



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik adalah infrastruktur yang penting dalam kehidupan sehari-hari kita. Dalam tinjauan pustaka ini, kami akan melihat berbagai aspek dari sistem tenaga listrik, termasuk sumber energi, transmisi dan distribusi, serta isu-isu terkait yang perlu diperhatikan. Melalui pemahaman yang lebih baik tentang sistem tenaga listrik, kita dapat mengidentifikasi tantangan dan peluang dalam membangun sistem tenaga listrik yang lebih efisien, berkelanjutan, dan dapat diandalkan. Pada pusat pembangkit terdapat pembangkit dan trafo penaik tegangan. Generator berfungsi untuk mengubah energi mekanis yang dihasilkan pada poros turbin menjadi energi listrik yang pada umumnya generator membangkitkan daya listrik bertegangan rata – rata 11 kV hingga 25kV. ¹

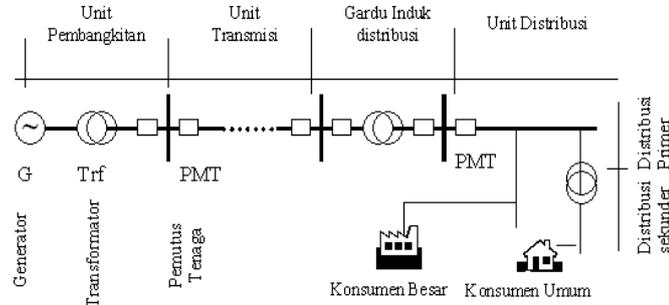
Lalu melalui transformator penaik tegangan energi listrik dinaikkan menjadi 66kV hingga 500kV atau lebih. Pada tegangan transmisi dinaikkan dengan maksud mengurangi jumlah arus yang melewati saluran transmisi sehingga dapat memperkecil kebutuhan luas penampang penghantar yang digunakan. Dengan demikian saluran transmisi bertegangan tinggi akan membawa aliran arus yang lebih rendah dan dapat mengurangi rugi – rugi transmisi.

Tegangan tinggi yang dikirim melewati saluran transmisi akan menuju pusat beban yang kemudian tegangan tersebut akan diturunkan lagi melalui transformator penurun tegangan (*step – down transformer*) yang ada pada gardu induk menjadi tegangan menengah yaitu 20 kV dan terakhir tegangan akan diturunkan lagi pada jaringan distribusi melalui gardu distribusi menjadi tegangan rendah 220/380 V.

¹ WIBOWO, Sigi Syah. *Analisa Sistem Tenaga: Analisa Sistem Tenaga. UPT Percetakan dan Penerbitan Polinema, 2018.*



Dengan menggunakan blok diagram sistem tenaga listrik dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 2.1 Blok Diagram Sistem Tenaga Listrik

2.2 Sistem Jaringan Distribusi

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan salah satu bagian dari suatu sistem tenaga listrik yang dimulai dari PMT yang masuk di Gardu Induk, sampai dengan Alat Penghitung dan Pembatas (APP) dari instalasi konsumen yang berfungsi untuk mengalirkan dan mendistribusikan tenaga listrik dari Gardu Induk menjadi bagai pusat beban ke pelanggan secara langsung atau melalui gardu-gardu distribusi (gardu trafo) dengan mutu yang mencukupi sesuai standar pelayanan yang berlaku. Dengan demikian sistem distribusi ini menjadi suatu sistem tersendiri karena unit distribusi ini memiliki komponen peralatan yang saling berhubungan dalam operasinya untuk mengalirkan tenaga listrik. Dimana sistem adalah perangkat unsur-unsur yang saling ketergantungan yang disusun untuk mencapai suatu tujuan tertentu dengan menampilkan fungsi yang ditetapkan. Sistem jaringan distribusi juga melibatkan berbagai peralatan pengendali, sistem pengukuran, sistem perlindungan, pemeliharaan rutin, serta manajemen operasi yang handal untuk menjaga ketersediaan dan efisiensi penyediaan energi listrik untuk konsumen.²

Adapun bagian jaringan transmisi yang dimana dari pembangkit diubah menjadi tinggi biasanya lebih dari 100kV untuk mengurangi kerugian daya dalam penyaluran dan jaringan transmisi merupakan sistem saluran besar yang menghubungkan antara pembangkit dengan stasiun transformator.

² *Jasa Pendidikan dan Pelatihan, Sistem Distribusi Tenaga Listrik 9. PT. PLN (Persero)*



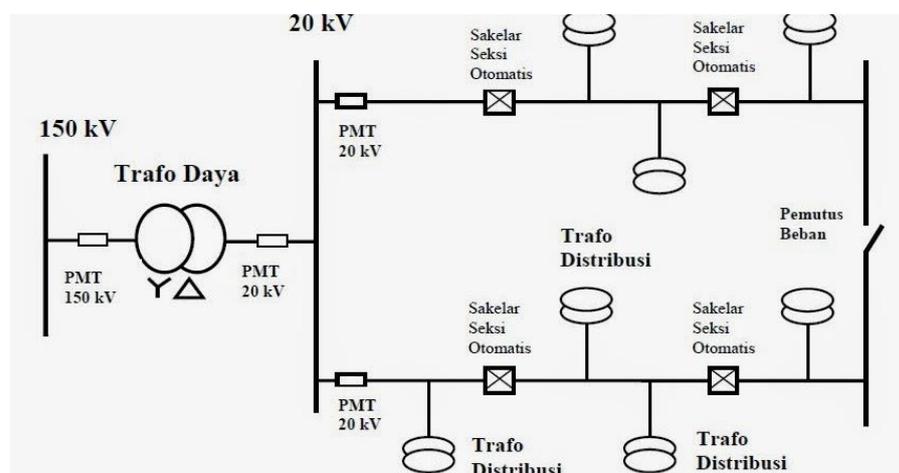
Sistem istribusi ini dibagi menjadi dua bagian yaitu :

