuka (*out-door*) dengan memakai konstruksi satu tiang. Seluruh bagian Transformator Distribusi dan papan hubung bagi atau (PHB TR) dicantolkan pada satu tiang yang sama. Transformator distribusi dipasang pada bagian atas dan lemari panel / PHB-TR pada bagian bawah (Lumbantobing, 2016).

Pada gardu distribusi tipe cantol, transformator yang terpasang adalah transformator dengan daya ≤ 100 kVA fasa 3 atau fasa 1. Transformator terpasang adalah jenis CSP (*Completely Self Protected Transformer*) yaitu peralatan

switching dan proteksinya sudah terpasang lengkap dalam tangki transformator (Lumbantobing, 2016).



Gambar 2.6 Gardu Cantol (Sumber: PLN UP3 Merauke 2024)

Perlengkapan perlindungan transformator tambahan *Lightning Arrester* (LA) dipasang terpisah dengan Penghantar pembumiannya yang dihubungkan langsung dengan badan transformator. Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Rendah (PHB-TR) maksimum 2 jurusan dengan saklar pemisah pada sisi masuk dan pengaman lebur (type NH, NT) sebagaipengaman jurusan. Semua Bagian *Konduktif Terbuka* (BKT) dan Bagian *Konduktif Ekstra* (BKE) dihubungkan dengan pembumian sisi tegangan rendah (Lumbantobing, 2016).

2.2.3 Gardu Beton

Seluruh komponen utama instalasi yaitu transformator dan peralatan *switching*/proteksi, terangkai di dalam bangunan sipil yang dirancang, dibangun dan difungsikan dengan konstruksi pasangan batu dan beton (*masonry wall building*). Konstruksi ini dimaksudkan untuk pemenuhan persyaratan terbaik bagi keselamatan ketenagalistrikan (Lumbantobing, 2016).



Gambar 2.7 Gardu Beton (Sumber: PLN UP3 Merauke 2024)

2.2.4 Gardu Kios

Gardu tipe ini adalah bangunan *prefabricated* terbuat dari konstruksi baja, *fiberglass* atau kombinasinya, yang dapat dirangkai di lokasi rencana Pembangunan gardu distribusi. Terdapat beberapa jenis konstruksi, yaitukios kompak, kios modular dan kios bertingkat (Lumbantobing, 2016).



Gambar 2.8 Gardu Kios (Sumber: Harjanti, 2018)

Gardu ini dibangun pada tempat-tempat yang tidak diperbolehkan membangun gardu beton. Karena sifat mobilitasnya, maka kapasitas Transformator Distribusi yang terpasang terbatas. Kapasitas maksimum adalah 400 kVA, dengan 4 jurusan tegangan rendah.

Khusus untuk kios kompak, seluruh instalasi komponen utama gardusudah dirangkai selengkapnya di pabrik, sehingga dapat langsung diangkut ke lokasi dan disambungkan pada sistem distribusi yang sudah ada untuk difungsikan sesuai tujuannya.

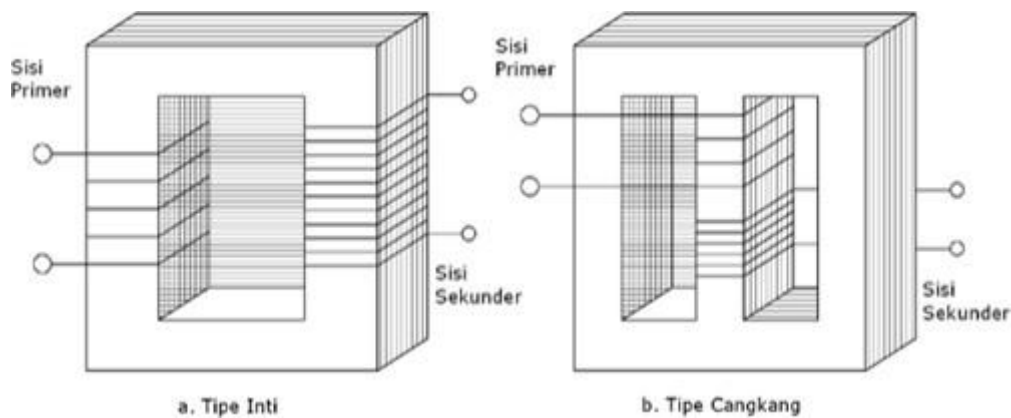


Gambar 2.9 Gardu Kios Bertingkat (Sumber: Harjanti, 2018)

2.3 Transformator

Transformator (trafo) merupakan suatu alat elektromagnetik 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 (Lumbantobing, 2016).

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’ (Lumbantobing, 2016).



Gambar 2.10 Jenis Transformator Menurut Intinya (Sumber: Lumbantobing, 2016)

2.3.1 Prinsip Kerja Transformator

Transformator terdiri atas dua buah kumparan (primer dan sekunder) yang bersifat induktif. Kedua kumparan ini terpisah secara elektris namun berhubungan secara magnetis melalui jalur yang memiliki *reluktansi* rendah. Apabila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik maka fluks bolak-balik akan muncul di dalam inti yang dilaminasi, karena kumparan tersebut membentuk rangkaian tertutup maka mengalirlah arus primer. Akibat adanya fluks di kumparan primer maka di kumparan primer terjadi induksi (*self induction*) dan terjadi pula induksi di kumparan sekunder karena pengaruh induksi dari kumparan primer atau disebut sebagai induksi bersama yang menyebabkan timbulnya fluks magnet di kumparan sekunder, maka mengalirlah arus sekunder jika rangkaian sekunder dibebani, sehingga energi listrik dapat ditransfer keseluruhan (secara magnetisasi) (Lumbantobing, 2016).

