

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Studi Literatur

Studi literatur merupakan sebuah pencarian teori – teori yang relevan dengan penelitian dengan mencari beberapa sumber berupa jurnal, artikel, skripsi, buku, maupun informasi lainnya yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan. Studi literatur dilakukan guna untuk mendukung serta memperkuat dalam menyelesaikan latar belakang permasalahan yang telah peneliti dapatkan. Berikut ini ada beberapa penelitian yang terkait dengan latar belakang permasalahan penelitian yang nantinya akan diselesaikan yang telah dikumpulkan dari beberapa sumber terkait.

Pada penelitian yang berjudul “Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Efisiensi Transformator Distribusi Di PT. PLN (Persero) Rayon Palur Karanganyar” Metode yang digunakan pada penelitian tersebut adalah pengumpulan referensi dari jurnal jurnal yang berhubungan dengan judul yang diambil. Setelah pengumpulan referensi kemudian dilanjutkan dengan pengambilan data penelitian yang diperoleh dengan cara mengikuti prosedur dari pihak instansi. Tahapan selanjutnya adalah melakukan perhitungan dan menganalisis pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap efisiensi transformator tersebut. Setelah dilakukan perhitungan dan dianalisis dapat disimpulkan bahwa ketiga transformator dalam keadaan tidak seimbang. Efisiensi transformator tertinggi terjadi pada transformator kedua ketika siang hari yaitu sebesar 97,51%, dan efisiensi transformator terendah terjadi pada transformator pertama ketika malam hari yaitu sebesar 94,90%. Ketika ketidakseimbangan beban semakin

tinggi maka rugi-rugi daya pada transformator juga semakin besar, dan efisiensinya semakin rendah. (Saputro, 2018)

Dalam penelitian yang berjudul “Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Transformator 3 Phase Terhadap Susut Daya Pada Jaringan Distribusi PT. PLN (Persero) ULP Manahan” pada penelitian tersebut perhitungan dan simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP versi 12.6.0. Berdasarkan analisis yang telah dilakukan oleh peneliti yang dilakukan pada trafo distribusi wilayah kerja ULP Manahan diperoleh hasil bahwa nilai susut daya terbesar pada trafo JJR010/JJR02 070 U012 T04 yaitu sebesar 1281, 752Watt untuk susut daya akibat penghantar netral dan 1013,76Watt untuk susut daya akibat arus yang mengalir ke tanah. (Lestari, 2019)

Penelitian yang berjudul “Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Tegangan dan Losses Penyulang Provinsi” yang dilakukan oleh Harfianto yang berasal dari perguruan tinggi di Universitas Bangka Belitung. Berdasarkan hasil analisa didapatkan kesimpulan bahwa hasil simulasi aliran daya dari gardu-gardu awalnya tidak seimbang. Diambil sampel terburuk dari gardu P840 dengan tegangan fasa R 189 V, fasa S 196 V dan fasa T 195 V sebelum dilakukan penyeimbangan beban dan sesudah dilakukan penyeimbangan beban menjadi lebih baik dengan Tegangan pada fasa R 210 V, fasa S 210 V, dan fasa T 210 V. Tegangan Ujung Penyulang Provinsi pada gardu P251 menjadi seimbang ditiap fasa 209 V (R, S, dan T). Setelah dilakukan penyeimbangan beban rugi daya dapat dikurangi sebesar 19,51 %. (Harfianto, 2020)

Pada penelitian yang berjudul “Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Efisiensi Transformator Distribusi Pada Gardu CGBB Di PT. PLN (Persero) Area

Bekasi Kota”. Berdasarkan hasil analisa pada penelitian tersebut didapatkan kesimpulan bahwa ketidakseimbangan beban mengakibatkan timbulnya rugi-rugi yang mengalir pada penghantar trafo, rugi yang mengalir pada penghantar trafo saat malam hari nilainya lebih besar yaitu 8.310 kW dibandingkan pada siang hari yang hanya 1.499 kW dan rugi-rugi juga terjadi pada ground yaitu sebesar 6.205 kW dibandingkan waktu siang hari 2.399 kW. Sehingga mengakibatkan nilai efisiensi pada trafo menurun yaitu pada siang hari 98% dan pada saat malam hari mengalami penurunan menjadi 93%. (Huda, 2020)

Penelitian yang berjudul “Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Efisiensi Transformator Distribusi Di PT. PLN (Persero) ULP Pedan” yang dilakukan oleh mahasiswa yang berasal dari perguruan tinggi di Universitas Muhammadiyah Surakarta. Berdasarkan hasil analisa didapatkan bahwa Efisiensi trafo tertinggi sebesar 96,75% terjadi ketika siang hari pada trafo pertama, dan efisiensi terendah sebesar 94,38% terjadi ketika malam hari pada transformator kedua. (Dewi, 2021)

2.2. Sistem Tenaga Listrik

Pada saat penyaluran energi listrik diperlukan korelasi yang berkesinambungan antara komponen yang satu dengan yang lain sehingga energi listrik yang mengalir dapat sampai ke konsumen listrik. Dalam memenuhi keperluan kebutuhan penyediaan tenaga listrik bagi para pelanggan, diperlukan berbagai peralatan listrik yang dihubungkan satu sama lain dengan sistem inter relasi secara keseluruhan dan membentuk suatu sistem tenaga listrik. Sistem tenaga listrik merupakan sebuah kumpulan sistem yang digunakan untuk menyalurkan energi listrik yang terdiri atas pusat pembangkit, gardu induk, jalur transmisi, jalur

distribusi, dan sambungan rumah sehingga membentuk satu kesatuan interkoneksi. (Huda, 2020)

Komponen – komponen sistem tenaga listrik (Tasiam, 2017) :

a. Pusat Pembangkit Listrik

Pusat pembangkit tenaga listrik dalam sistem kelistrikan merupakan tempat pertama untuk menghasilkan listrik, yang di dalamnya terdapat dua komponen penting yaitu turbin dengan fungsi shutdown utama (pengendali) dan generator dengan fungsi produksi listrik. Pusat pembangkit tenaga listrik dapat berupa PLTG, PLTU, PLTP, PLTN, PLTB, PLTA, dll.

b. Pembangkit Tenaga Listrik

Pembangkit tenaga listrik merupakan proses penyaluran tenaga listrik dari sebuah pusat pembangkit tenaga listrik menuju saluran distribusi sehingga energi listrik dapat sampai ke konsumen.

c. Saluran Transmisi Tenaga Listrik

Saluran transmisi daya adalah subsistem energi listrik yang terdiri dari bagian-bagian pusat kendali distribusi DCC (arti dari dcc). Saluran transmisi tenaga listrik adalah saluran dalam sistem kelistrikan yang menyalurkan tegangan tinggi ke tegangan sangat tinggi. Saluran transmisi listrik terletak di antara stasiun pembangkit dan gardu induk. (Tasiam, 2017). Ada dua jenis saluran transmisi tenaga listrik, yaitu saluran transmisi overhead dan saluran transmisi bawah tanah. Dalam saluran transmisi yang ditransmisikan melalui suspensi kawat setiap kolom transmisi yang dapat kita lihat di saluran pernapasan tekanan tinggi kemudian akan ditransfer ke perantara. (Sujatmiko, 2009)

d. Saluran Tegangan Menengah (Saluran Distribusi)

Sistem distribusi tenaga listrik adalah suatu sistem yang menyalurkan tenaga listrik dari jaringan transmisi ke konsumen tenaga listrik. Perusahaan di bidang distribusi tenaga listrik dapat dikelola oleh badan usaha berupa Izin Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (IUPTL) yang bergerak di bidang distribusi tenaga listrik atau dikelola oleh pemegang IUPTL yang terintegrasi di bidang distribusi tenaga listrik. Selain perusahaan publik yang dapat mengelola sistem distribusi, yaitu BUMD, BUMS yang berbadan hukum Indonesia, koperasi dan LSM. (RUKN, 2019)

Sarana pendistribusian tenaga listrik dikembangkan untuk mengurangi perbaikan tegangan, perbaikan SAIDI, perbaikan SAIFI, rugi-rugi tegangan jaringan, serta pemeliharaan jaringan lama dan perhatian untuk melihat apakah masih dapat digunakan. operasi dan apakah itu harus diganti masih harus dipertimbangkan. Selain itu, sebagai bagian dari pengembangan sistem distribusi tenaga listrik, juga bertujuan untuk dapat mendistribusikan tenaga listrik di berbagai wilayah, termasuk kawasan strategis nasional, kawasan ekonomi khusus (KEK), tujuan wisata prioritas, kawasan wisata strategis. daerah. dan pusat perikanan dan kawasan industri. (RUKN, 2019)

Saluran tegangan menengah atau yang biasa disebut dengan saluran distribusi primer yaitu dengan rentang tegangan antara 6 kV hingga 20 kV merupakan sebuah saluran udara atau kabel tanah, untuk bagian gardu tegangan menengah itu sendiri terdiri dari panel – panel pengatur tegangan menengah dan trafo sampai dengan panel – panel distribusi tegangan rendah (dengan batas tegangan antara 1 volt hingga 1000 volt dan yang umumnya

dipakai di Indonesia yaitu tegangan sebesar 220 volt dan 380 volt) yang menghasilkan tegangan kerja atau tegangan jala – jala yang akan digunakan oleh konsumen – konsumen listrik. Saluran distribusi berada di antara gardu induk hingga penyulang tegangan rendah. (Tasiam, 2017)