A. Distribusi Primer :

Distribusi Primer yaitu jaringan distribusi yang berasal dari jaringan transmisi yang menurunkan tegangannya di Gardu Induk (GI) menjadi Tegangan Menengah (TM) dengan nominal tegangan 20 kV yang biasa disebut JTM (Jaringan Tegangan Menengah) lalu disalurkan ke lokasi pelanggan listrik, kemudian di turunkan tegangannya di trafo pada gardu distribusi untuk disalurkan ke pelanggan. Pada distribusi primer terdapat tiga jenis dasar yaitu Sistem radial, Lup, dan sistem jaringan primer.

B. Distribusi Sekunder :

Distribusi Sekunder yaitu jaringan distribusi dari gardu distribusi untuk di salurkan ke pelanggan dengan klasifikasi tegangan rendah yaitu 220 V atau 380 V (antar fasa). Pelanggan yang memakai tegangan rendah ini adalah pelanggan paling banyak karena daya yang dipakai tidak terlalu banyak. Jaringan dari gardu distribusi dikenal dengan JTR (Jaringan Tegangan Rendah), lalu dari JTR dibagi-bagi untuk ke rumah pelanggan, saluran yang masuk dari JTR ke rumah pelanggan disebut Sambungan Rumah (SR). Pelanggan tegangan ini banyaknya menggunakan listrik satu fasa, walau ada beberapa memakai listrik tiga fasa.



Gambar 2.2 Sistem Jaringan Distribusi



2.3 Gardu Distribusi

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 dari tujuan penggunaannya yang terkadang harus disesuaikan dengan peraturan Pemerintah Daerah setempat.³

Secara garis besar gardu distribusi dibedakan atas :

1. Jenis pemasangannya :
 - Gardu pasangan luar : Gardu Portal, Gardu Cantol
 - Gardu pasangan dalam : Gardu Beton, Gardu Kios
2. Jenis Konstruksinya :
 - Gardu Beton (bangunan sipil : batu, beton)
 - Gardu Tiang : Gardu Portal dan Gardu Cantol
 - Gardu Kios
3. Jenis Penggunaannya :
 - Gardu Pelanggan Umum
 - Gardu Pelanggan Khusus

2.3.1 Gardu Portal

Gardu portal adalah suatu jenis gardu listrik yang digunakan dalam sistem distribusi listrik untuk mengatur aliran daya listrik antara jaringan listrik utama dan jaringan listrik lokal atau daerah tertentu. Gardu portal juga dikenal dengan sebutan substation atau subgardu. Pada umumnya, gardu portal terletak di antara gardu induk (*grid substation*) yang terhubung langsung dengan pembangkit listrik dan gardu distribusi (*distribution substation*) yang mendistribusikan listrik ke konsumen akhir.

³ PLN, P. (2010). *Standar Konstruksi Gardu Distribusi dan Gardu Hubung Tenaga Listrik. PT. PLN (Persero), Jalan Trunajoyo Blok M-1/kebayoran lama, Jakarta Selatan.*



Gambar 2.3 Gardu Portal dan Single Line Diagram

Untuk Gardu Tiang pada sistem jaringan lingkaran terbuka (*open-loop*), seperti pada sistem distribusi dengan saluran kabel bawah tanah, konfigurasi peralatan adalah π section dimana transformator distribusi dapat di catu dari arah berbeda yaitu posisi Incoming – Outgoing atau dapat sebaliknya.

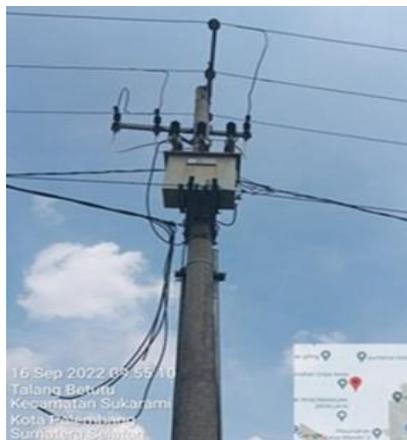
Gunanya untuk mengatasi keterbatasan ruang pada Gardu Portal, penggunaan Ring Main Unit (RMU) sebagai konfigurasi switching/proteksi adalah solusi yang umum digunakan. RMU adalah perangkat kompak yang menggabungkan fungsi pemutus sirkuit (*circuit breaker*), pemisah (*disconnector*), dan proteksi dalam satu unit. Peralatan *switching incoming-outgoing* berupa Pemutus Beban atau **LBS** (*Load Break Switch*) atau Pemutus Beban Otomatis (**PBO**) atau **CB** (*Circuit Breaker*) yang bekerja secara manual (atau digerakkan oleh remote control). Dan adapun *Fault Indicator* (dalam hal ini PMFD : *Pole Mounted Fault Detector*) perlu dipasang pada *section* jaringan dan percabangan untuk memudahkan pencarian titik gangguan, sehingga jaringan yang tidak mengalami gangguan dapat dipulihkan lebih cepat.