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \text{ Volt} \quad (2.1)$$

Dimana:

- e = EMF terinduksi [Volt]
- N = Jumlah lilitan kumparan
- $d\phi/dt$ = Laju perubahan fluks [Wb/s]
- Tanda minus = Hukum Lenz (lawan induksi)

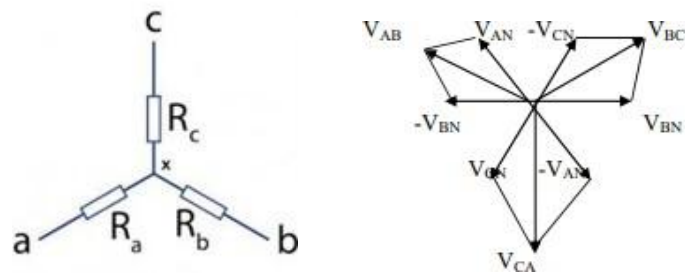
Perlu diingat bahwa hanya tegangan listrik bolak-balik yang dapat ditransformasikan oleh transformator, sedangkan dalam bidang elektronika transformator digunakan sebagai gandengan impedansi antara sumber dan beban untuk menghambat arus searah sambil tetap melakukan arus bolak-balik antara rangkaian (Hanif, 2017).

2.3.2 Hubungan Lilitan Transformator

Secara umum dikenal tiga macam hubungan lilitan untuk sebuah transformator tiga fasa, yaitu: hubungan bintang, hubungan delta, dan hubungan zig-zag.

1. Hubungan Bintang (Y)

Arus transformator 3 fasa dengan kumparan yang dihubungkan secara bintang yaitu I_A , I_B , dan I_C masing-masing berbeda fasa 120° (Siregar, 2013).



Gambar 2.11 Hubungan Bintang dan Diagram Fasor Rangkaian Hubungan Bintang (Sumber: Siregar, 2013)

Untuk beban yang seimbang:

$$I_N = I_A + I_B + I_C = 0$$

$$V_{AB} = V_{AN} + V_{BN} = V_{AN} - V_{CN}$$

$$V_{BC} = V_{BN} - V_{CN}$$

$$V_{CA} = V_{CN} - V_{AN}$$

Dari vektor diagram pada Gambar 2.11 diketahui bahwa untuk hubungan bintang berlaku:

$$V_{AB} = \sqrt{3} V_{AN} \text{ atau } V_L = \sqrt{3} V_P$$

$$I_p = I_L$$

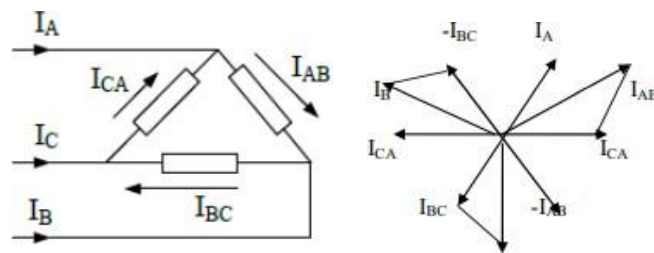
Jadi besarnya daya pada hubungan bintang (V_A): $P = 3 V_p I_p$

$$P = 3 (V_L/\sqrt{3}) I_L$$

$$P = \sqrt{3} V_L I_L \quad (2.2)$$

2. Hubungan Delta (Δ)

Tegangan transformator 3 fasa dengan kumparan yang dihubungkan secara delta, yaitu V_{AB} , V_{BC} , dan V_{CA} masing-masing berbeda 120° (Siregar, 2013).



Gambar 2.12 Hubungan Delta dan Diagram Fasor Rangkaian Hubungan Delta (Sumber: Siregar, 2013)

$$V_{AB} + V_{BC} + V_{CA} = 0$$

Untuk beban yang seimbang:

$$I_A = I_{AB} - I_{CA} \quad I_B = I_{BC} - I_{AB} \quad I_C = I_{CA} - I_{BC}$$

Dari vektor diagram pada Gambar 2.12 diketahui arus I_A (arus jala-jala) adalah $\sqrt{3} \times I_{AB}$ (arus fasa). Tegangan jala-jala dalam hubungan delta sama dengan tegangan fasanya.

Besarnya daya pada hubungan delta (V_A): $P = 3 V_p I_p$

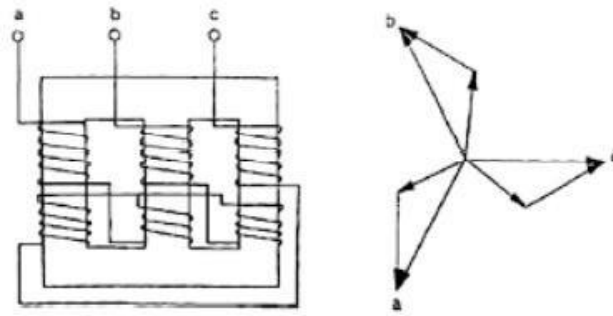
$$P = 3 (V_L/\sqrt{3}) I_L$$

$$P = \sqrt{3} V_L I_L \quad (2.3)$$

3. Hubungan Zig-Zag

Pada hubungan zig-zag, di mana masing-masing lilitan 3 fasa pada sisi tegangan rendah, dibagi menjadi 2 bagian dan masing-masing dihubungkan pada kaki yang berlainan. Hubungan zig-zag dapat digambarkan seperti terlihat pada Gambar 2.13 (Siregar, 2013).

