



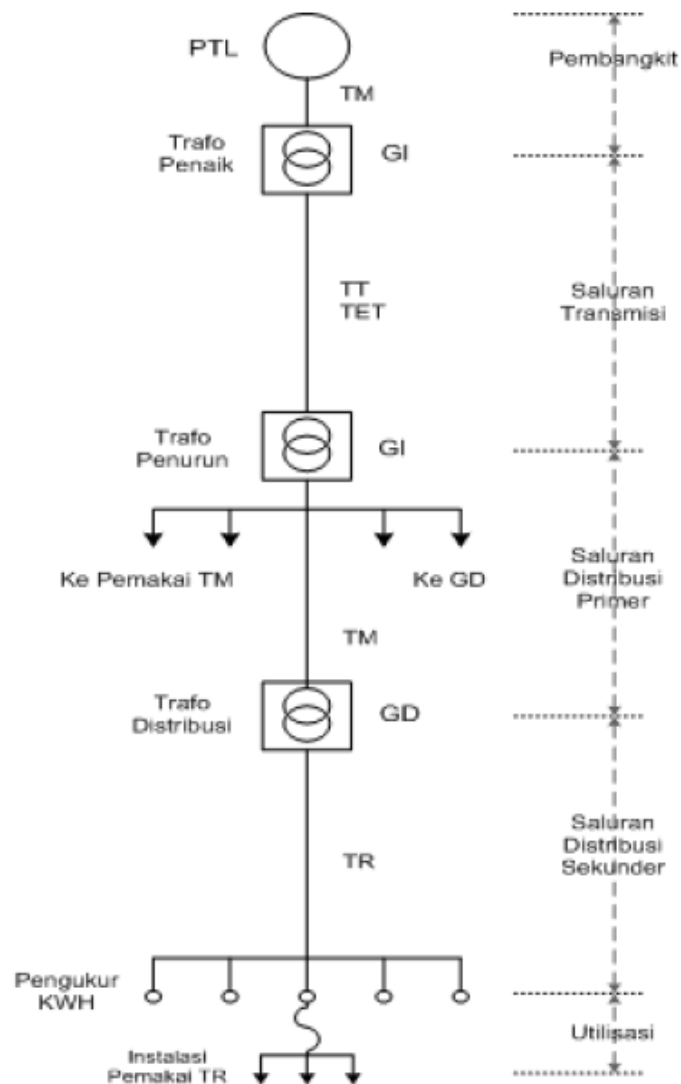
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Deskripsi Sistem Tenaga Listrik¹

Sekalipun tidak terdapat suatu sistem tenaga listrik yang “tipikal”, namun pada umumnya dapat dikembalikan batasan pada suatu sistem yang lengkap mengandung empat unsur.

Pertama, adanya suatu unsur pembangkit tenaga listrik. Tegangan yang dihasilkan oleh pusat tenaga listrik itu biasanya merupakan tegangan menengah (TM). Kedua, suatu sistem transmisi, lengkap dengan gardu induk. Karena jaraknya yang biasanya jauh, maka diperlukan penggunaan tegangan tinggi (TT), atau tegangan ekstra tinggi (TET). Ketiga, adanya saluran distribusi, yang biasanya terdiri atas saluran distribusi primer dengan tegangan menengah (TM) dan saluran distribusi sekunder dengan tegangan rendah (TR). Keempat, adanya unsur pemakaian atau utilisasi, yang terdiri atas instalasi pemakaian tenaga listrik. Instalasi rumah tangga biasanya memakai tegangan rendah, sedangkan pemakai besar seperti industri mempergunakan tegangan menengah ataupun tegangan tinggi. Gambar 2.1. memperlihatkan skema suatu sistem tenaga listrik. Perlu dikemukakan bahwa suatu sistem dapat terdiri atas beberapa subsistem yang saling berhubungan, atau yang biasa disebut sebagai sistem interkoneksi. Kiranya jelas bahwa arah mengalirnya energi listrik berawal dari Pusat Tenaga Listrik melalui saluran-saluran transmisi dan distribusi dan sampai pada instalasi pemakai yang merupakan unsur utilisasi.