2.3.2 Gardu Cantol

Gardu distribusi tipe cantol adalah jenis transformator yang terpasang di tiang listrik atau tiang beton dengan daya ≤ 100 kVA Fase 3 atau Fase 1. Transformator ini terdiri dari komponen seperti transformator distribusi, pemutus sirkuit, sakelar pemutus beban, dan pengukur daya. Desainnya memungkinkan



gardu untuk menggantung pada tiang dengan menggunakan bracket khusus. Fungsinya adalah untuk mendistribusikan listrik dari level tegangan tinggi atau menengah menjadi tegangan rendah yang sesuai untuk digunakan oleh pelanggan, sambil melindungi jaringan dari gangguan dan lonjakan arus yang berlebihan. Perlengkapan perlindungan tambahan LA (*Lightning Arrester*) dipasang terpisah dengan penghantar hubung bagi tegangan rendah (PHB-TR) maksimum 2 jurusan dengan saklar pemisah pada sisi masuk dan pengaman lebur (type NH, NT) sebagai pengaman jurusan.



Gambar 2.4 Gardu Tipe Cantol

2.3.3 Gardu Beton

Gardu distribusi tipe beton ini adalah sebuah transformator dengan peralatan switching atau proteksi dan fasilitasnya menggunakan struktur beton bertulang sebagai konstruksi utamanya. Juga dilengkapi dengan panel listrik yang berfungsi untuk mengatur dan mendistribusikan daya listrik ke saluran-saluran distribusi yang lebih kecil. Panel ini biasanya terpasang di dalam bangunan beton dan dilengkapi dengan peralatan pengaman seperti pemutus sirkuit, pengukur listrik, dan perlindungan kelebihan arus.



Gambar 2.5 Gardu Tipe Beton

2.3.4 Gardu Kios

Gardu distribusi tipe kios adalah trafo dengan bangunan prefabrikasi yang terbuat dari konstruksi baja, fiberglass yang dapat dirakit di lokasi rencana pembangunan gardu distribusi. Ada beberapa jenis konstruksi yaitu, Kios Kompak, Kios Bertingkat, dan Kios Modular. Gardu ini dilengkapi panel distribusi listrik untuk mengatur dan mendistribusikan listrik ke berbagai kios atau toko yang terhubung dengan gardu induk setempat. Gardu induk ini biasanya ditempatkan di area komersial atau pusat perbelanjaan untuk memasok pasokan listrik yang stabil dan terpisah dari pasokan listrik rumah tangga atau bangunan lainnya.



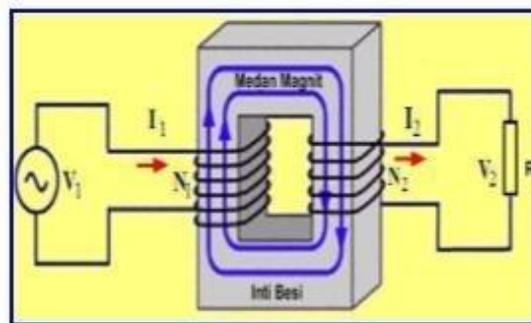
Gambar 2.6 Gardu Tipe Kios



2.4 Transformator⁴

Transformator adalah sebuah perangkat listrik yang digunakan untuk mengubah tegangan AC (arus bolak-balik) dari satu tingkat tegangan ke tingkat tegangan yang lain, Transformator terdiri dari dua atau lebih kumparan kawat yang disusun secara berdampingan dan saling terhubung melalui medan magnet yang dihasilkan oleh aliran arus AC.

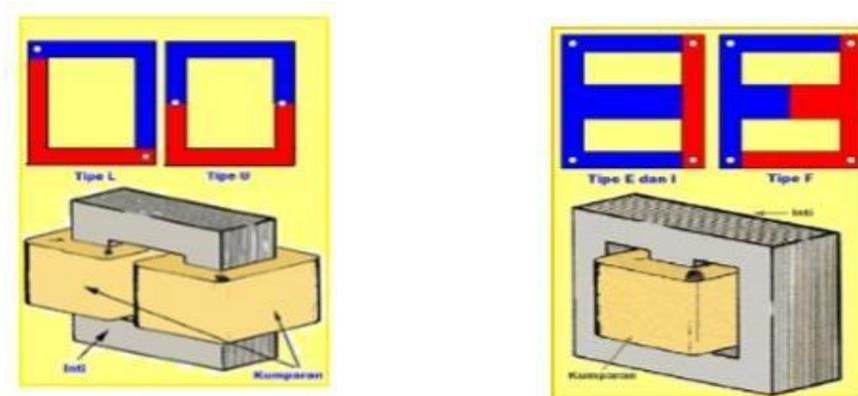
Dalam konstruksinya, transformator terdiri dari dua buah kumparan, yaitu kumparan primer dan sekunder. Ketika kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, maka akan terjadi fluks bolak-balik pada kumparan di sisi primer, kemudian fluks akan mengalir ke inti transformator, kemudian fluks ini akan menyapu kumparan di sisi sekunder yang mana menyebabkan fluks magnet timbul. pada sisi sekunder, sehingga pada sisi sekunder akan terjadi tegangan. Berdasarkan cara melilitkan kumparan pada inti, dikenal dua jenis transformator, yaitu tipe inti (*core type*) dan tipe cangkang (*shell type*).



Gambar 2.7 Fluks Magnet Transformator

Pada transformator tipe cangkang (Gambar 2.7A) kumparan dikelilingi oleh inti, dan pada umumnya intinya berbentuk huruf E dan huruf I, atau huruf F. Untuk membentuk sebuah transformator tipe inti maupun cangkang, inti dari transformator yang berbentuk huruf tersebut disusun secara berlapis – lapis (laminasi), jadi bukan berupa besi pejal.