Hubungan silang atau zig-zag digunakan untuk keperluan khusus seperti pada Transformator Distribusi dan transformator *converter*.



Gambar 2.13 Hubungan Zig-Zag dan Diagram Fasor Rangkaian Hubungan Zig-Zag (Sumber: Siregar, 2013)

2.4 Transformator Distribusi

Tujuan dari penggunaan Transformator Distribusi adalah untuk menurunkan tegangan utama dari sistem distribusi listrik dalam pemanfaatan penggunaan tegangan di konsumen. 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 tegangan rendahnya dibuat di atas 380V agar tegangan pada ujung penerima tidak lebih kecil dari 380V. Sebuah Transformator Distribusi perangkat statis yang dibangun dengan dua atau lebih gulungan digunakan untuk mentransfer daya listrik arus bolak-balik oleh induksi elektromagnetik dari satu sirkuit ke yang lain pada frekuensi yang sama tetapi dengan nilai-nilai yang berbeda pada tegangan dan arusnya (Lumbantobing, 2016).

Transformator Distribusi yang terpasang pada tiang dapat dikategorikan menjadi:

- *Conventional transformers*
- *Completely self-protecting (CSP) transformers*
- *Completely self-protecting for secondary banking (CSPB) transformers*

Conventional transformers tidak memiliki peralatan proteksi terintegrasi terhadap petir, gangguan dan beban lebih sebagai bagian dari trafo. Oleh karena itu dibutuhkan *fuse cut out* untuk menghubungkan *conventional transformers* dengan jaringan distribusi primer. *Lightning arrester* juga perlu ditambahkan untuk trafo jenis ini (Lumbantobing, 2016).

Completely self-protecting (CSP) transformers memiliki peralatan proteksi

terintegrasi terhadap petir, beban lebih, dan hubung singkat. *Lightning arrester* terpasang langsung pada tangki trafo sebagai proteksi terhadap petir. Untuk proteksi terhadap beban lebih, digunakan *fuse* yang dipasang di dalam tangki. *Fuse* ini disebut *weak link*. Proteksi trafo terhadap gangguan internal menggunakan hubungan proteksi internal yang dipasang antara belitan primer dengan *bushing* primer (Lumbantobing, 2016).

Completely self-protecting for secondary banking (CSPB) transformers mirip dengan *CSP transformers*, tetapi pada trafo jenis ini terdapat sebuah *circuit breaker* pada sisi sekunder, *circuit breaker* ini akan membuka sebelum *weak link* melebur (Lumbantobing, 2016).

2.4.1 Jenis-Jenis Transformator Distribusi

Trafo yang umum dipakai distribusi yaitu trafo 3 fasa dan trafo satu fasa. Trafo tiga fasa paling banyak pemakaiannya karena:

- Tidak memerlukan ruangan yang besar
- Lebih murah
- Pemeliharaan persatuan barang lebih mudah dan lebih murah

Menurut jenisnya trafo distribusi dibedakan menjadi :

a) Jenis *overhead*

Jenis ini bisa dibedakan menjadi :

1. Tipe Konvensional

Tipe ini tidak memiliki alat pengaman seperti *lightning arrester*, pengaman beban lebih sebagai satu kesatuan unit trafo. Jadi alat-alat pengaman tersebut didapat dan dipasang secara terpisah. Untuk rating yang tidak terlalu besar, tipe ini adalah dalam bentuk pasangan tiang. Sedang untuk rating yang besar, ditempatkan pada gardu distribusi (Fauzi, 2019).

2. Tipe CSP (*Completely Self Protected*)

Trafo distribusi tipe ini memiliki pengaman sebagai kesatuan unit trafo. Pengaman yang lain adalah pengaman terhadap gangguan *surja* petir dan *surja* hubung, pengaman beban lebih dan pengaman hubung singkat (Fauzi, 2019).

Selain itu trafo jenis ini juga dilengkapi dengan lampu merah peringatan yang akan menyala bila temperatur gulungan melebihi

batas yang diizinkan untuk isolasinya. Apabila tidak diambil tindakan dan temperatur mencapai batas bahaya, maka *circuit breaker* akan membuka. Apabila diperlukan, *circuit breaker* bisa diset pada posisi darurat untuk melakukan beban lebih sementara.

b) Jenis *Underground*

Jenis ini bisa dibedakan menjadi :

1. Tipe *Subway*

Trafo distribusi tipe ini dipasang pada ruangan bawah tanah untuk sistem distribusi bawah tanah. Tipe ini bisa berbentuk trafo konvensional, maupun trafo berproteksi arus (Suswanto, 2009).

Trafo berproteksi arus mempunyai perlengkapan pengaman yang sama seperti trafo CSP hanya saja tidak memiliki pengaman gangguan *surja petir* yang memang tidak diperlukan untuk sistem distribusi bawah tanah.