Biaya operasi dari sebuah sistem tenaga listrik pada umumnya merupakan biaya yang paling besar dibandingkan dengan yang biaya operasi suatu sistem pada perusahaan tenaga listrik. Secara umum biaya operasi dari suatu sistem tenaga listrik terdiri dari beberapa biaya diantaranya biaya pembelian tenaga listrik, bahan bakar tenaga listrik, material untuk sistem tenaga listrik, dan pengoperasian sistem tenaga listrik. Biaya yang terbesar dari keempat biaya tersebut yaitu adalah biaya bahan bakar tenaga listrik, dengan hal ini pembelian bahan mentah menguras sebagian besar biaya sistem tenaga listrik. PLN sebagai penyuplai tenaga listrik secara langsung ke konsumen diperkirakan menghabiskan sebesar 60% dari keseluruhan biaya untuk membeli bahan bakar untuk menghasilkan energi listrik. Dengan besarnya biaya untuk membuat sistem tenaga listrik, maka PLN harus menjadi citra atau perusahaan yang baik untuk penyuplai tenaga listrik, dalam hal ini PLN harus memiliki manajemen operasi yang baik. Manajemen operasi sistem tenaga listrik harus memiliki tujuan untuk menyuplai tenaga listrik dengan harga yang cukup ekonomis dikantong pelanggan serta memiliki mutu dan keandalan yang baik. (Huda, 2020)

Manajemen operasi sistem tenaga listrik harus memperhatikan bahwa daya listrik yang dihasilkan oleh pembangkit harus dapat memenuhi segala kebutuhan energi listrik konsumen, ini dapat diartikan bahwa ketika pembangkit listrik menghasilkan energi listrik maka langsung dialirkan ke konsumen karena energi

listrik sifatnya yang tidak dapat disimpan, jadi ketika butuh saat itu juga maka harus dibuat saat itu juga. (Huda, 2020)

PLN sebagai penyuplai energi listrik dalam menyuplai energi listrik tidak boleh terlalu berlebihan (over) karena ini akan mengakibatkan perusahaan PLN merugi serta mengecewakan konsumen jika dalam penyediaan tenaga listrik PLN kurang. Terkait dengan hal tersebut maka manajemen operasi sistem tenaga listrik perlu memperhatikan beberapa hal yaitu: (Huda, 2020)

- a. Perkiraan beban (load forecast)
- b. Syarat – syarat pemeliharaan peralatan
- c. Keandalan yang diinginkan
- d. Produksi pembangkit yang ekonomis

Keempat hal tersebut harus sering dianalisis terhadap sebuah kendala – kendala yang nantinya akan muncul, maka dari itu seringkali dilakukan pengaturan Kembali terhadap perencanaan pemeliharaan dan alokasi beban. Semakin besar suatu sistem tenaga listrik maka semakin banyak pula unsur – unsur pada sistem tenaga listrik yang harus diperhatikan serta dikoordinasikan satu sama lain. Maka dari hal tersebut diperlukan perencanaan, pelaksanaan, pengendalian, serta analisa sistem operasi yang cermat. (Huda, 2020)

2.3. Sistem Jaringan Distribusi

Sistem jaringan distribusi tenaga listrik merupakan suatu jaringan yang terdiri atas jaringan tegangan menengah 20 kV serta jaringan tegangan rendah 380/220 V ke sambungan rumah hingga ke kWh pelanggan. tPendistribusian energi listrik terjadi dengan menarik sebuah kabel pengahantar untuk jaringan distribusi

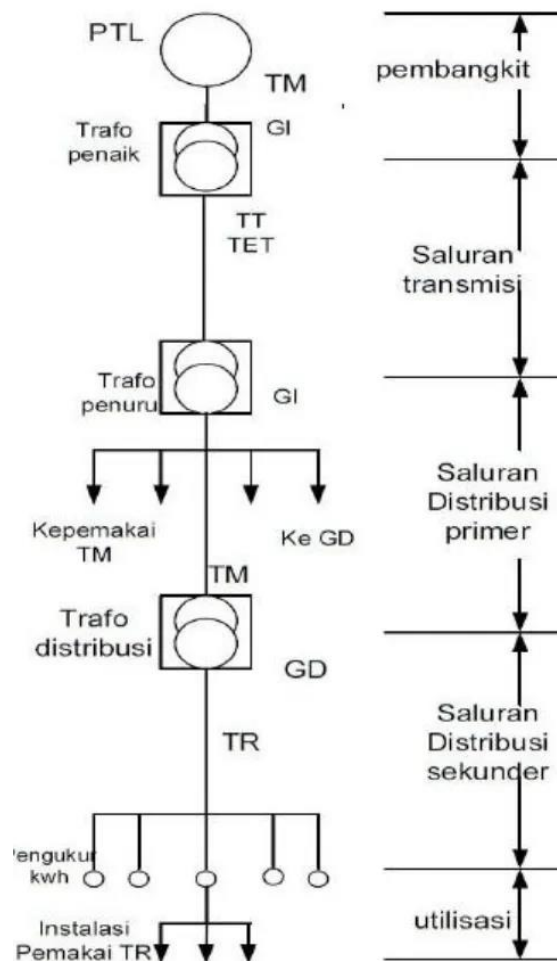
melalui konduktor overhead dan bawah tanah dari kepala gardu induk ke jalur pusat beban. Ada jaringan yang dipasang di tanah dalam sistem karena tempat atau area ini tidak dapat membangun jaringan ini, jadi untuk area ini selalu ditenagai oleh saluran transmisi overhead yang disuplai melalui hantaran udara 3 fasa 4 kawat dimana salah satu kawatnya berfungsi untuk kabel netral. (Huda, 2020)

Pada jaringan distribusi akan diletakkan sebuah trafo di lokasi – lokasi tertentu yang strategis dengan kapasitas trafo sebesar 20 kVA, trafo diletakkan dengan beberapa tipe gardu yaitu gardu portal maupun gardu cantol yang akan ditopang oleh penyulang. Proses penyaluran tegangan pada sistem distribusi yaitu ketika tegangan mengalir dari saluran transmisi sebesar 150 kV maka akan diturunkan oleh trafo step down pada jaringan tegangan tinggi lalu kemudian akan diturunkan lagi tegangannya menjadi 20 kV. Pada saluran distribusi tegangan 20 kV ini tidak langsung di masukkan ke meter pelanggan akan tetapi diturunkan kembali menjadi 380/220V yang kemudian dari trafo distribusi ini disalurkan melalui sambungan rumah ke meter – meter pelanggan. (Huda, 2020)

Pelanggan listrik disuplai dengan tegangan 380/220V dengan cara menarik sebuah kabel – kabel tegangan rendah yang menjelajah sepanjang pemukiman penduduk dan juga hingga sampai ke kawasan industri. Tegangan yang dibutuhkan untuk menghidupkan peralatan elektronika biasanya sebesar 380/220V pada peralatan rumah tangga khususnya. Pada sistem transmisi dan distribusi tegangan sebesar 20 kV (tegangan menengah) dan 150kV (tegangan tinggi) hanya digunakan untuk penyaluran jarak jauh saja. Hal ini dilakukan karena untuk mengurangi rugi – rugi daya listrik pada saat proses pengiriman

sehingga ini akan meningkatkan mutu keandalan jaringan pada sistem tenaga listrik dan juga dapat disalurkan ke berbagai daerah dengan kondisi alam yang berbeda – beda. (Huda, 2020)

Berikut merupakan gambar dari suatu proses penyaluran energi listrik :
(Huda, 2020)



Gambar 2. 1 Diagram single line sistem penyaluran tenaga listrik

Keterangan gambar:

1. Saluran Transmisi merupakan sebuah saluran tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan tenaga listrik dari Pembangkit Tenaga

Listrik ke Gardu Induk ataupun Gardu milik perusahaan yang membutuhkan daya besar.

2. Saluran distribusi merupakan sebuah saluran tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk ke trafo distribusi ataupun trafo milik perusahaan sendiri, bagi yang membutuhkan daya besar.
3. Transformator (trafo) daya merupakan sebuah transformator yang berfungsi untuk memindahkan daya listrik dari sisi primer ke sisi sekunder dengan memanfaatkan induksi elektromagnetik dengan nilai frekuensi yang sama meskipun untuk nilai tegangan dan arus yang berbeda.
4. Pemakai atau Konsumen TM (Tegangan Menengah) merupakan suatu pelanggan PLN dimana listrik yang dikonsumsi langsung diambil dari sumber atau gardu induk distribusi yang kemudian akan disalurkan ke gardu induk sendiri untuk kepentingan dalam skala yang besar.
5. Pemakai atau Konsumen TR (Tegangan Rendah) merupakan pelanggan PLN yang menggunakan tenaga listrik dalam skala level tegangan 220V atau 380V. Biasanya konsumen ini terdiri dari konsumen rumah tangga, publik, industri kecil, perkantoran, sosial, pertokoan, dan lain sebagainya.
6. Gardu induk merupakan suatu instalasi yang terdiri dari peralatan listrik yang berfungsi untuk menransformasikan energi listrik dari level tegangan tinggi yang satu ke tegangan tinggi lainnya ataupun dari level tegangan tinggi ke tegangan menengah yang dilakukan oleh trafo daya.

2.3.1. Pembagian Jaringan Distribusi

Jaringan distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang memiliki interkoneksi dengan sumber daya (dalam hal ini pembangkit) yang memiliki bagian – bagian penyusun yang berupa trafo daya yang terletak pada gardu induk distribusi sampai dengan ke meter – meter pelanggan. Jaringan distribusi dibagi menjadi dua macam yaitu jaringan distribusi primer dan jaringan distribusi sekunder berikut penjelasannya (Huda, 2020):

1. Distribusi Primer

Distribusi primer merupakan jaringan distribusi yang disusun atas jaringan tegangan menengah 20kV yang merupakan bagian dari jaringan penyulang (feeder). Jaringan distribusi primer berawal dari sisi sekunder dari trafo daya yang ada di gardu induk distribusi hingga sampai sisi primer trafo distribusi yang ada di penyulang 20kV yang terpasang pada tiang – tiang saluran.