⁴ Sumardjati, Prih, dkk. 2008. *Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik Jilid 3*. Jakarta : Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan



(a) Tipe Cangkang

(b) Tipe Inti

Gambar 2.8 Tipe-Tipe Transformator

Sedangkan pada transformator tipe inti (Gambar 2.7B) kumparan mengelilingi inti, dan pada umumnya inti transformator L atau U. Peletakkan kumparan pada inti diatur secara berhimpitan antara kumparan primer dengan sekunder. Dengan pertimbangan kompleksitas cara isolasi tegangan pada kumparan, biasanya sisi kumparan tinggi diletakkan di sebelah luar.

Penyusunan inti secara berlapis ini adalah untuk mengurangi kerugian energy akibat “*Eddy Current*” (arus pusar), dengan cara laminasi seperti ini maka ukuran jerat induksi yang berakibat terjadinya rugi energy di dalam inti bias dikurangi. Proses penyusunan inti transformator biasanya dilakukan setelah proses pembuatan lilitan kumparan transformator pada rangka (koker) selesai dilakukan.

2.4.1 Transformator Distribusi⁵

Transformator distribusi adalah perangkat listrik yang digunakan untuk mengubah tegangan listrik dari level tinggi menjadi level yang lebih rendah sehingga dapat didistribusikan kepada konsumen akhir. Fungsi utama transformator distribusi adalah untuk mentransmisikan daya listrik dari sistem transmisi tinggi tegangan ke sistem distribusi rendah tegangan, yang umumnya digunakan untuk rumah, gedung, dan industri kecil. Transformator distribusi yang umum digunakan adalah transformator step- down 20KV/400V.

⁵ Yondri, S., Artono, T., & Sari, H. P. (2013). Pengaruh Penyeimbangan Beban Trafo Distribusi Terhadap Arus Netral. *Elektron: Jurnal Ilmiah*, 5(1), 1-8.



Tegangan fasa ke fasa sistem jaringan tegangan rendah adalah 380 V. Karena terjadi drop tegangan, maka pada rak tegangan rendah dibuat di atas 380 V agar tegangan pada ujung penerima tidak lebih kecil dari 380V.

Transformator distribusi terdiri dari dua kumparan kawat yang saling terhubung oleh inti besi. Kumparan yang terhubung ke sumber daya listrik yang memiliki tegangan tinggi disebut "*kumparan primer*," sementara kumparan yang terhubung ke beban atau pengguna daya listrik disebut "*kumparan sekunder*." Inti besi berfungsi untuk meningkatkan efisiensi transformasi energi dengan mengarahkan aliran medan magnetik antara kumparan primer dan sekunder.

Karena arus yang mengalir merupakan arus bolak-balik, maka fluks yang terbentuk pada inti akan mempunyai arah dan jumlah yang berubah-ubah. Jika arus yang mengalir berbentuk sinusoidal, maka fluks yang terjadi akan berbentuk sinusoidal pula.

Sedangkan frekuensi masing-masing tegangan sama dengan frekuensi sumbernya. Hubungan transformasi tegangan adalah sebagai berikut:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \dots\dots\dots(2.1)$$

Artinya :

E_1 = ggl induksi di sisi primer (volt)

E_2 = ggl induksi di sisi sekunder (volt) N_1

N_1 = jumlah belitan sisi primer (turn)

N_2 = jumlah belitan sisi sekunder (turn)

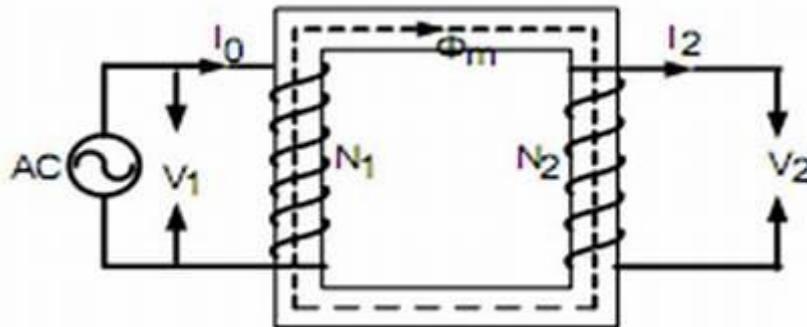
Pada fluks tersebut mengalir melalui inti yang mana pada inti tersebut terdapat belitan primer dan sekunder, maka pada belitan primer dan sekunder tersebut akan timbul ggl (gaya gerak listrik) induksi, tetapi arah ggl induksi primer berlawanan dengan arah ggl induksi sekunder.

2.4.2 Keadaan Transformator Tanpa Beban

Transformator tanpa beban adalah transformator yang tidak terhubung ke beban apapun pada sisi skundernya. Dalam keadaan ini, tegangan dan arus pada sisi skunder transformator sangat rendah atau bahkan nol (*no load current*).



Keadaan transformator tanpa beban, umumnya digunakan untuk berbagai tujuan di industri listrik. Perlu dipastikan bahwa transformator mampu menangi kondisi tanpa beban dalam jangka waktu yang panjang tanpa mengalami overheating tetapi akan mengalami kerugian inti yang disebabkan oleh arus magnetis yang tercipta dalam inti besi transformator.