2. Tipe *Network*

Trafo *network* dirancang untuk melayani sistem distribusi jaringan tegangan rendah (*LV network*). Trafo distribusi ini di klasifikasikan menjadi 4 berdasarkan pendinginannya yang masing-masing (Suswanto, 2009).

- Berisi Minyak

Merupakan jenis yang biasa digunakan, sebagai minyak pengisi pada umumnya dipakai *askarel* yang mempunyai sifat tidak bisa terbakar (*non-flammable*). Meskipun demikian trafo jenis ini belum terhindar dari kemungkinan meledaknya tangki, karena kegagalan gulungan dengan kekuatan tertentu akan menghasilkan tekanan besar, yang biasa menyebabkan tangki meledak. Oleh sebab itu sering ditambahkan peralatan mekanis pelepas tekanan.

- Tipe kering berventilasi

Digunakan bila ada tempat kering pada lantai dasar sebuah bangunan, dimana udara cukup bersih. Adanya

lubang-lubang hawa pada rumah trafo yang terbuat dari metal memungkinkan udara mengalir ke koil dan inti trafo. Tipe ini memberikan keamanan maksimum dengan biaya pemasangan dan perawatan minimum.

- Tipe kering tertutup

Pada tipe ini trafo ditempatkan pada tangki yang tertutup rapat, dengan sedikit tekanan positif dari gas nitrogen. Trafo tipe ini menghilangkan sama sekali kemungkinan terbakar ataupun meledak juga biaya pemeliharaan minyak karena isolasi utamanya adalah udara, tipe kering tertutup ini ukurannya lebih besar dari trafo *network* yang berisi minyak. Trafo tipe ini juga dilengkapi dengan *network protector* pada sisi sekundernya dimana *network protector* ini sudah merupakan satu unit dengan trafonya. *Network protector* ini adalah alat pengaman jaringan distribusi tipe LV *network*, dimana bisa timbul kemungkinan pembalikan arus dari sekunder ke primer atau pada trafo distribusi yang menyebabkan membukanya circuit breaker saluran primer. *Network protector* (pengaman jaringan) ditempatkan pada bagian sekunder trafo distribusi merupakan jenis air *circuit breaker* dengan *relay-relay* dan peralatan pembantu dan mempunyai fungsi:

- Mengerjakan pemutus bila terjadi gangguan pada kabel primer atau trafo distribusi.
- Mengerjakan pemutus bila terjadi pembalikan daya.
- Menutup kembali rangkaian jika tegangan pada bagian primer dan sudut fasanya sudah sesuai dengan tegangan jaringan, sehingga Setelah penutupan, daya akan mengalir dari penyulang ke jaringan.

- Tipe *Padmounted*

Trafo ini pada mulanya digunakan untuk distribusi daerah rumah tinggal dengan sistem jaringan bawah tanah.

Dengan diadakannya pengembangan trafo ini dapat dipakai untuk beban-beban yang besar sampai 250 kVA per unitnya. Trafo ini merupakan satu kesatuandengan rumah trafo yang terbuat dari metal dan dilengkapi dengan pengamanan-pengaman untuk tegangan rendah yang terdiri dari sekring, pemutusan *switch*.

Trafo-trafo *padmounted* ini dapat diletakkan langsung diatas tanah untuk daerah perumahan atau gedung. Dengan perlengkapan penyambung tertutup dari bahan sintesis, trafo *padmounted* biasa berkemampuan:

- Tahan banjir
- Dapat dipegang (*dead front*), aman terhadap tegangan
- Dapat dengan cepat dipasang dan dilepas tanpa memutuskan *circuit* primer, dengan menggunakan *hotstick*, sehingga aliran daya ke unit lain tetap terjaga.

2.4.2 Perhitungan Arus Beban Penuh

Telah diketahui bahwa daya Transformator Distribusi bila ditinjau dari sisi tegangan tinggi (primer) dapat dirumuskan sebagai berikut:

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

Dimana:

S = Daya Transformator (kVA)

V = Tegangan Sisi Primer Transformator (V) I = Arus Jala-jala (A)

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

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} \quad (2.5)$$

Dimana:

I_{FL} = Arus Beban Penuh (A)

S = Daya Transformator (kVA)

V = Tegangan Sisi Sekunder Transformator (V)

Dengan demikian untuk menghitung persentase pembebanannya adalah sebagai berikut :

$$\%b = \frac{I_{ph}}{I_{FL}} \times 100\% \quad (2.6)$$

Dimana:

$\%b$ = Persentase Pembebanan (%)

I_{ph} = Arus Fasa (A)

I_{FL} = Arus Beban Penuh (A)

2.4.3 Losses (rugi-rugi) Akibat Adanya Arus Pada Penghantar Netral Transformator

Sebagai akibat dari ketidakseimbangan beban antara tiap-tiap fasa pada sisi sekunder trafo (fasa R, fasa S dan fasa T) mengalir arus di netral trafo. Arus yang mengalir pada penghantar netral trafo ini menyebabkan rugi-rugi (Siregar, 2013). Sehingga *Losses* pada penghantar netral dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P_N = I_N^2 R_N \quad (2.7)$$

Dimana:

P_N = Rugi-rugi pada penghantar netral (Watt)

I_N = Arus yang mengalir melalui kawat netral (Ampere)

R_N = Tahanan pada kawat netral (Ω)