2. Distribusi Sekunder

Jaringan distribusi sekunder merupakan sebuah jaringan distribusi yang berawal dari sisi sekunder dari trafo distribusi 20kV yang dialirkan menuju sambungan rumah hingga ke meter – meter pelanggan. Jaringan distribusi sekunder termasuk ke dalam jaringan dengan level tegangan rendah yaitu 380/220V. Aliran listrik yang mengalir melalui jaringan distribusi sekunder ini menggunakan kawat yang berisolasi bukan kawat telanjang.

2.3.2. Tipe – Tipe Jaringan Distribusi Tegangan 20 kV

Jaringan distribusi salah satunya yaitu jaringan tegangan menengah 20 kV. Jaringan tegangan menengah merupakan sebuah sistem jaringan distribusi yang berfungsi untuk menghubungkan gardu induk penyedia tenaga listrik dengan gardu induk distribusi. (Ganang, 2021)

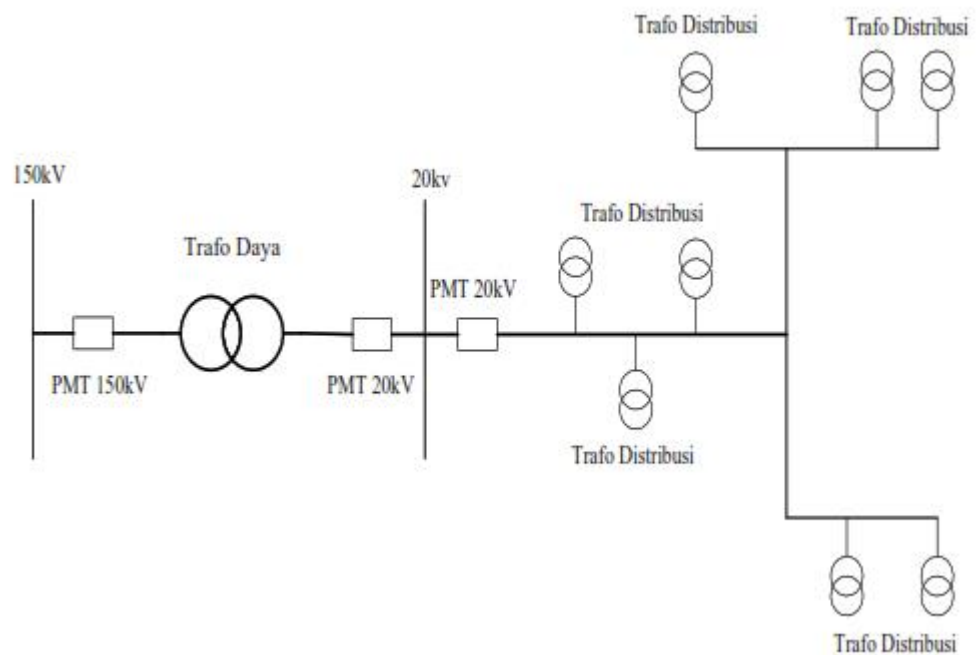
Tipe – tipe jaringan tegangan menengah diklasifikasikan menjadi 5 (lima) model yaitu jaringan tipe radial, jaringan tipe hantaran penghubung (tie line), jaringan tipe lingkaran (loop), jaringan tipe spindle, dan jaringan tipe gugus atau kluster yang dapat dijelaskan sebagai berikut: (Pareira, 2017)

a. Jaringan Distribusi Sistem Radial

Sistem distribusi memiliki fungsi yaitu untuk mendistribusikan sebuah energi listrik dari gardu induk penyedia tenaga listrik ke gardu distribusi yang mana pada sistem distribusi tenaga listrik diperlukan tingkat mutu keandalan yang tinggi karena akan berhubungan langsung dengan konsumen. Kelangsungan pelayanan tergantung dari jenis sarana penyalur dan peralatan pengamannya, dimana sarana penyalur akan bergantung pada jenis struktur jaringan yang digunakan berikut cara pengoperasiannya. Dimana jenis struktur jaringan akan dipilih berdasarkan beban yang ada pada lapangan agar memenuhi tingkat kebutuhan dan juga sifat beban. (Pareira, 2017)

Jaringan radial adalah suatu jenis jaringan distribusi energi listrik yang masuk kedalam jenis jaringan yang paling sederhana dibandingkan dengan jenis jaringan yang lain yang akan menghubungkan suatu beban ke titik sumber dengan biaya yang cukup murah. Pada jaringan dengan tipe

radial ini tidak ada alternative pasokan sehingga untuk tingkat mutu keandalan relative rendah. Tegangan dapat diatur dengan baik apabila rute dari sirkuit tersebut berlainan satu sama lain. Gambar diagram jaringan distribusi tipe radial dapat dilihat dibawah ini dengan sistematik urutan jaringannya yaitu dari sumber, lalu menuju jaringan distribusi primer, kemudian ke gardu distribusi dan akan disalurkan ke pelanggan. (Pareira, 2017)

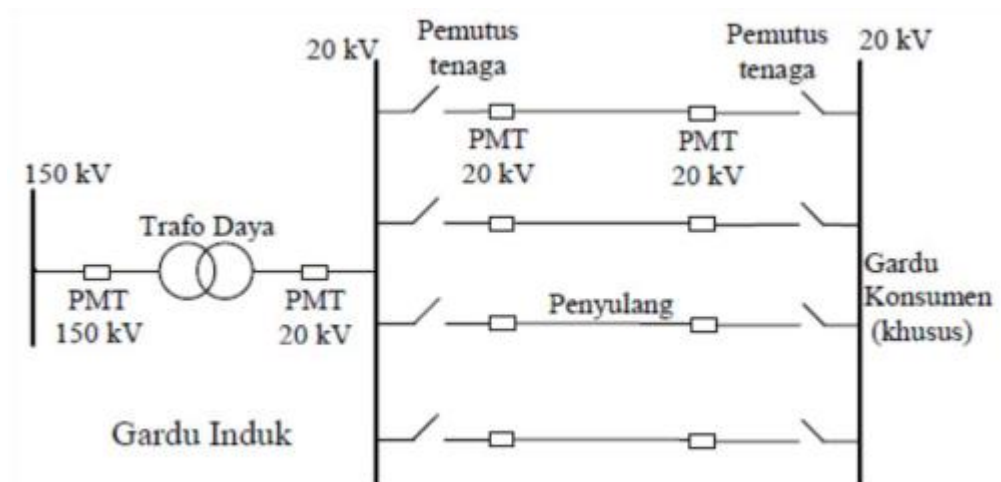


Gambar 2. 2 Single line diagram jaringan distribusi tipe radial

b. Jaringan Distribusi Sistem Hantaran Penghubung (Tie Line)

Jaringan distribusi sistem hantaran penghubung (tie line) merupakan suatu sistem distribusi yang digunakan untuk konsumen dengan kebutuhan penting yang tidak boleh padam seperti pada tempat bandar udara, rumah sakit, dan lain sebagainya. Sistem ini memiliki dua penyulang sekaligus menggunakan tambahan Automatic Change Over Switch atau Automatic

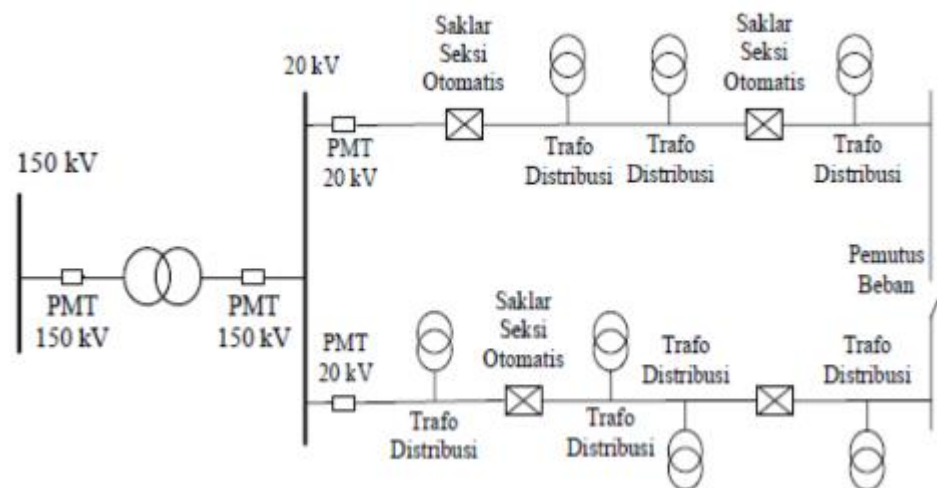
Transfer Switch, setiap penyulang akan terkoneksi ke pelanggan khusus tersebut, sehingga apabila terjadi gangguan pada satu penyulang maka akan di back up oleh penyulang yang lain yang terkoneksi. Berikut gambar sistem diagram tie line. (Pareira, 2017)



Gambar 2. 3 Single Line Diagram jaringan distribusi tipe tie line

c. Jaringan Distribusi Sistem Ring (Loop)

Jaringan distribusi sistem ring (loop) merupakan salah satu jenis jaringan distribusi yang penyulangnya dapat berasal dari 2 (dua) arah, jaringan ini membentuk loop tertutup sehingga dinamakan jaringan distribusi sistem ring (tertutup). Pada rangkaian penyulang membentuk sistem ring sehingga alternative pasokan energi listrik dari dua arah dan ini menjadikan pelayanan lebih terjamin dibandingkan dengan sistem radial. Rugi daya kecil dan kualitas daya menjadi lebih baik dari jenis yang radial. (Pareira, 2017)