¹ Abdul Kadir, *Distribusi dan Utilisasi Tenaga Listrik*, (Jakarta : UI Press, 2000), Hlm. 3



Gambar 2. 1 Sistem tenaga listrik

Keterangan:

PTL : Pembangkit Tenaga Listrik

TM : Tegangan Menengah

GI : Gardu Induk

GD : Gardu Distribusi

TT : Tegangan Tinggi

TR : Tegangan Rendah

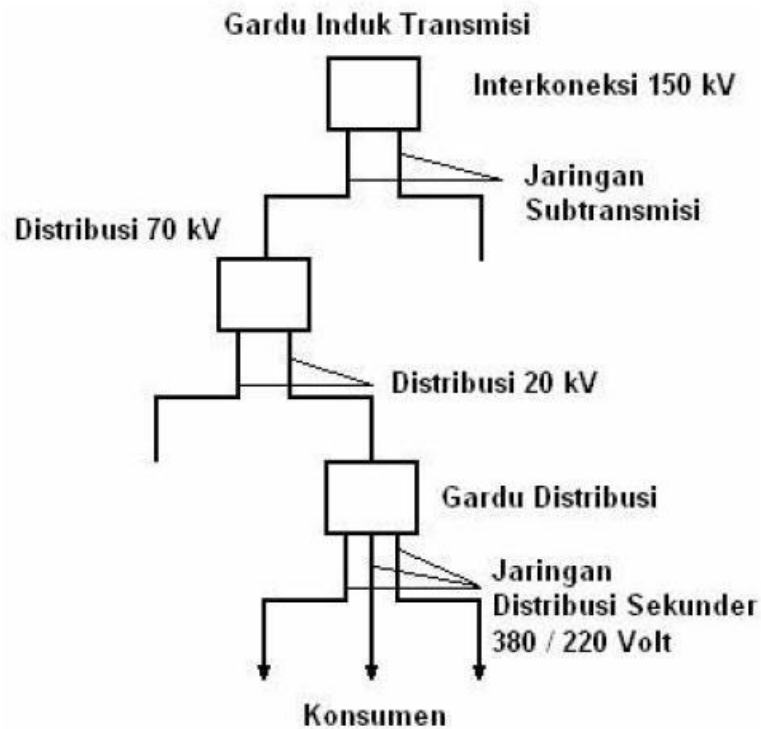
TET : Tegangan Ekstra Tinggi



2.2. Jaringan Distribusi

Jaringan distribusi terdiri atas dua bagian, yang pertama adalah jaringan tegangan menengah/primer (JTM), yang menyalurkan daya listrik dari gardu induk subtransmisi ke gardu distribusi, jaringan distribusi primer menggunakan tiga kawat atau empat kawat untuk tiga fasa. Jaringan yang kedua adalah jaringan tegangan rendah (JTR), yang menyalurkan daya listrik dari gardu distribusi ke konsumen, dimana sebelumnya tegangan tersebut ditransformasikan oleh transformator distribusi dari 20 kV menjadi 380/220 Volt, jaringan ini dikenal pula dengan jaringan distribusi sekunder.