Dengan demikian untuk menghitung persentase rugi-rugi daya pada penghantar netral adalah sebagai berikut :

$$\%PN = \frac{P_N}{P} \times 100\% \quad (2.8)$$

Dimana:

$\%P_N$ = Persentase rugi-rugi pada penghantar netral (%)

P_N = Rugi-rugi pada penghantar netral (Watt)

P = Daya aktif transformator (Watt)

2.5 Ketidakseimbangan Beban

Ketidakseimbangan beban adalah keadaan dimana beban yang digunakan pelanggan atau konsumen pada sisi sekunder transformator tidak setara atau

seimbang dan apabila terjadi ketidakseimbangan beban pada sistem 3 fasa maka kawat netral akan dialiri arus dan perbedaan sudut beban per fasa adalah tidak sama dengan 120° , beban transformator yang tidak seimbang menyebabkan akan muncul arus netral (Siregar,2013).

Dalam pedoman aplikasi simantra sulmapana yakni berupa monitoring pembebanan gardu distribusi terdapat menu yang berfungsi untuk menampilkan seluruh gardu distribusi tidak seimbang berdasarkan kriteria persentase ketidakseimbangan yang di tentukan dalam hal ini batas toleransi ketidakseimbangan beban maksimal adalah 20 %.

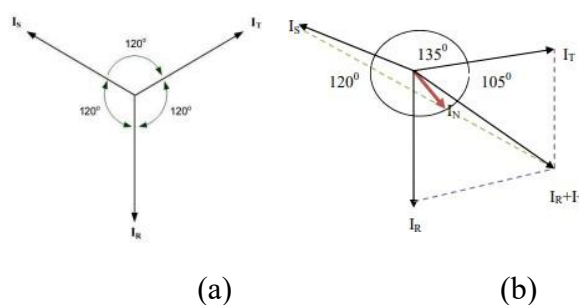
Yang dimaksud dengan keadaan seimbang adalah suatu keadaan dimana:

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

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

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

Untuk lebih jelasnya dapat digambarkan dengan vektor diagram arus pada gambar berikut ini.



Gambar 2.14 Vektor Diagram Arus (Sumber: Siregar, 2013)

Gambar (2.14a) menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan seimbang, terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , I_T) adalah sama dengan nol sehingga tidak muncul arus netral (I_N). Sedangkan pada gambar (2.14b) menunjukkan vektor diagram arus yang tidak seimbang, terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya tidak sama dengan nol sehingga muncul sebuah

besaran yaitu arus netral karena faktor ketidakseimbangannya (Siregar, 2013).

Penyebab dari ketidakseimbangan beban ini diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Pasang baru pada bagian kabel yang mudah untuk penyambungan. Banyaknya pemasangan pelanggan baru oleh biro pada bagian kabel yang mudah untuk dipasang *piercing connector* tanpa memperhatikan fasa yang terpasang pada saat itu. Hal ini terjadi sebagian besar pada jaringan Saluran Kabel Udara Tegangan Rendah (SKUTR) yang memakai kabel *Low Voltage Twisted Cable* (LVTC). Hal ini diakibatkan karena saat pemasangan *piercing connector* pada LVTC tersebut, pemasangan harus melonggarkan kabel tersebut dari pilinannya (Lumbantobing, 2016).

2. Banyaknya pelanggan pada suatu sambungan deret.

Tidak semua pelanggan listrik memiliki rumah tinggal dekat jaringan, untuk mengatasinya maka dibuat suatu SR deret. Peraturannya suatu SR deret dibatasi maksimal 5 pelanggan tiapfasanya, namun pada pelaksanaannya banyak SR deret yang memiliki pelanggan lebih dari 5 pelanggan dalam satu fasa. Hal ini diakibatkan adanya penambahan pelanggan yang tidak selalu terjadi pada pelanggan yang dekat jaringan JTR saja, melainkan ada juga yang agak jauh dari jaringan, sehingga oleh pemasang diambilkan dari jaringan SR yang terdekat. Pemasangan tersebut tidak memperhatikan SR deret yang telah tersambung pada satu fasa tersebut. Sehingga menyebabkan beban pincang pada trafo karena fasa tersebut terlalu banyak menanggung beban. Selain mengakibatkan beban pincang banyaknya pelanggan pada suatu SR deret akan mengakibatkan tegangan ujung pada SR deret tersebut drop (jauh dari tegangan normal) (Lumbantobing, 2016).

3. Kurangnya pengawasan di lapangan.

Dalam pelaksanaan pemasangan sambungan baru, pada umumnya pengawas lapangan langsung percaya kepada pelaksana bahwa apa yang dikerjakan sesuai dengan perintahnya. Untuk itu perlu dicek ulang dengan cara melakukan pengukuran kembali, kemudian membandingkannya dengan hasil pengukuran sebelum pelaksanaan pemasangan. Dari data tersebut dapat diketahui adanya penambahan beban pada fasa terdapat sambungan baru (Lumbantobing, 2016).