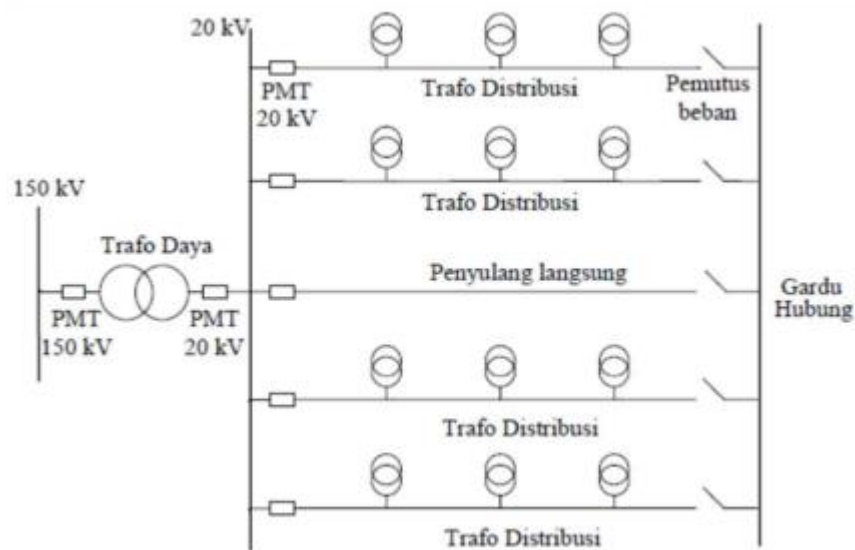


Gambar 2. 4 Single Line Jaringan distribusi sistem ring atau loop

d. Jaringan Distribusi Sistem Spindel

Jaringan distribusi sistem spindle merupakan sebuah tipe pada jaringan distribusi dengan menggabungkan jenis radial dan jenis ring loop. Jaringan distribusi sistem spindle ini berawal dari gardu induk dan tegangannya berakhir pada sebuah gardu hubung. (Pareira, 2017)

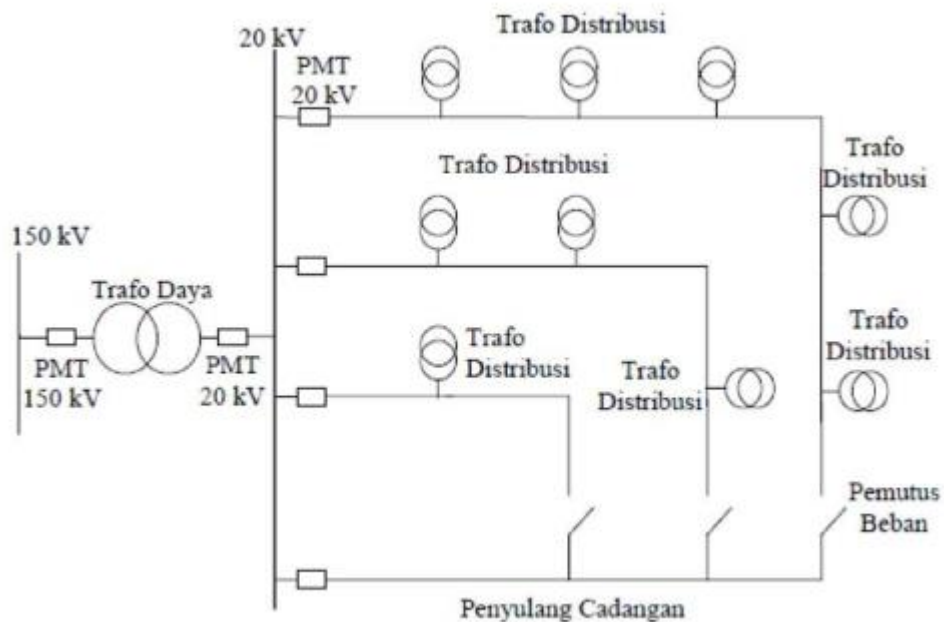
Pada penyulang spindle terdapat gardu hubung yang berfungsi untuk menghubungkan penyulang aktif dan penyulang cadangan. Sistem spindle biasanya digunakan pada Jaringan Tegangan Menengah (JTM) dan pada pengoperasiannya sistem spindle berfungsi sebagai sistem radial. Penyulang aktif pada sistem ini berfungsi sebagai penghubung antara tegangan menengah dan tegangan rendah (jaringan yang terhubung langsung ke konsumen). (Pareira, 2017)



Gambar 2. 5 Jaringan sistem spindle

e. Jaringan Distribusi Sistem Gugus Atau Kluster

Jaringan distribusi sistem gugus atau kluster biasanya digunakan pada kota – kota besar dengan konsumen padat yang mengartikan bahwa kerapatan beban tinggi. Pada sistem gugus terdapat saklar pemutus beban dan penyulang cadangan. Penyulang cadangan berfungsi untuk menggantikan posisi penyulang aktif ketika terjadi gangguan. (Pareira, 2017)



Gambar 2. 6 SLD distribusi sistem gugus

2.3.3. Peralatan Sistem Distribusi

Sistem distribusi yang baik merupakan sistem distribusi yang memiliki peralatan dan perlengkapan yang cukup lengkap, baik kelengkapan dalam hal konstruksi maupun kelengkapan dalam hal proteksi. Pada jaringan distribusi saluran udara perlengkapannya terdiri atas tiang – tiang yang dipasangkan yang letaknya berdekatan dengan pemasangan trafo, perlengkapan utama pada sistem distribusi dapat dijelaskan berikut ini (Huda, 2020):

1. Tiang

Tiang pada jaringan distribusi berfungsi untuk meletakkan penghantar serta perlengkapan sistem seperti trafo, recloser, fuse, isolator, arrester, dan lain sebagainya. Tiang ini diklasifikasikan menjadi 3 (tiga) jenis tiang yang dikelompokkan berdasarkan bahan pembuatannya yaitu tiang kayu, tiang beton, dan tiang besi yang disesuaikan dengan fungsi bawah tanah.

2. Penghantar

Penghantar pada jaringan distribusi berfungsi untuk menyalurkan energi listrik dari trafo distribusi menuju meteran pelanggan. Biasanya penghantar ini digunakan pada sistem distribusi maupun digunakan pada beberapa kawat pada jaringan bawah tanah.

3. Kapasitor

Kapasitor pada sistem distribusi digunakan untuk memperbaiki faktor daya listrik, karena ketika faktor daya kecil maka mutu keandalan suatu sistem tenaga listrik menjadi menurun dan susut daya menjadi lebih besar ataupun efisiensi dari trafo dapat menurun.

4. Recloser

Recloser pada jaringan distribusi berfungsi untuk memutuskan saluran sistem distribusi ketika terjadi gangguan dan akan segera menutup kembali sesuai dengan setting waktu yang ada pada recloser. Biasanya recloser disetting dua kali bekerja yaitu dengan dua kali pemutusan dan dua kali penyambungan. Apabila terjadi gangguan yang kedua pada saluran distribusi maka recloser secara otomatis akan terus membuka dan menutup.

5. Fuse

Fuse dalam jaringan distribusi digunakan untuk memutus saluran distribusi ketika terjadi gangguan beban lebih ataupun gangguan hubung singkat.

6. PMT

PMT pada jaringan distribusi berfungsi untuk memutuskan sistem distribusi secara keseluruhan pada tiap output. Pemutusan terjadi ketika adanya gangguan maka saklar pada PMT ini akan otomatis membuka, ataupun akan manual dibuka ketika akan dilakukan pemeliharaan atau *maintenance* jaringan distribusi tenaga listrik.

7. Transformator

Trafo pada jaringan distribusi berfungsi untuk menurunkan tegangan ke level tegangan kerja yang dibutuhkan. Trafo yang berfungsi untuk menurunkan tegangan disebut sebagai trafo step down atau trafo penurun tegangan.

8. Isolator

Isolator berfungsi untuk melindungi penghantar satu ke penghantar lainnya ataupun dari penghantar ke tiang dari kebocoran arus di penghantar.

Beberapa peralatan diatas sangat penting keberadaanya untuk sistem proteksi. Pemeliharaan serta perawatan yang rutin sangatlah diperlukan agar mutu keandalan dari sistem jaringan distribusi tenaga listrik serta mengawasi apakah jaringan distribusi tersebut masih layak atau tidak untuk beroperasi. (Huda, 2020)

2.4. Transformator

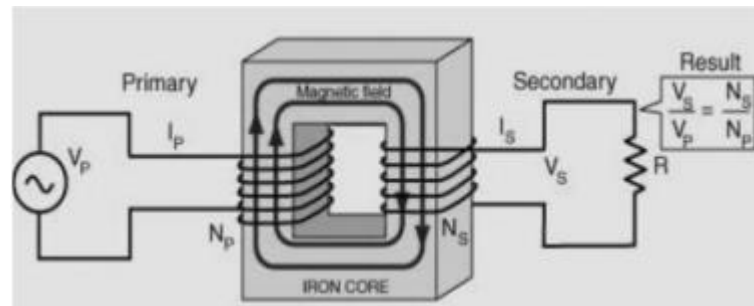
Trafo merupakan peralatan listrik yang berfungsi untuk mentransfer energi listrik dari taraf yang satu ke taraf yang lainnya dengan memanfaatkan prinsip induksi elektromagnetik. Trafo distribusi berfungsi untuk merubah tegangan dari tegangan tinggi ke tegangan menengah maupun dari tegangan menengah ke tegangan rendah. (Huda, 2020)

Pada umumnya transformator terdiri dari 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. Ini dapat diartikan bahwa nilai antara tegangan dan jumlah lilitan akan sebanding, dimana semakin banyak jumlah lilitan maka nilai tegangan semakin besar dan berbanding terbalik dengan nilai arus, semakin banyak jumlah lilitan dan semakin besar nilai tegangan maka nilai arus akan semakin kecil. (Huda, 2020)