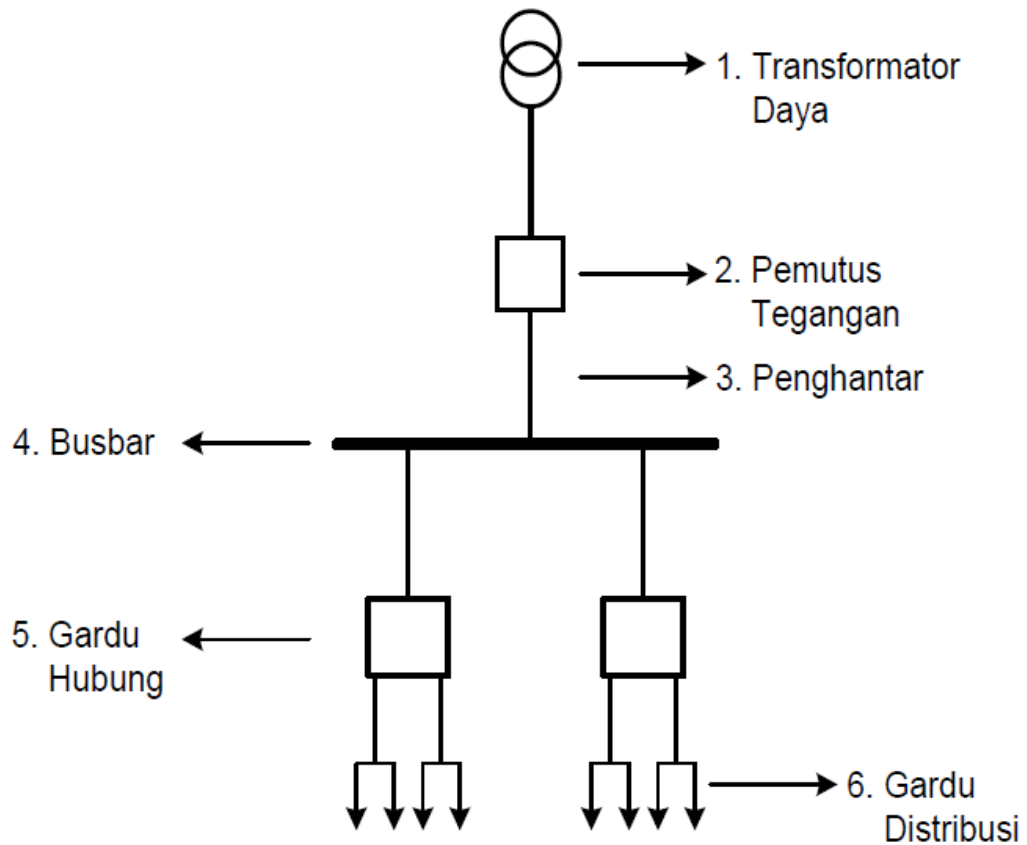
Jaringan distribusi sekunder terletak antara transformator distribusi dan sambungan pelayanan (beban) menggunakan penghantar udara terbuka atau kabel dengan sistem tiga fasa empat kawat (tiga kawat fasa dan satu kawat netral). Dapat kita lihat gambar dibawah proses penyediaan tenaga listrik bagi para konsumen.



Gambar 2. 2 Diagram sistem jaringan distribusi tenaga listrik

2.2.1. Jaringan sistem distribusi primer

Sistem distribusi primer digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk distribusi ke pusat beban. Sistem ini dapat menggunakan saluran udara, kabel udara, maupun kabel tanah sesuai dengan tingkat keandalan yang diinginkan dan kondisi serta situasi lingkungan. Saluran distribusi ini direntangkan sepanjang daerah yang akan di suplay tenaga listrik sampai ke pusat beban. Terdapat bermacam-macam bentuk rangkaian jaringan distribusi primer. Berikut adalah gambar bagian-bagian distribusi primer secara umum.