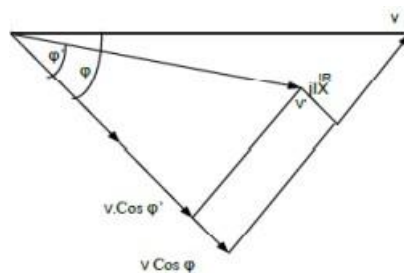
2.6 Optimalisasi Penyaluran dan Susut Daya Pada Transformator

Pada setiap penyaluran listrik pasti kita mengharapkan efisiensi yang sangat tinggi bahkan maksimal dalam berjalannya pengoperasian agar rugi-rugi yang dihasilkan dalam penyaluran dapat di perkecil bahkan diupayakan tidak ada sehingga keuntungan dapat dicapai secara penuh. Oleh karena itu untuk mencapai hal tersebut perlu dilakukan optimalisasi penyaluran terhadap pengaruh ketidakseimbangan beban gardu distribusi terhadap arus netral yang mana dengan adanya ketidakseimbangan akan berpengaruh terhadap rugi-rugi daya yakni daya yang terbuang ke tanah melalui netral.

Pada perhitungan rugi-rugi daya misalkan 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. (Lumbantobing, 2016):

$$P = 3 [V] [I] \cos \phi \dots \quad (2.9)$$

Daya yang sampai ujung terima akan lebih kecil dari P karena terjadi penyusutan dalam saluran. Penyusutan daya ini dapat diterangkan dengan menggunakan diagram fasor tegangan saluran model fasa tunggal seperti pada gambar 2.15 di bawah ini:



Gambar 2.15 Diagram Fasor Tegangan Saluran Daya Model Fasa Tunggal
(Sumber: Siregar, 2013)

Model ini dibuat dengan asumsi arus pemusatan kapasitif pada saluran cukup kecil sehingga dapat diabaikan. Dengan demikian besarnya arus ujung kirim sama dengan arus di ujung terima. Apabila tegangan dan faktor daya pada ujung terima berturut-turut adalah V' dan ϕ' , maka besarnya daya pada ujung terima adalah:

$$P' = 3 [V'] [I] \cos \phi \quad (2.10)$$

Selisih antara P pada persamaan (2.9) dan P' pada persamaan (2.10)

memberikan susut daya saluran, yaitu :

$$P_l = P - P' \quad (2.11)$$

$$P_l = 3 [V] [I] \cos \varphi - 3 [V'] [I] \cos \varphi' \quad (2.12)$$

$$P_l = 3 [I] \{ [V] \cos \varphi - [V'] \cos \varphi' \} \quad (2.13)$$

Sementara itu dari Gambar 2.15 memperlihatkan bahwa:

$$\{ [V] \cos \varphi - [V'] \cos \varphi' \} = [I] R \quad (2.14)$$

Dengan R adalah tahanan kawat penghantar tiap fasa, oleh karena itu persamaan (2.13) berubah menjadi:

$$P_l = 3 [I^2] R \quad (2.15)$$

Jika [I] pada persamaan 2.9 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 fasadapat dinyatakan dengan koefisien a, b dan c sebagai berikut :

$$[I_R] = a [I]$$

$$[I_S] = b [I] \quad (2.16)$$

$$[I_T] = c [I]$$

Dimana: I_R , I_S dan I_T 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:

$$P = (a + b + c) . [V] . [I] . \cos \varphi \quad (2.17)$$

Apabila persamaan (2.17) dan persamaan (2.9) menyatakan daya yang besarnya sama, maka dari kedua persamaan itu dapat diperoleh persyaratan untuk koefisien a, b, dan c yaitu (Suyandi,2017):

$$a + b + c = 3 \dots \quad (2.18)$$

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

Sehingga untuk menghitung nilai koefisien (a, b, c) dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan di bawah ini (Suyandi,2017):

$$a = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} \quad (2.19)$$

$$b = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} \quad (2.20)$$

$$c = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} \quad (2.21)$$

Dengan demikian untuk menghitung persentase ketidakseimbangan beban adalah sebagai berikut (Suyandi, 2017) :

$$\% kb = \frac{\{|a-1|+|b-1|+|c-1|\}}{3} \times 100 \% \quad (2.22)$$

Dimana:

% kb = Persentase ketidakseimbangan beban (%)

a,b,c = Koefisien ketidakseimbangan beban

2.7 Efisiensi Pada Transformator

Efisiensi transformator adalah perbandingan antara daya keluaran dengan daya masuk pada transformator. Perhitungan efisiensi ini perlu dilakukan untuk mengetahui seberapa besar persentase dari kinerja Transformator Distribusi tersebut. Perhitungan efisiensi dilakukan menggunakan persamaan di bawah ini (Hanif, 2017):

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.23)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out}+P_N} \times 100\% \quad (2.24)$$

Dimana :

η = Efisiensi Transformator (%)

P_{out} = Daya yang tersalurkan (Watt)

P_{in} = Daya yang masuk (Watt)

P_N = Rugi-rugi daya pada penghantar netral (Watt)

2.8 Arus Netral

Arus netral dalam sistem distribusi tenaga listrik dikenal sebagai arus yang mengalir pada kawat netral di sistem distribusi tegangan rendah tiga fasa empat kawat. Arus netral ini muncul jika (Rizki, 2021) :

- a) Kondisi beban tidak seimbang.
- b) Karena adanya arus harmonisa akibat beban non-linear.

Arus yang mengalir pada kawat netral yang merupakan arus bolak-balik untuk sistem distribusi tiga fasa empat kawat adalah penjumlahan vektor dari ketiga arus fasa dalam komponen simetris.