Biasanya kumparan pada trafo terbuat dari kawat tembaga yang dibelit pada daerah seputar “kaki” inti sebuah 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. Penggunaan transformator yang sangat sederhana dan andal itu merupakan salah satu sebab penting bahwa arus bolak-balik sangat banyak dipergunakan untuk pembangkitan dan penyaluran tenaga listrik. (Huda, 2020)

Saluran-saluran transmisi tenaga listrik ini mempergunakan tegangan yang tinggi, tegangan transmisi yang tertinggi di Indonesia pada saat ini adalah 500 kV yaitu sama dengan 500.000 Volt. Hal ini dilakukan untuk mengurangi kerugian energi yang terjadi dan untuk menaikkan tegangan listrik dari pusat listrik yang tegangan generatornya berkisar antara 6 sampai 20 kV pada awal saluran transmisi dan kemudian menurunkannya lagi untuk di salurkan ke distribusi. Maka dari itulah trafo memiliki peran yang sangat penting dalam penyaluran

energi listrik sehingga dapat mengurangi rugi – rugi daya listrik pada jaringan. Trafo terdiri atas beberapa bagian – bagian salah satunya yaitu bagian inti trafo yang terbuat dari besi berlapis dan dua buah kumparan yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. (Huda, 2020)



Gambar 2. 7 Trafo (Arifin Siregar,2013)

2.4.1. Prinsip Kerja Transformator

Prinsip kerja transformator sebenarnya menggunakan hukum ampere dan hukum faraday dimana dikatakan bahwa “arus listrik dapat menimbulkan medan magnet, sebaliknya medan magnet juga dapat menimbulkan arus listrik” maka dari itu jika salah satu belitan dari trafo (belitan primer) dialiri arus listrik maka timbullah fluks magnetik atau garis gaya magnet pada sekitar belitan tersebut yang berubah – ubah. Belitan sekunder akan menerima garis gaya magnet yang besarnya berubah- ubah tergantung besarnya nilai tegangan dan banyaknya kumparan, dan dalam kumparan sekunder ini akan timbul fluks magnetik.(Siregar, 2013)

Transformator terdiri atas dua buah belitan yaitu belitan primer dan belitan sekunder yang sifatnya induktif. Kumparan primer dan sekunder ini terpisah secara elektrik dan memiliki reluktansi yang rendah yang berhubungan secara magnetis. Apabila belitan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak –

balik (AC) maka timbullah fluks magnetik yang berada di inti trafo yang telah dilaminasi sehingga ini menyebabkan sebuah rangkaian tersebut menjadi rangkaian tertutup dan ini menjadikan arus akan mengalir ke sisi primer trafo. (Huda, 2020)

Ketika ada fluks di kumparan primer maka di kumparan primer terjadi induksi sendiri (self-induction) dan akan 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 di bebani, sehingga energi listrik dapat ditransfer keseluruhan (secara magnetisasi). Untuk menghitung nilai gaya gerak listrik dapat dirumuskan sebagai berikut: (Huda, 2020)

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

Keterangan:

e = gaya gerak listrik (volt)

N = jumlah lilitan

$d\phi$ = perubahan fluks magnetic (weber/sec)

dt = perubahan waktu (sekon)

Hanya tegangan listrik arus bolak – balik yang dapat ditransformasikan oleh transformator jadi untuk tegangan DC (searah) tidak dapat ditransformasikan oleh transformator, sedangkan dalam bidang elektronika, transformator digunakan sebagai gandingan impedansi antara sumber dan beban untuk menghambat arus

searah sambil tetap menggunakan arus bolak – balik (AC) dari rangkaian tersebut. Tujuan utama menggunakan inti pada transformator adalah untuk mengurangi reluktansi (tahanan magnetis) dari rangkaian magnetis. (Huda, 2020) dalam (Yoakim, dkk. (2014)

2.4.2. Jenis - Jenis Transformator

Transformator memiliki beberapa jenis salah satunya yaitu transformator yang berdasarkan level tegangan yaitu transformator step up (penaik tegangan) dan transformator step down (penurun tegangan) yang dapat dijelaskan sebagai berikut: (Huda, 2020)

a. Transformator step up (penaik tegangan)

Transformator step up merupakan salah satu transformator daya yang berfungsi untuk menaikkan tegangan dari taraf yang rendah ke taraf yang lebih tinggi. Ciri khusus dari trafo jenis ini yaitu dimana jumlah lilitan pada kumparan primer akan lebih kecil dibandingkan dengan jumlah lilitan pada kumparan sekunder. Contoh penerapan transformator ini yaitu pada pembangkit listrik yang mana ketika listrik dihasilkan oleh generator maka tegangan listrik tersebut akan dinaikkan ke level tegangan ekstra tinggi ataupun tegangan tinggi. Dimana dapat disimpulkan bahwa nilai $N_p < N_s$ dan $V_p < V_s$ dan $I_p > I_s$. Dimana :

N_p = jumlah belitan primer

N_s = jumlah belitan sekunder

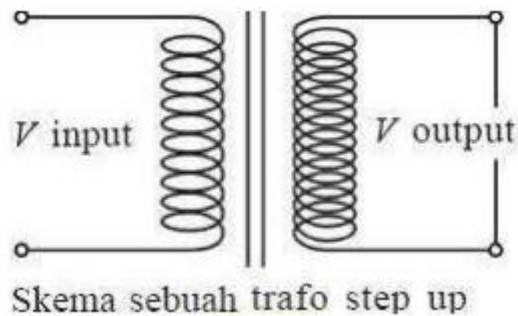
V_p = nilai tegangan di sisi primer atau sering disebut sebagai tegangan input

V_s = nilai tegangan di sisi sekunder atau sering disebut sebagai tegangan output

I_p = arus di sisi primer

I_s = arus di sisi sekunder

Berikut symbol dari transformator step up.



Gambar 2. 8 Trafo step up

b. Transformator step down (penurun tegangan)

Transformator step down merupakan sebuah trafo yang berfungsi untuk menurunkan tegangan dari level yang tinggi menuju level yang lebih rendah. Ciri khusus dari trafo jenis ini yaitu dimana jumlah lilitan pada kumparan primer akan lebih besar dibandingkan dengan jumlah lilitan yang ada pada kumparan sekunder. Contoh penerapan transformator ini yaitu pada sistem jaringan distribusi energi listrik. Ini dapat diartikan bahwa trafo tersebut mengubah level tegangan dari tegangan menengah (20kV) ke tegangan rendah (380/220V). Dimana dapat disimpulkan bahwa nilai $N_p > N_s$ dan $V_p > V_s$ dan $I_p < I_s$.

Dimana:

N_p = jumlah belitan primer

N_s = jumlah belitan sekunder

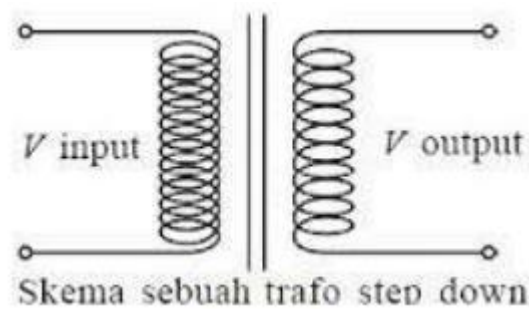
V_p = nilai tegangan di sisi primer atau sering disebut sebagai tegangan input

V_s = nilai tegangan di sisi sekunder atau sering disebut sebagai tegangan output

I_p = arus di sisi primer

I_s = arus di sisi sekunder

Berikut symbol dari transformator step down.



Gambar 2. 9 symbol trafo step down

2.4.3. Trafo Distribusi

Transformator distribusi merupakan sebuah transformator yang memiliki peranan yang sangat penting dalam jaringan distribusi sistem tenaga listrik dari gardu distribusi hingga sampai ke konsumen listrik. Trafo distribusi ini merupakan komponen penyusun sistem saluran distribusi dan transmisi yang sangat vital sehingga diharapkan trafo distribusi yang telah dipasang dapat bekerja terus menerus dengan tingkat mutu keandalan yang bagus karena bila terjadi gangguan pada trafo distribusi ini maka akan menurunkan kontinuitas pelayanan konsumen serta jika trafo ini rusak yang sangat parah maka dapat mengakibatkan putusnya jaringan energi listrik atau padamnya energi listrik. Dalam hal ini PLN dalam hal sebagai penyuplai energi listrik dapat merugi serta pelayanan terhadap konsumen jelas akan terganggu akibat padamnya jaringan listrik. (Huda, 2020)

Pemeliharaan atau inspeksi terhadap kinerja dari trafo distribusi sangatlah penting sehingga ketika sewaktu – waktu ketika terjadi gangguan dapat diatasi dengan cepat dan tepat. Pemilihan rating dari trafo distribusi yang tidak sesuai akan mengakibatkan nilai efisiensi dari trafo semakin menurun, begitu juga pemilihan lokasi untuk penempatan trafo jika tidak sesuai maka dapat memperbesar nilai dari rugi – rugi daya pada sistem jaringan tenaga listrik. Pada sistem distribusi terdapat dua jenis trafo yang digunakan yaitu: (Huda, 2020)

a. Jenis pasangan luar pada gardu portal dan gardu cantol



Gambar 2. 10 Jenis pasangan luar pada gardu portal



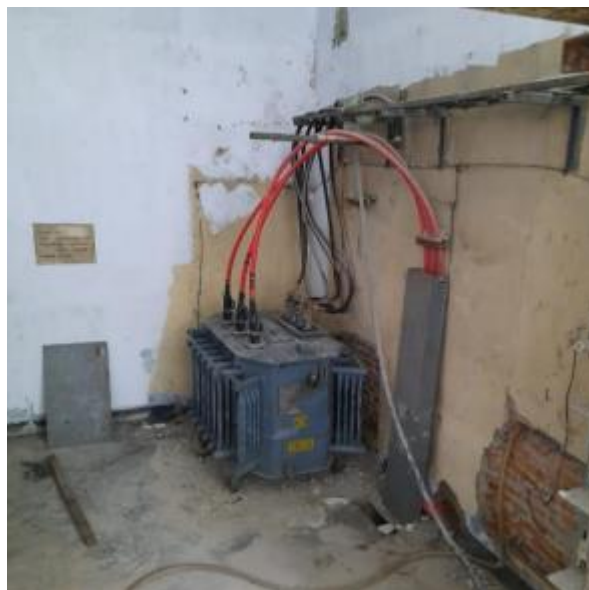
Gambar 2. 11 Jenis pasangan luar pada gardu cantol

b. Jenis pasangan dalam pada gardu beton, kios atau pasangan dalam ruang

ketika akan memasang trafo pada pasangan dalam maka harus memperhatikan faktor seperti temperature ruang yang tidak terlalu panas beserta terdapat pendingin untuk trafo.