Gambar 2.9 Transformator Tanpa Beban

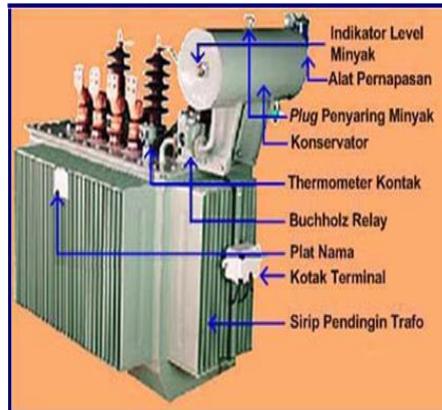
2.4.3 Transformator Daya 3 Fasa

Transformator daya tiga fasa adalah sebuah perangkat listrik yang digunakan untuk mentransformasikan tegangan dan arus listrik sistem tiga fasa. Sistem tiga fasa ini menjadi salah satu cara penyaluran listrik yang paling umum digunakan diseluruh dunia, karena efesiesninya dalam menyalurkan daya besar jarak jauh. Transformator tiga fasa ini memiliki prinsip sama seperti transformator satu fasa, dan perbedaan yang paling mendasarnya ialah pada sistem kelistrikannya, Yang dimana transformator tiga fasa bisa dihubung segitiga, bintang ataupun zig – zag. Transformator tiga fasa ini juga banyak sekali mengurangi berat dan lebar kerangka, sehingga harganya dapat dikurangi jika dibandingkan dengan penggabungan tiga buah transformator satu fasa dengan rating harga daya yang sama.

Transformator daya tiga fasa ini terdiri dari inti besi dari lembaran baja silikon atau baja nikel kegunaannya untuk mengurangi kehilangan energi. Dibagian inti besi ini terdapat tiga kumparan kawat terpisah yang berfungsi sebagai *input* gulungan primer dan *output* gulungan skunder. Masing – masing



kumparan ini memiliki dua akhiran yang dihubungkan ke sumber listrik primer dan beban listrik skunder.



A. Bagian Luar Transformator



B. Bagian Dalam Transformator

Gambar 2.10 Konstruksi Transformator Tiga Fasa

Secara umum sebuah transformator tiga fasa mempunyai konstruksi hampir sama, yang membedakannya adalah alat bantu dan sistem pengamannya, tergantung pada letak pemasangan, sistem pendinginan, pengoperasian, fungsi dan pemakaiannya. Bagian utama, alat bantu, dan sistem pengaman yang ada pada sebuah transformator daya (Gambar 2.9) adalah :

1. Inti Besi Transformator
2. Kumparan Transformator
3. Minyak Transformator
4. Tangki Transformator
5. Konservator Transformator
6. Sistem Pendinginan Transformator
7. Bushing Transformator
8. Alat Pernapasan
9. Tap Changer
10. Radiator
11. Alat Indikator
12. Rele Buchholz
13. Name plate
14. Merek trafo



2.5 Pembebanan Transformator

Dalam proses pembebanan, transformator dapat dihubungkan ke beban seperti peralatan listrik atau sistem distribusi. Beban ini menyebabkan arus mengalir melalui gulungan sekunder transformator. Transformator dirancang untuk menangani beban tertentu sesuai dengan daya nominalnya dan kelebihan pembebanan yang signifikan dapat menyebabkan transformator menjadi panas dan menyebabkan kerusakan atau bahkan kegagalan.⁶

Pembebanan transformator dinyatakan dalam persentase dari kapasitasnya. Kapasitas transformator mengacu pada daya maksimum yang dapat ditransfer tanpa menyebabkan kerusakan pada transformator. Adapun beberapa keadaan pembebanan transformator yaitu :

1. Beban Penuh (*Full Load*), Keadaan beban penuh saat beban maksimum diizinkan oleh transformator terhubung pada sisi sekunder. Pada kondisi ini, transformator mengalirkan arus nominal dan menyediakan daya yang sesuai dengan beban.
2. Beban Berlebih (*Overload*), Keadaan ini terjadi saat beban yang terhubung melebihi kapasitas nominal transformator, yang dimana dapat menyebabkan meningkatnya suhu yang signifikan dan dapat merusak transformator jika tidak cepat diatasi.
3. Beban Kurang (*Underload*), Keadaan ini terjadi saat beban yang terhubung lebih rendah dari kapasitas nominal transformator yang disebabkan ketika beban sebelumnya lebih besar dan transformator tetap terhubung.

2.5.1 Perhitungan Arus Beban Penuh dan Persentase Transformator

Untuk menentukan daya transformator bila dilihat dari sisi tegangan tinggi (primer) dapat menggunakan rumus sebagai berikut :

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \dots\dots\dots(2.2)$$

Artinya :

⁶ Syaroni, Z., & Rijanto, T. (2019). Analisis Ketidakseimbangan Beban Transformator Distribusi 20 kV dan Solusinya Pada Jaringan Tegangan Rendah. *Jurnal Teknik Elektro*, 8(1).



S = Daya Transformator (kVA)

V = Tegangan Sisi Primer Transformator (kV)

I = Arus Jala-Jala (A)

Sehingga untuk dapat menghitung arus beban penuh dapat menggunakan rumus :

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V} \dots \dots \dots (2.3)$$

Artinya :

I_{FL} = Arus beban penuh (A)

S = Daya transformator (kVA)

V = Tegangan sisi skunder transformator (kV)

Untuk menentukan perhitungan arus rata-rata beban pada transformator dapat menggunakan rumus seperti berikut :

$$I_{rata - rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \dots \dots \dots (2.4)$$

Nilai persentase pada pembebanan transformator juga dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\% \text{ Beban Trafo} = \frac{I_{rata-rata}}{2a} \times 100\% \dots \dots \dots (2.5)$$

Artinya :

$I_{rata - rata \text{ beban}}$ = Arus Rata – Rata Beban digunakan

$I_{\text{beban penuh transformator}}$ = Arus Beban Penuh terhadap Transformator

2.6 Ketidakseimbangan Beban⁷

Ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi terjadi ketika beban listrik yang dihubungkan ke transformator tidak terbagi secara merata antara tiga fasa (R-S-T), yang dimana keadaan salah satu syarat yang tidak seimbang serta tidak terpenuhi yaitu :

1. Ketiga vektor sama besar tapi tidak membentuk sudut 120° satu dengan yang lain
2. Ketiga vektor tidak sama besar, tapi membentuk sudut 120° satu dengan