Untuk arus tiga fasa dari suatu sistem yang tidak seimbang dapat juga diselesaikan dengan menggunakan metode komponen simetris. Dengan menggunakan notasi-notasi yang sama seperti pada

tegangan akan didapatkan persamaan-persamaan untuk arus-arus fasanya sebagai berikut:

$$I_a = I_1 + I_2 + I_0 \quad (2.28)$$

$$I_b = a^2 I_1 + a I_2 + I_0 \quad (2.29)$$

$$I_c = a I_1 + a^2 I_2 + I_0 \quad (2.30)$$

Dengan tiga langkah yang telah dijabarkan dalam menentukan tegangan urutan positif, urutan negatif, dan urutan nol terdahulu, maka arus-arus urutan juga dapat ditentukan dengan cara yang sama, sehingga kita dapatkan juga:

$$I_1 = 1/3 (I_a + a I_b + a^2 I_c) \quad (2.31)$$

$$I_2 = 1/3 (I_a + a^2 I_b + a I_c) \quad (2.32)$$

$$I_0 = 1/3 (I_a + I_b + I_c) \quad (2.33)$$

Di sini terlihat bahwa arus urutan nol (I_0) adalah merupakan sepertiga dari arus netral atau sebaliknya akan menjadi nol jika dalam sistem tiga fasa empat kawat. Dalam sistem tiga fasa empat kawat ini jumlah arus saluran sama dengan arus netral yang kembali lewat kawat netral, menjadi :

$$I_N = I_a + I_b + I_c \quad (2.34)$$

Dengan menyubstitusikan persamaan (2.28) ke (2.29) maka diperoleh :

$$I_N = 3 I_0 \quad (2.35)$$

Dalam sistem tiga fasa empat kawat ini jumlah arus dalam saluran sama dengan arus netral yang kembali lewat kawat netral. Jika arus-arus fasanya seimbang maka arus netralnya akan bernilai nol, tapi jika arus-arus fasanya tidak seimbang, maka akan ada arus yang mengalir di kawat netral sistem (arus netral akan mempunyai

nilai dalam arti tidak nol).

Adapun upaya untuk mengatasi arus netral yang tinggi dapat dilakukan melalui beberapa cara berikut, yaitu:

a) Pemerataan Beban

Pembebanan yang tak seimbang mengakibatkan arus netral sekunder trafo distribusi menjadi tinggi. Pemerataan beban dilakukan untuk memperbaiki kualitas beban yang dikirim. Dapat dilihat dengan beban seimbang menghasilkan pergeseran sudut antar fasa sebesar 120° . Hal ini berpengaruh terhadap arus netral yang terjadi dimana arus netral yang terjadi menjadi nol (Lumbantobing, 2016).

b) Memperbaiki Sambungan Netral

Setiap sistem distribusi biasanya memakai sistem 3 phase empat kawat, yaitu 3 kawat untuk ketiga phase dan 1 kawat lagi untuk netral. Apabila beban yang dipasang *non-linear* sehingga pengaruh harmonik lebih dominan maka untuk mengatasi panas lebih pada kawat netral akibat pengaruh harmonik sebaiknya ukuran kawat netral diperbesar dari ukuran standarnya. Begitu juga pada panel-panel listrik disarankan kawat netral untuk sistem pertanahannya diperbesar dari ukuran standarnya (Lumbantobing, 2016).

c) Minimisator Arus Netral

Untuk instalasi konsumen yang memerlukan kualitas listrik yang lebih baik dan handal, untuk mengurangi pengaruh pembebanan tak seimbang dan beban yang *non-linear* maka pada Transformator Distribusi atau panel kontrol utama perlu dipasang peralatan untuk membuat pembebanan menjadi seimbang. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan alat untuk meminimisasi arus netral. Alat dipasang pada sambungan sekunder rak TR yang arah pelanggan (Lumbantobing, 2016).

2.9 Rumus Perhitungan Drop Tegangan dan Kerugian

Perhitungan drop tegangan (ΔV) adalah selisih antara tegangan kirim (V_s) dengan tegangan terima (V_r), maka jatuh tegangan dapat didefinisikan adalah :

$$\Delta V = V_s - V_r \quad (2.36)$$

Sistem satu fasa :

$$\Delta V_{1\phi} = I (R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi) L \quad (2.37)$$

Untuk sistem 3 fasa :

$$\Delta V_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot I (R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi) L \quad (2.38)$$

Untuk menghitung persentase drop tegangan :

$$\% \Delta V = \frac{\Delta V}{V_s} \times 100\% \quad (2.39)$$

Keterangan :

ΔV = Drop tegangan (V)

$\% \Delta V$ = Persentase drop tegangan (%)

V_s = Tegangan kirim (kV)

V_r = Tegangan terima (kV)

I = Arus beban (A)

R = Resistansi saluran (Ohm)

X = Reaktansi saluran (Ohm)

L = Panjang saluran (Km)

φ = Faktor daya

(Nilai R dan X dapat dilihat pada tabel impedansi kawat penghantar menurut SPLN 64 : 1995)