Gambar 2. 12 Gardu beton atau gardu kios



Gambar 2. 13 Trafo jenis pasangan dalam

2.4.4. Jenis Gangguan Pada Trafo

Trafo ketika beroperasi pasti ada gangguan meskipun sudah dilakukan pemeliharaan dan perawatan, gangguan pada trafo digolongkan menjadi dua jenis yaitu gangguan internal trafo dan gangguan eksternal trafo, berikut penjelasannya: (Huda, 2020)

- a. Gangguan internal trafo merupakan sebuah gangguan pada trafo yang disebabkan oleh trafo itu sendiri, diantaranya yang menjadi gangguan internal trafo yaitu:
 - Gangguan Hubung Singkat, yaitu gangguan yang terjadi antar fasa dan gangguan yang terjadi antar fasa ke tanah
 - Bushing TM/TR dan packing body yang kurang kuat / kendur
 - Gangguan pada sistem pendingin trafo
 - Penyambungan kumparan yang kurang baik
 - Kerusakan isolasi
- b. Gangguan eksternal trafo merupakan sebuah gangguan pada trafo yang diakibatkan oleh masalah dari luar trafo, diantaranya yang menjadi gangguan eksternal yaitu:
 - Gangguan hubung singkat (short circuit) pada penyulang (feeder), rel, dan incoming feeder
 - Pembebanan trafo yang tidak seimbang, melebihi dari kapasitas 80% kapasitas daya trafo
 - Sistem pemeliharaan yang kurang tepat
 - Cuaca dan lokasi penempatan trafo, karena dengan cuaca yang buruk ini dapat mengakibatkan berkurangnya keandalan trafo.

salah satu contohnya bisa diakibatkan karena adanya sambaran petir (Gelombang Surja), sambaran petir melalui sistem transmisi dalam waktu singkat saja dapat berakibat fatal karena dapat merambat ke gardu terdekat dimana trafo terpasang.

Gangguan – gangguan tersebut dapat mengakibatkan kerugian pada PLN yaitu kerugian material maupun inmaterial, kerugian material seperti biaya untuk perbaikan jika rusak parah maka dapat membengkakkan anggaran, kerugian inmaterial seperti turunnya rasa percaya konsumen ke PLN sebagai penyuplai energi listrik. (Huda, 2020)

Kerusakan yang terjadi pada transformator akan menyebabkan terganggunya sistem jaringan tenaga listrik baik bagi PLN maupun bagi pelanggan listrik yang ketika saat sedang membutuhkan akan tetapi belum dapat menyuplai. Maka dari itu perlu direncanakan lagi untuk pemeliharaan trafo distribusi agar tidak terjadi kejadian yang lebih fatal lagi. (Huda, 2020)

Faktor utama bahwa trafo yang dipesan untuk dipakai adalah sesuai dengan spesifikasi yang tepat untuk tujuan pemakaian yang tepat pula. Selanjutnya yang tidak kalah penting adalah pemasangan trafo yang baik di instalasi listrik dan dilengkapi oleh sistem pengaman. Gardu Trafo Tiang (GTT) adalah merupakan salah satu komponen instalasi tenaga listrik yang terpasang di jaringan distribusi. Berfungsi sebagai trafo daya penurun tegangan dari tegangan menengah ketegangan rendah, dan selanjutnya tegangan tersebut disalurkan ke konsumen. Mengingat fungsi dan harga trafo tersebut cukup mahal bila dibandingkan dengan peralatan distribusi lainnya, maka pemeliharaan preventif yang dilakukan secara intensif, dengan kriteria pemeliharaan yang jelas untuk

setiap komponen GTT dan ditangani oleh tenaga yang terampil dengan peralatan yang memadai agar pemeliharaan tersebut berjalan dengan efektif. (Huda, 2020)

2.4.5. Arus Beban Penuh

Penurunan tegangan maksimum pada beban penuh, yang diperbolehkan di beberapa titik pada jaringan distribusi adalah sebagai berikut (SPLN 72, 1987):

1. SUTM, sebesar 5 % dari tegangan kerja bagi sistem radial
2. SKTM, sebesar 2 % dari tegangan kerja pada sistem spindel dan gugus.
3. Trafo distribusi, sebesar 3 % dari tegangan kerja
4. Saluran tegangan rendah, sebesar 4 % dari tegangan kerja tergantung kepadatan beban.
5. Sambungan rumah, sebesar 1 % dari tegangan nominal.

Daya transformator bila ditinjau dari sisi tegangan tinggi (primer) dapat dirumuskan sebagai berikut (Huda, 2020):

$$S = \sqrt{3} \cdot V_{l-l} \cdot I_l \quad (2.2)$$

Keterangan :

S = daya transformator dalam satuan voltampere (VA)

V_{ll} = nilai besarnya tegangan antar saluran dalam satuan volt pada sisi primer trafo (V)

I = nilai arus jala – jala dalam satuan ampere (A)

Ketika akan menentukan arus beban penuh (full load) maka dapat menggunakan rumus:

$$I_{fl} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V} \quad (2.3)$$

Dimana:

I_{FL} = arus beban penuh dalam satuan ampere (A)

S = daya transformator dalam satuan voltampere (VA)

V = nilai besarnya tegangan dalam satuan volt pada sisi sekunder trafo (V)

Dengan demikian untuk menghitung presentase pembebanannya adalah sebagai berikut:

$$\%b = \frac{I_{ph}}{I_{fl}} \times 100\% \quad (2.4)$$

Dimana:

$\%b$ = presentase pembebanan (%)

I_{ph} = arus fasa (A)

I_{fl} = arus beban penuh (A)

2.5. Keseimbangan Beban dan Ketidakseimbangan Beban Pada Transformator

Kebutuhan akan pasokan listrik sangat penting pada saat ini baik itu dilingkungan penduduk maupun dilingkungan industri, akan tetapi pada saat penyaluran energi listrik sering tidak merata disetiap beban yang akan mengakibatkan ketidakseimbangan antar fasa, sehingga hal ini dapat mempengaruhi proses pendistribusian energi listrik, keadaan seimbang sangatlah

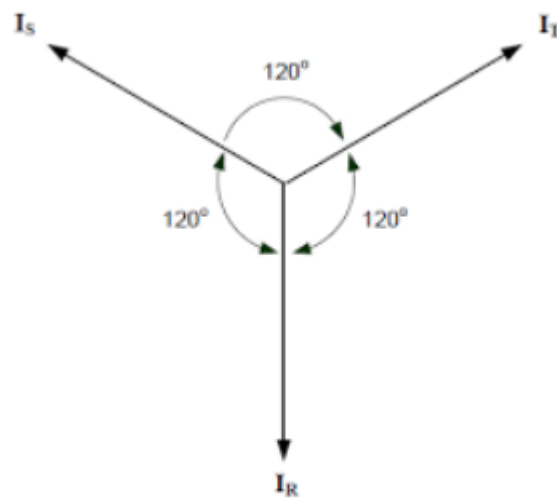
diinginkan dimana hal ini akan menjadikan mutu keandalan jaringan listrik stabil dan efisiensi transformator meningkat. (Huda, 2020)

Beban dari fasa yang seimbang merupakan sebuah beban dimana arus yang mengalir pada beban – beban simetris tersebut dihubungkan dengan tegangan yang simetris. Pada analisa beban ini dilakukan hanya dengan mengasumsikan untuk satu fasa saja yang dianggap beban telah seimbang, padahal seringkali pada kenyataannya beban tersebut tidaklah seimbang. Dalam kasus ini penyelesaian dapat menggunakan komponen simetris dimana terdapat 2 keadaan yaitu keadaan beban seimbang dan keadaan beban tidak seimbang atau secara umum disebut sebagai ketidakseimbangan beban. (Pareira, 2017)

2.5.1. Keadaan Seimbang

Transformator dikatakan seimbang apabila antar fasa R, S, dan T memenuhi ketentuan sebagai berikut: (Nugroho, 2019)

1. Nilai vektor arus maupun vektor tegangan antar fasa R, S, dan T memiliki nilai yang besarnya sama.
2. Ketiga vektor untuk fasa R, S, dan T membentuk sudut sebesar 120 derajat satu sama lainnya, seperti yang dapat diperlihatkan pada gambar berikut ini:



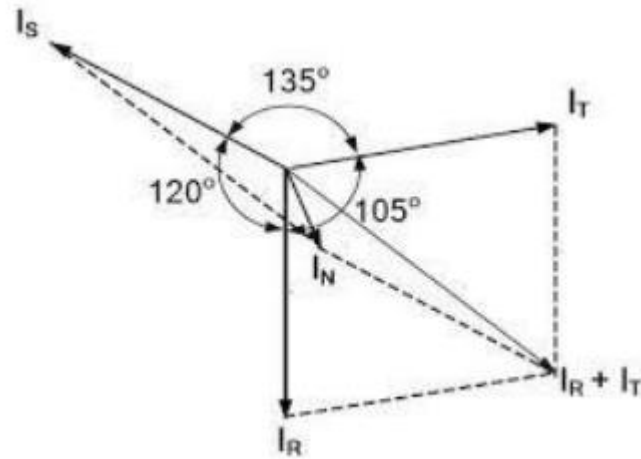
Gambar 2. 14 Diagram vektor arus kondisi seimbang

Berdasarkan gambar diatas dapat dilihat bahwa ketika vektor pada masing – masing fasa R, S, dan T dijumlahkan maka akan sama dengan nol, sehingga pada netral tidak akan muncul arus dan besarnya nilai arus netral sama dengan nol. Pada gambar diatas juga dapat diketahui bahwa sudut antar fasa (R-S, S-T, dan R-T) sama – sama membentuk sudut sebesar 120 derajat.