⁷ Latupeirissa, H. L. (2017). Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses Daya Pada Trafo Distribusi. *Jurnal Simetrik*, 7(2).



yang lain

3. Ketiga vektor tidak sama besar, tapi tidak membentuk sudut 120° satu dengan yang lain .

Pada keadaan beban yang seimbang adalah suatu keadaan dimana ketika tegangan sama besar dan ketiga vektor saling membentuk sudut 120° satu sama lain. Dalam keadaan seimbang juga besarnya fasa sama dengan besarnya arus rata-rata, sehingga koefisien A,B,C bisa didapat dengan menggunakan rumus :

$$a \cdot I_R = a \cdot I_{\text{rata-rata}} \quad \text{maka : } a = \frac{I_r}{I_{\text{rata-rata}}}$$

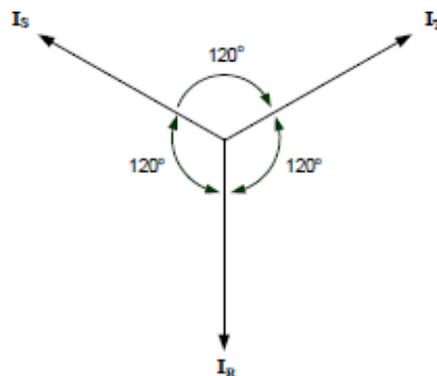
$$b \cdot I_S = b \cdot I_{\text{rata-rata}} \quad \text{maka : } b = \frac{I_s}{I_{\text{rata-rata}}}$$

$$c \cdot I_T = c \cdot I_{\text{rata-rata}} \quad \text{maka : } c = \frac{I_T}{I_{\text{rata-rata}}}$$

Pada keadaan yang seimbang, besarnya nilai koefisien a,b dan c adalah 1. Dengan itu, rata – rata ketidakseimbangan beban dalam (%) bisa didapat dengan persamaan :

$$\% \text{ Ketidakseimbangan} = \frac{(|a-1|+|b-1|+|c-1|)}{3} \times 100\% \dots \dots \dots (2.6)$$

Untuk penjelasan lebih terperinci dapat dilihat pada gambar vektor diagram arus seperti berikut :



Gambar 2.11 Vektor Diagram Arus Dalam Keadaan Seimbang

Pada gambar 2.9 menunjukkan bahwa vektor diagram arus dalam keadaan seimbang, dengan panjang vektor yang mewakili arus pada setiap elemen. Masing-masing nilai pada ketiga vektor arus diatas apabila dijumlahkan akan



bernilai nol, dan keadaannya tidak akan memunculkan arus netral (I_N). Dimana arus yang berlaku pada hubungan Y adalah :

$$I_R = \frac{V \angle 0^\circ}{Z \angle \theta} = I \angle -\theta$$

$$I_S = \frac{V \angle -120^\circ}{Z \angle \theta} = I \angle -120^\circ - \theta$$

$$I_T = \frac{V \angle -240^\circ}{Z \angle \theta} = I \angle -240^\circ - \theta$$

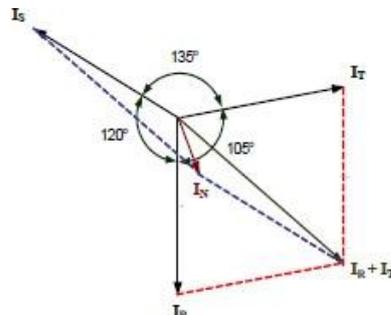
Disubstitusikan ke persamaan :

$$I_N = I_R + I_S + I_T \dots\dots\dots(2.7)$$

$$= I \angle -\theta + I \angle -120^\circ - \theta + I \angle -240^\circ - \theta$$

$$= I \cos(-\theta) + jI \sin(-\theta) + I \cos(-\theta - 120^\circ) + jI \sin(-\theta - 120^\circ) + I \cos(-\theta - 240^\circ) + jI \sin(-\theta - 240^\circ)$$

$$= I [\cos(-\theta) + \cos(-\theta - 120^\circ) + \cos(-\theta - 240^\circ)] + jI [\sin(-\theta) + \sin(-\theta - 120^\circ) + \sin(-\theta - 240^\circ)]$$



Gambar 2.12 Vektor Diagram Arus Dalam Keadaan Tidak Seimbang

Sedangkan pada gambar 2.10 menunjukkan bahwa vektor diagram arus dalam keadaan tidak seimbang, terjadi ketika arus dalam suatu rangkaian tidak memenuhi persyaratan keadaan seimbang, yang biasanya terjadi dalam sistem tiga fasa. Adapun alasan mengapa vektor diagram arus bisa tidak seimbang, di antaranya yaitu perbedaan beban antara fasa-fasa yang dimana, jika beban yang terhubung pada masing-masing fasa tidak sama, maka arus pada setiap fasa akan berbeda. Hal ini akan menyebabkan pergeseran sudut antara vektor arus pada setiap fasa dan membuat diagram vektor tidak seimbang.



2.7 Arus Netral

Beban dikatakan seimbang jika pada masing-masing fasa mengalir arus yang sama besarnya. Namun pada kenyataannya selalu ada ketidakseimbangan sehingga arusnya pun tidak seimbang. Pemakaian atau pengoperasian beban tidak selalu pada waktu yang bersamaan pada sistem distribusi tiga fasa empat kawat maka seringkali terjadi ketidakseimbangan pada fasa-fasanya.