Daya listrik yang dikirim dari sumber pembangkit listrik ke beban akan mengalami rugi-rugi, di samping rugi tegangan maka akan didapat pula rugi daya yaitu sebesar daya nyata yang hilang dengan persamaan seperti di bawah ini :

$$\left. \begin{aligned} P_{Losses\ 3\phi} &= 3 \times I^2 \times R \times L \\ P_{Losses\ 3\phi} &= \frac{3 \times \Delta V^2}{R} \end{aligned} \right\} \quad (2.40)$$

$$\left. \begin{aligned} Q_{Losses\ 3\phi} &= 3 \times I^2 \times X \times L \\ Q_{Losses\ 3\phi} &= \frac{3 \times \Delta V^2}{X} \end{aligned} \right\} \quad (2.41)$$

Untuk menghitung persentase rugi daya :

$$\%P_{Losses} = \frac{P_{Losses}}{P_r} \times 100\% \quad (2.42)$$

Keterangan :

$P_{Losses\ 3\phi}$	= Rugi daya nyata 3 fasa (Watt)
$Q_{Losses\ 3\phi}$	= Rugi daya reaktif 3 fasa (VAr)
P_r	= $S \cos \varphi$

2.10 Perangkat Lunak ETAP (Electrical Transient Analyzer Program)

ETAP (*Electrical Transient Analyzer Program*) merupakan perangkat lunak analisis sistem tenaga listrik yang digunakan untuk melakukan pemodelan, simulasi, serta optimasi jaringan listrik dalam kondisi **steady-state**, **transien**, dan **dinamis**. ETAP dikembangkan oleh Operation Technology Inc. (OTI) di Amerika Serikat dan saat ini digunakan secara luas oleh perusahaan listrik, konsultan, dan lembaga pendidikan di seluruh dunia untuk menganalisis performa sistem tenaga secara terintegrasi.

Dalam konteks **sistem distribusi tenaga listrik**, ETAP berfungsi untuk:

1. **Analisis Aliran Daya (Load Flow Analysis)** – menghitung distribusi arus, tegangan, dan daya pada setiap elemen jaringan.
2. **Analisis Hubung Singkat (Short Circuit Analysis)** – menentukan arus gangguan maksimum dan minimum pada titik tertentu.
3. **Studi Keandalan Sistem (Reliability Analysis)** – mengevaluasi kestabilan sistem terhadap perubahan beban.
4. **Koordinasi Proteksi (Protection Coordination)** – merancang koordinasi antar relay dan fuse agar sistem tetap aman saat gangguan.
5. **Simulasi Harmonik (Harmonic Analysis)** – menganalisis pengaruh harmonisa terhadap kualitas daya.

ETAP juga menyediakan visualisasi dalam bentuk **diagram satu garis (single line diagram)** yang memungkinkan pengguna melihat hubungan antar peralatan secara real-time. Setiap elemen seperti trafo, busbar, kabel, dan beban dapat dimasukkan dengan parameter teknisnya sehingga hasil simulasi mendekati kondisi lapangan.

Dalam penelitian ini, ETAP digunakan untuk **mensimulasikan ketidakseimbangan beban dan menghitung rugi-rugi daya (losses)** pada transformator distribusi di **ULP Merauke Kota**. Simulasi ini membantu memverifikasi hasil perhitungan manual dan menilai dampak teknis dari redistribusi beban terhadap arus netral serta efisiensi sistem distribusi.

2.11 Tahapan Penyeimbangan Beban Pada Transformator Distribusi

Penyeimbangan beban (*load balancing*) merupakan langkah teknis untuk mendistribusikan arus listrik secara merata pada ketiga fasa sistem distribusi agar arus netral menjadi minimal dan rugi-rugi daya dapat ditekan. Upaya ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi transformator dan menjaga keandalan sistem tenaga listrik (Lumbantobing, 2016; Suyandi, 2017).

Menurut **Suyandi (2017)** dan **Fauzi (2019)**, proses penyeimbangan beban pada sistem distribusi dilakukan melalui beberapa tahapan sistematis, yaitu:

1. Pengukuran Arus dan Tegangan Tiap Fasa

Dilakukan dengan menggunakan *clamp meter* pada sisi sekunder transformator untuk memperoleh data arus fasa (R, S, T) dan arus netral (N). Pengukuran ini bertujuan mengetahui tingkat ketidakseimbangan aktual di lapangan.

2. Analisis Ketidakseimbangan Beban

Dari hasil pengukuran, dilakukan perhitungan persentase ketidakseimbangan menggunakan rumus SPLN D3.002-1:2014. Besarnya ketidakseimbangan yang melebihi 20% menunjukkan perlu dilakukan redistribusi beban.

3. Perencanaan Redistribusi Beban

Beban pada fasa dengan arus berlebih dipindahkan sebagian ke fasa dengan arus lebih kecil. Perencanaan ini dilakukan dengan mempertimbangkan konfigurasi jaringan, posisi pelanggan, serta batas kapasitas kabel dan trafo.

4. Pelaksanaan Penyeimbangan di Lapangan

Petugas teknis melakukan perpindahan beban sesuai rencana redistribusi dengan memperhatikan standar keselamatan kerja dan pengamanan sistem. Setelah perpindahan dilakukan, koneksi antar terminal fasa diperiksa untuk memastikan tidak ada kesalahan sambungan.

5. Verifikasi Hasil dan Evaluasi

Setelah penyeimbangan, dilakukan pengukuran ulang arus tiap fasa dan arus netral. Hasil dibandingkan dengan kondisi awal untuk memastikan adanya penurunan ketidakseimbangan serta peningkatan efisiensi transformator.