2.5.2. Keadaan tidak seimbang

Pada keadaan tidak seimbang memiliki 3 (tiga) kemungkinan diantaranya sebagai berikut: (Nugroho,2019)

1. Vektor pada masing – masing fasa R, S, dan T memiliki nilai yang besarnya sama akan tetapi antar fasa – fasa seperti (R-S, S-T, dan R-T) tidak membentuk sudut sebesar 120 derajat;
2. Vektor pada masing – masing fasa R, S, dan T tidak sama besar akan tetapi sudut antar fasanya (R-S, S-T, dan R-T) membentuk sudut sebesar 120 derajat satu sama lain;
3. Vektor pada masing – masing fasa R, S, dan T memiliki nilai yang tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120 derajat satu sama lain.



Gambar 2. 15 Diagram vektor arus dengan kondisi tidak seimbang

Dapat diketahui pada gambar diatas bahwa kondisi ketika beban tidak seimbang maka penjumlahan besarnya nilai arus pada netral transformator ketiga vektor pada fasa R, S, dan T tidak akan sama dengan nol. Terlihat juga untuk besarnya nilai sudut antar fasa, yaitu fasa R-S , R-T, dan S-T tidak sama besaran sudutnya yang seharusnya masing – masing bernilai 120 derajat, maka ketika penjumlahan nilai arus besarnya tidak sama dengan nol ini menandakan ada arus yang mengalir pada netral transformator. (Nugroho,2019)

Ketika jaringan berada dalam posisi tidak seimbang maka akan mengalir sebuah arus ke kabel netral sehingga akan menimbulkan I_N , dimana untuk nilai besaran arus netral tergantung dari besarnya faktor ketidakseimbangan antara fasa R, S, dan T. Nilai arus rata – rata saat beban tidak seimbang dapat dihitung melalui rumus berikut ini:

$$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \quad (2.5)$$

Akibat dari ketidakseimbangan beban 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). Analisa ketidakseimbangan beban pada trafo dengan menggunakan persamaan, koefisien a, b dan c dapat diketahui besarnya, dimana besarnya arus fasa dalam keadaan seimbang (I) sama dengan besarnya arus rata-rata ($I_{rata-rata}$). (Malik & Haedar, 2021) Dimana, besarnya arus pada fasa dalam keadaan seimbang (I) sama dengan besarnya arus rata-rata :

$$I_{rata-rata} = I_a = I_b = I_c \quad (2.6)$$

$$I_a = a$$

$$I_b = b$$

$$I_c = c$$

Maka untuk nilai koefisien untuk a, b, dan c diperoleh dari: (Malik & Haedar, 2021)

$$a = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} \quad (2.7)$$

$$b = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} \quad (2.8)$$

$$c = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} \quad (2.9)$$

Pada keadaan seimbang, besarnya koefisien a, b, dan c adalah 1. Dengan demikian rata - rata ketidakseimbangan beban dalam % dapat dirumuskan sebagai berikut: (Malik & Haedar, 2021)

$$U_L = \frac{\{|a - 1| + |b - 1| + |c - 1|\}}{3} \times 100\% \quad (2.10)$$

Dari persamaan *losses* karena adanya arus pada pengantar netral trafo dapat dihitung besarnya, sebagai berikut: (Malik & Haedar, 2021)

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N \quad (2.11)$$

Dimana daya aktif trafo menjadi: (Malik & Haedar, 2021)

$$P = S \cdot \cos \varphi \quad (2.12)$$

Sehingga, presentas *losses* karena adanya arus pada penghantar netral trafo: (Malik & Haedar, 2021)

$$\%P_N = \frac{P_N}{P} \times 100\% \quad (2.13)$$

Losses akibat arus netral yang mengalir ke tanah dapat dihitung besarnya dengan menggunakan persamaan: (Malik & Haedar, 2021)

$$P_G = I_G^2 \cdot R_G \quad (2.14)$$

Dengan demikian presentase lossesnya menjadi: (Malik & Haedar, 2021)

$$\%P_G = \frac{P_G}{P} \times 100\% \quad (2.15)$$

2.6. 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: (Malik & Haedar, 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.

2.6.1. Arus Netral Beban Tidak Seimbang

Pada 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: (Malik & Haedar, 2021)

$$\begin{aligned} I_a &= I_1 + I_2 + I_0 \\ I_b &= a^2 I_1 + a I_2 + I_0 \\ I_c &= a I_1 + a^2 I_2 + I_0 \end{aligned} \tag{2.16}$$

Dengan tiga langkah yang telah dijabarkan dalam menentukan tegangan urutan positif, urutan negative, dan urutan nol terdahulu, maka arus-arus urutan juga dapat ditentukan dengan cara yang sama, sehingga di dapatkan juga: (Malik & Haedar, 2021)

$$I_1 = \frac{1}{3}(I_a + a I_b + a^2 I_c) \tag{2.17}$$

$$I_2 = \frac{1}{3} (I_a + a^2 I_b + a I_c)$$

$$I_0 = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c)$$

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: (Malik & Haedar, 2021)

$$I_N = I_a + I_b + I_c \quad (2.18)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan maka diperoleh: (Malik & Haedar, 2021)

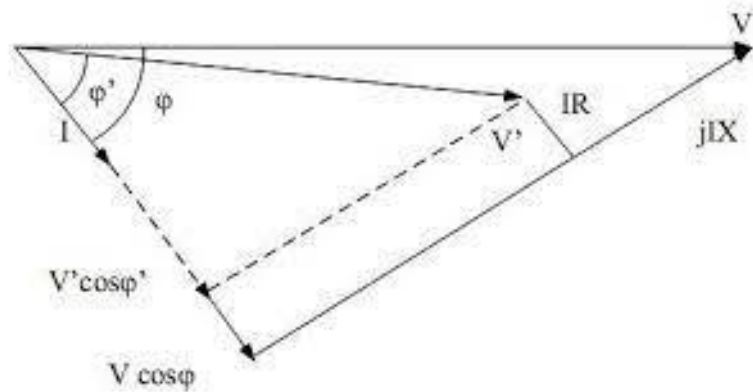
$$I_N = 3 I_0 \quad (2.19)$$

2.6.2. Penyaluran dan Susut Daya Pada Keadaan Beban Seimbang

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: (Malik & Haedar, 2021)

$$P = 3 [V]. [I]. \cos \varphi \quad (2.20)$$

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 di bawah ini: (Malik & Haedar, 2021)



Gambar 2.6 Diagram Fasor Tegangan Saluran Daya Model Fasa Tunggal

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 masing – masing adalah V' dan φ' , maka besarnya daya pada ujung terima adalah: (Malik & Haedar, 2021)

$$P' = 3[V']. [I]. Cos \varphi' \tag{2. 21 }$$

Maka selisih antara susut daya P dan P' memberikan susut daya saluran yaitu: (Malik & Haedar, 2021)

$$Pl = P - P'$$

$$Pl = (3[V]. [I]. Cos \varphi) - (3[V']. [I]. Cos \varphi') \tag{2. 22 }$$

$$Pl = 3. [I] (([V]. Cos \varphi) - ([V']. Cos \varphi'))$$

Sementara itu pada gambar diatas memperlihatkan bahwa: (Malik & Haedar, 2021)

$$(V. Cos \varphi) - (V'. Cos \varphi') = [I]. R \tag{2. 23 }$$

Dengan R adalah tahanan kawat tiap fasa, oleh karena itu persamaannya menjadi: (Malik & Haedar, 2021)

$$Pl = 3 [I^2]R \quad (2.24)$$

2.6.3. Penyaluran dan Susut Daya Pada Keadaan Beban Tidak Seimbang

Jika $[I]$ adalah besarnya arus fasa dalam penyaluran daya sebesar P dalam keadaan seimbang, maka untuk penyaluran daya yang sama tetapi dalam keadaan tidak seimbang besarnya arus antar fasa dapat disebut dengan koefisien a , b , dan c adalah sebagai berikut: : (Malik & Haedar, 2021)

$$[IR] = a [I] \quad (2.25)$$

$$[IS] = b [I]$$

$$[IT] = c [I]$$

Dengan IR , IS , dan IT adalah nilai arus fasa – fasa R , S , dan T dan telah disimpulkan bahwasannya nilai faktor daya ketiga fasa dianggap sama walaupun besarnya arus masing – masing fasa berbeda. Oleh karena itu dengan anggapan seperti ini, rumus tegangan ujung saluran dapat dituliskan sebagai berikut: (Malik & Haedar, 2021)

$$P_{out} = (a + b + c).V.I.Cos \varphi \quad (2.26)$$

Apabila menyatakan daya yang besarnya sama, maka dari kedua persamaan tersebut, dapat diperoleh untuk koefisien a , b , dan c ; (Malik & Haedar, 2021)

$$a + b + c = 3 \quad (2.27)$$

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

$$\begin{aligned}
 I_N &= I_R + I_S + I_T \\
 I_N &= I_a \angle \theta a + I_b \angle \theta b + I_c \angle \theta c \\
 I_N &= I_a (0 - \theta a) + I_b (-120 - \theta b) + I_c (120 - \theta c)
 \end{aligned}
 \tag{2.28}$$