Akibatnya timbul arus balik yang mengalir pada konduktor netral ke sumber yang kita kenal dengan arus netral berikut persamaannya :

2.8 Rugi Akibat Adanya Arus Pada Penghantar Netral Transformator⁸

Ketika transformator beroperasi, ada beberapa kerugian yang terjadi akibat adanya arus pada penghantar netral biasanya pada penghantar sekunder yang dapat disebabkan beberapa faktor.

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

$$P_N = I_N^2 + R_N \dots\dots\dots(2.8)$$

Artinya :

P_N = Rugi – rugi pada penghantar netral transformator (Watt)

I_N = Arus pada penghantar netral (A)

R_N = Tahanan penghantar netral (Ohm)

2.9 Prosedur Perhitungan

Dalam menghitung rugi daya akibat arus yang mengalir pada netral, adapun tahapan prosedur perhitungan yang dilakukan secara bertahap, dapat dilihat sebagai berikut :

1. Mengumpulkan data hasil pengukuran gardu distribusi PC0051.
2. Masukkan nilai tegangan pada fasa R-S-T serta kapasitas transformator

⁸ Lestari, R. D., & Umar, S. T. (2020). *Analisis pengaruh ketidakseimbangan beban transformator 3 phase terhadap susut daya pada jaringan distribusi pt. pln (persero) ulp manahan (Doctoral dissertation, Universitas Muhammadiyah Surakarta).*



- agar dapat menentukan persentase pembebanan transformator distribusi.
3. Menghitung persentase pembebanan transformator distribusi pada setiap fasa dan menghitung ketidakseimbangannya.
 4. Menghitung arus netral yang mengalir pada transformator distribusi akibat beban tidak seimbang.
 5. Setelah didapat nilai arus pada netral, langkah selanjutnya masukkan nilai c arus pada netral dan tahanan penghantar netral untuk menentukan rugi daya akibat arus yang mengalir pada netral.
 6. Lakukan perhitungan rugi daya akibat arus yang mengalir pada netral.
 7. Jika rugi daya belum didapatkan maka kembali pada tahap sebelumnya, jika rugi daya sudah didapatkan maka lanjut pada tahap berikutnya.
 8. Tahapan prosedur perhitungan selesai.

2.10 Rugi-Rugi Transformator⁹

Pada saat energi listrik yang masuk ke transformator tidak akan sama dengan energi listrik yang akan dikeluarkan dari transformator. Hal tersebut disebabkan adanya rugi-rugi yaitu adanya arus yang hilang saat melewati trafo tersebut. Rugi-rugi tersebut dapat dibagi menjadi dua, yaitu rugi inti dan rugi tembaga.

Ketika kondisi beban nol atau tidak berbeban, rugi - rugi yang didapat hanya rugi inti saja. Perubahan beban tidak mempengaruhi rugi inti, besarnya rugi inti ketika dari beban nol sampai beban penuh nilainya akan terus sama. Rugi – rugi transformator terdapat dua jenis, yaitu :

2.10.1 Rugi Besi (P_i)

Rugi inti pada transformator dibagi atas dua bagian, yaitu rugi hysteresis dan arus eddy yang dapat diukur melalui percobaan tanpa beban, yang dimana pada saat tanpa beban rugi hysteresis yaitu rugi yang disebabkan oleh fluks bolak-balik pada inti besi. Sedangkan rugi arus eddy, yaitu rugi yang disebabkan oleh

⁹ Elnizar, H., Gusmedi, H., & Zebua, O. (2021). Analisis Rugi-Rugi (Losses) Transformator Daya 150/20 KV di PT. PLN (Persero) Gardu Induk Sutami ULTG Tarahan. *Electrician: Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, 15(2), 116-126.



arus pusar pada inti besi. Upaya untuk mengurangi rugi besi umumnya melibatkan pemilahan bahan inti besi yang memiliki histerisis rendah dan menggunakan lapisan – lapisan tipis yang dapat mengurangi konduktivitas, sehingga dengan mengurangi rugi besi maka efisiensi transformator dapat ditingkatkan.

2.10.2 Rugi Tembaga (P_{cu})

Rugi-rugi yang disebabkan oleh arus yang mengalir pada kawat tembaga. Rugi-rugi tembaga akan berbanding lurus dengan besarnya beban sehingga meningkatnya arus beban maka akan meningkat juga rugi-rugi tembaganya. Rugi tembaga memiliki dampak yang negatif pada efisiensi transformator dikarenakan energi yang hilang dalam bentuk panas tidak dapat digunakan untuk keperluan penyaluran daya dari input ke output transformator. Untuk meminimalkan rugi tembaga pentingnya memperhatikan kualitas isolasi kumparan tembaga dan penggunaan bahan tembaga yang berkualitas tinggi agar dapat membantu mengurangi rugi tembaga dalam transformator.

2.11 Beban Listrik¹⁰

Beban listrik mengacu pada jumlah daya listrik yang dikonsumsi oleh suatu sistem atau peralatan listrik. Ini dapat merujuk pada beban listrik keseluruhan suatu bangunan, peralatan tertentu, atau bahkan jaringan listrik secara keseluruhan. Beban listrik diukur dalam unit watt (W) atau kilowatt (kW), yang mewakili jumlah energi listrik yang dikonsumsi per detik.

Dalam sistem distribusi tenaga listrik, beban listrik dapat dikelompokkan menjadi dua macam yaitu beban linear dan beban non-linear. Perbedaan antara keduanya terletak pada karakteristik responsifitasnya terhadap tegangan listrik.