Susut daya saluran adalah jumlah susut pada penghantar fasa dan penghantar netral adalah: (Malik & Haedar, 2021)

$$Pl' = \{([I_R^2] + [I_S^2] + [I_T^2]) \cdot R\} + [I_N^2] R_N
 \tag{2.29}$$

Dengan R_N adalah tahanan penghantar netral. maka akan diperoleh: (Malik & Haedar, 2021)

$$\begin{aligned}
 Pl' &= \{9 - 2(ab + ac + bc)[I^2] R \\
 &\quad + (9 - 3(ab + ac + bc))[I_N^2] \cdot R_N
 \end{aligned}
 \tag{2.30}$$

Persamaan ini adalah persamaan susut daya saluran untuk saluran dengan penghantar netral. Apabila tidak ada penghantar netral maka kedua ruas kanan akan hilang sehingga susut daya akan menjadi: (Malik & Haedar, 2021)

$$Pl' = \{9 - 2(ab + ac + bc)[I^2] R
 \tag{2.31}$$

2.7. Dampak Ketidakseimbangan Beban Pada Transformator

Ketidakseimbangan beban merupakan suatu hal yang lumrah terjadi pada jaringan distribusi, jaringan distribusi yang sering terkena ketidakseimbangan biasanya jaringan distribusi tegangan rendah. Ketika suatu jaringan tidak seimbang maka lama kelamaan nilai arus pada jaringan tersebut akan menjadi

tinggi pada sisi netralnya, jadi semakin tinggi ketidakseimbangan beban maka akan semakin tinggi pula nilai arus yang berada di sisi netral trafo. Arus yang ada pada penghantar netral trafo ini akan menjadikan suatu rugi – rugi daya pada jaringan tersebut, oleh karena itu ketidakseimbangan beban haruslah diminimalisir agar nilai rugi – rugi daya menjadi kecil. Dampak dari ketidakseimbangan beban yaitu munculnya nilai rugi – rugi daya pada jaringan. (Pareira,2019)

Rugi – rugi daya pada transformator sebenarnya sudah menjadi hal yang lumrah, pasalnya ketika sebuah transformator dibebani maka akan terjadi penggunaan energi listrik yang tidak serempak disetiap beban, hal ini akan mengakibatkan beban tidak seimbang antar fasa sehingga akan mengalir sebuah arus pada kabel netral yang dapat menyebabkan *losses*. Jika *losses* dibiarkan secara terus menerus maka akan mengakibatkan turunnya nilai efisiensi pada transformator tersebut. (Anisa, 2020)

Pada transformator terdapat rugi – rugi yang muncul pada saat trafo dibebani yang merupakan rugi – rugi yang mengalir pada penghantar netral dari trafo dan mengalir ke tanah (ground) sedangkan rugi – rugi pada saat trafo berbeban yang merupakan fungsi dari arus beban terutama inti tembaga. Berikut dapat dijelaskan dan diperhitungkan secara matematis: (Anisa, 2020)

a. Losses akibat adanya Arus pada Penghantar Netral Trafo

Losses akibat adanya arus pada netral trafo merupakan salah satu dampak dari adanya peristiwa ketidakseimbangan beban, karena ketika salah satu syarat keseimbangan tidak terpenuhi maka dapat menimbulkan losses pada sistem distribusi jaringan listrik. Losses merupakan peristiwa yang merugikan karena

daya yang diterima oleh konsumen akan kurang dari daya yang dikirim oleh PLN, untuk mencari nilai losses tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N \quad (2.32)$$

Dimana:

P_N = Losses yang timbul pada Penghantar Netral (Watt)

I_N = Arus yang mengalir melalui Kawat Netral (A)

R_N = Tahanan pada Kawat Netral (Ohm)

b. Losses akibat adanya Arus pada Ground dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$P_G = I_G^2 \cdot R_G \quad (2.33)$$

Dimana :

P_G = Losses yang timbul pada Penghantar Ground (Watt)

I_G = Arus yang mengalir melalui Kawat Ground (A)

R_G = Tahanan pada Kawat Ground (Ohm)

c. Losses akibat hambatan jaringan dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$P_{Loss} = 3 \cdot I_x^2 \cdot R \cdot L_x \quad (2.34)$$

Dimana:

P_{Loss} = Losses yang timbul pada penghantar fasa (Watt)

I_x^2 = Arus yang diampu oleh bus ke - x^2 (A)

R = Nilai tahanan kawat (Ohm)

L_x = Nilai panjang saluran (km)

d. Efisiensi Transformator

Salah satu dampak dari ketidakseimbangan juga akan berpengaruh pada nilai dari efisiensi trafo, dimana ketika terjadi ketidakseimbangan beban maka nilai dari efisiensi trafo akan menurun. Mencari nilai efisiensi dalam transformator dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \quad (2.35)$$

Dimana:

η = efisiensi transformator dalam persen (%)

P_{OUT} = nilai daya output (watt)

P_{IN} = nilai daya input (watt)

2.8. ETAP (*Electric Transient and Analysis Program*)

ETAP (*Electric Transient and Analysis Program*) merupakan suatu perangkat lunak yang dapat digunakan untuk menganalisa sistem tenaga listrik. Perangkat lunak ini dapat digunakan secara offline maupun online. Ketika mengakses secara offline maka dapat digunakan untuk analisa serta simulasi tenaga listrik dan ketika mengakses secara online dapat digunakan untuk pengontrolan sistem tenaga listrik secara real time. (ETAP, 2017)

Pada mulanya ETAP digunakan hanya sebatas untuk mengontrol kualitas dan keamanan fasilitas nuklir yang berlokasi di Amerika Serikat, kemudian karena dianggap efisien ETAP dikembangkan secara real time, simulasi control, serta optimasi sistem tenaga listrik. Pada ETAP terdapat beberapa fitur yaitu fitur yang

digunakan untuk menganalisa pembangkitan tenaga listrik, sistem transmisi maupun sistem distribusi tenaga listrik.(ETAP, 2017)

ETAP sering digunakan untuk membuat proyek sistem tenaga listrik dalam bentuk diagram satu garis (*one line diagram*) dan jalur sistem pentanahan untuk berbagai bentuk analisis, antara lain: aliran daya (*load flow*), hubung singkat (*short circuit*), starting motor, *transient stability*, koordinasi relay proteksi dan sistem harmonisasi. Pada proyek sistem tenaga listrik terdapat elemen-elemen rangkaian yang dapat diedit langsung dari diagram satu garis dan atau jalur sistem pentanahan. Kemudian hasil analisis dari ETAP berupa diagram satu garis (*single line diagram*).

ETAP memiliki 3 (tiga) konsep utama yaitu sebagai berikut:

1. *Virtual Reality Operasi*

Virtual Reality Operasi merupakan suatu fitur yang ada pada ETAP dimana sistem operasional yang ada pada perangkat lunak ETAP hampir sama dengan keadaan *realnya*. Misalnya, ketika kita membuka atau menutup sebuah sirkuit breaker, menempatkan suatu elemen pada sistem, mengubah status operasi suatu motor, dan untuk kondisi de-energized pada suatu elemen dan sub-elemen sistem ditunjukkan pada gambar single line diagram dengan warna abu-abu.

2. Total Integration Data

Sistem elektrik, sistem logika, sistem mekanik, dan data fisik dari suatu elemen yang dimasukkan dalam sistem database yang sama yang kemudian dihubungkan informasinya satu sama lain di ETAP. Misalnya, untuk elemen

subuah kabel, tidak hanya berisikan data kelistrikan dan tentang dimensi fisiknya, tapi juga memberikan informasi melalui raceways yang di lewati oleh kabel tersebut. Dengan demikian, data untuk satu kabel dapat digunakan untuk dalam menganalisa aliran beban (load flow analysis) dan analisa hubung singkat (short-circuit analysis) yang membutuhkan parameter listrik dan parameter koneksi serta perhitungan ampacity derating suatu kabel yang memerlukan data fisik routing.

3. Simplicity in Data Entry

Data yang dimiliki oleh ETAP Power Station merupakan sebuah data yang sangat terperinci untuk setiap elemen yang digunakan. Dengan menggunakan editor data, dapat mempercepat proses entri data suatu elemen. Data-data yang ada pada program ini telah di masukkan sesuai dengan data-data yang ada di lapangan untuk berbagai jenis analisa atau desain.

Dalam ETAP Power Station dapat membuat analisa gambaran secara detail mengenai single line diagram secara grafis serta mengadakan beberapa analisa/studi yakni Load Flow (aliran daya), Short Circuit (hubung singkat), motor starting, harmonisa, transient stability, protective device coordination, dan cable derating. Ketika memulai ETAP maka terdapat beberapa faktor yang harus diperhatikan antara lain sebagai berikut: (ETAP, 2017)

- **One Line Diagram**, memperlihatkan hubungan antar komponen/peralatan listrik sehingga membentuk suatu sistem kelistrikan.
- **Library**, informasi mengenai semua peralatan yang akan dipakai dalam sistem kelistrikan. Data elektris maupun mekanis dari peralatan yang

detail/lengkap dapat mempermudah dan memperbaiki hasil simulasi/analisa.

- **Standar yang dipakai**, biasanya mengacu pada standar IEC atau ANSI, frekuensi sistem dan metode – metode yang dipakai.
- **Study Case**, berisikan parameter – parameter yang berhubungan dengan metode studi yang akan dilakukan dan format hasil analisa.

2.9. Penelitian Terkait