Yang dimaksud Beban linear ialah jenis beban yang memiliki karakteristik responsifitas terhadap tegangan listrik yang linier atau proporsional. Artinya, ketika tegangan listrik berubah, arus listrik yang mengalir melalui beban linear

¹⁰ Wijaya, Praha Yuda. 2022. *Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Transformator Pada Gardu Distribusi PC0031 Penyulang Timbang PT PLN (Persero) ULP Sukarami*. Laporan Akhir Tidak Dipublikasikan. Palembang : Politeknik Negeri Sriwijaya.



akan berubah secara proporsional. Contoh beban linear termasuk lampu pijar, pemanas resistif, dan motor DC.

Sedangkan yang dimaksud Beban non linear ialah Beban non-linear adalah jenis beban yang memiliki karakteristik responsifitas terhadap tegangan listrik yang tidak linier atau tidak proporsional. Ketika tegangan listrik berubah, arus listrik yang mengalir melalui beban non-linear tidak berubah secara proporsional. Beban non-linear seringkali menghasilkan distorsi harmonik pada sistem distribusi tenaga listrik. Contoh beban non-linear meliputi peralatan elektronik seperti komputer, televisi, sistem audio, dan lampu dengan transformator elektronik.

2.11.1 Karakteristik Beban Listrik¹¹

Dalam sistem listrik arus bolak – balik (AC) Karakteristik beban listrik dapat disignifikasikan menjadi tiga macam yaitu :

a. Beban Resistif :

Jenis beban yang mengalirkan arus sejalan dengan tegangan yang diberikan tanpa adanya fasa antar arus dan tegangan. Adapun komponen yang terdiri hanya ohm (resistansi) dimana nilai resistansinya bersifat tetap konstan, seperti elemen pemanas listrik dan lampu pijar,

b. Beban Induktif :

Jenis beban yang memiliki sifat induktansi, dimana menyerap daya aktif dan daya rekatif. Beban ini dapat menyebabkan adanya pergeseran fasa antara tegangan dan arusnya. Arus dibeban induktif akan tertinggal dibandingkan tegangan. Hal ini dikarenakan adanya energi yang tersimpan berupa medan magnetis.

c. Beban Kapasitif :

Jenis beban ini dapat arusnya mendahului tegangan yang dimana dapat menyebabkan faktor daya menjadi positif. Beban ini mempunyai kemampuan menyimpan energi yang berasal dari pengisian elektrik pada

¹¹ Jurnal, R. T. (2015). ANALISIS PENGARUH JENIS BEBAN LISTRIK TERHADAP KINERJA PEMUTUS DAYA LISTRIK DI GEDUNG CYBER JAKARTA: Jumadi, Juara Mangapul Tambunan. *Energi & Kelistrikan*, 7(2), 108-117.



suatu sirkuit dan beban ini juga dapat digunakan untuk memperbaiki faktor daya sistem jika terdapat banyak beban induktif.

2.12 Penghantar

Penghantar adalah material yang memiliki tingkat konduktivitas tinggi, yang berarti elektron dapat bergerak secara bebas di dalamnya dengan mudah. Dikarenakan sifatnya yang konduktif maka disebut konduktor. Kemampuan suatu materialnya untuk menghantarkan arus listrik yang tergantung pada sifat elektron dalam struktur atomik dan kristalnya. Adapun material penghantar yang digunakan dalam teknologi listrik yaitu berupa tembaga, perak, emas, aluminium, zink, dan besi.

Yang menjadi media untuk menghantarkan arus listrik ialah kabel listrik. Beban dari kabel ini berbagai macam, khusus sebagai penghantar arus listrik pada umumnya terbuat dari tembaga dan dilapisi dengan pelindung. Secara garis besar, berdasarkan ada atau tidaknya isolasi penghantar dibedakan menjadi dua macam, yaitu penghantar berisolasi dan penghantar tanpa isolasi.

Untuk kabelnya dibedakan menjadi 3 macam berdasarkan masing – masing penggunaannya yaitu, kabel fleksibel, kabel instalasi dan kabel tanah. Untuk jenis konduktor SUTM yang umumnya dipakai adalah AAAC (*All Aluminium Alloy Conductor*), dengan campuran aluminium, silicium (0,4% - 0,7%), magnesium (0,3% - 0,35%) dan ferum (0,2% - 0.3%).

Dan untuk SUTR memakai *twisted cable* atau biasa disebut kabel pilin udara yang dimana suatu kabel itu memiliki inti AAC berisolasi XLPE (*Cross Linked Polythylene*), dilengkapi dengan kawat netral AAAC sebagai penggantung.

2.13 Pengukuran Arus dan Tegangan Pada Transformator Distribusi

Transformator distribusi adalah perangkat yang digunakan untuk mentransformasikan tegangan listrik dari tingkat tegangan yang lebih tinggi menjadi tingkat tegangan yang lebih rendah untuk distribusi listrik kepada konsumen. Pengukuran arus dan tegangan pada transformator distribusi sangat penting untuk memastikan kinerja yang baik dan keamanan sistem. Pada



pengukuran listrik dapat dibedakan dua hal, yaitu Pengukuran besaran listrik, seperti arus (*Ampere*), tegangan (*Volt*), daya listrik (*Watt*), dan pengukuran besaran nonlistrik, seperti suhu, kuat cahaya, tekanan, dll.

Untuk pengukuran arus pada transformator distribusi dapat dilakukan menggunakan alat pengukur arus yang sesuai, seperti klem amperemeter (*current clamp*) yang melingkari salah satu konduktor yang membawa arus. Dalam beberapa transformator, arus dapat diukur melalui sensor arus (*current sensor*) yang terpasang di dalam transformator.

Sedangkan Pengukuran tegangan pada transformator distribusi dilakukan untuk memantau tegangan input (*primer*) dan output (*sekunder*) dari transformator. Tegangan pada lilitan primer biasanya lebih tinggi dari tegangan lilitan sekunder.