Gambar 2. 3 Bagian-bagian sistem distribusi primer

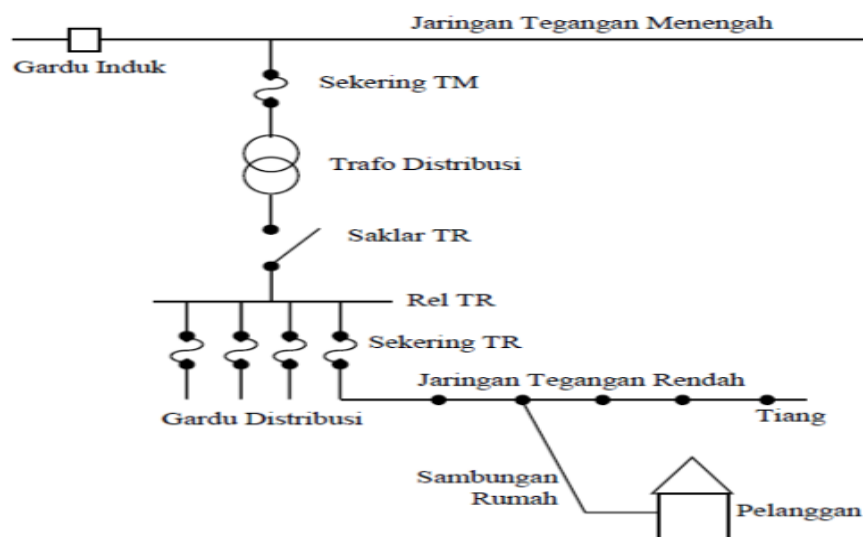
Bagian-bagian sistem distribusi primer terdiri dari :

1. Transformator daya, berfungsi untuk menurunkan tegangan dari tegangan tinggi ke tegangan menengah atau sebaliknya.
2. Pemutus tegangan, berfungsi sebagai pengaman yaitu pemutus daya
3. Penghantar, berfungsi sebagai penghubung daya
4. Busbar, berfungsi sebagai titik pertemuan / hubungan antara trafo daya dengan peralatan lainnya

5. Gardu hubung, berfungsi menyalurkan daya ke gardu-gardu distribusi tanpa mengubah tegangan.
6. Gardu distribusi, berfungsi untuk menurunkan tegangan menengah menjadi tegangan rendah.

2.2.2. Jaringan sistem distribusi sekunder

Sistem distribusi sekunder seperti pada Gambar 2.4 merupakan salah satu bagian dalam sistem distribusi, yaitu mulai dari gardu trafo sampai pada pemakai akhir atau konsumen.



Gambar 2. 4 Hubungan tegangan menengah ke tegangan rendah dan konsumen

Sistem distribusi sekunder digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu distribusi ke beban-beban yang ada di konsumen. Pada sistem distribusi sekunder bentuk saluran yang paling banyak digunakan ialah sistem radial. Sistem ini dapat menggunakan kabel yang berisolasi maupun konduktor tanpa isolasi.

Melihat letaknya, sistem distribusi ini merupakan bagian yang langsung berhubungan dengan konsumen, jadi sistem ini berfungsi menerima daya listrik dari



sumber daya (trafo distribusi), juga akan mengirimkan serta mendistribusikan daya tersebut ke konsumen. mengingat bagian ini berhubungan langsung dengan konsumen, maka kualitas listrik selayaknya harus sangat diperhatikan.

Sistem penyaluran daya listrik pada Jaringan Tegangan Rendah dapat dibedakan menjadi dua yaitu sebagai berikut :

1. Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR) Jenis penghantar yang dipakai adalah kabel telanjang (tanpa isolasi) seperti kabel AAAC, kabel ACSR.
2. Saluran Kabel Udara Tegangan Rendah (SKUTR) Jenis penghantar yang dipakai adalah kabel berisolasi seperti kabel LVTC (Low Voltage Twisted Cable). ukuran kabel LVTC adalah : 2x10mm², 2x16mm², 4x25mm², 3x35mm², 3x50mm², 3x70mm².

Menurut SPLN No.3 Tahun 1987, jaringan tegangan rendah adalah jaringan tegangan rendah yang mencakup seluruh bagian jaringan beserta perlengkapannya, dari sumber penyaluran tegangan rendah sampai dengan alat pembatas/pengukur. Sedangkan STR (Saluran Tegangan Rendah) ialah bagian JTR tidak termasuk sambungan pelayanan (bagian yang menghubungkan STR dengan alat pembatas/pengukur).

2.3. Gardu Distribusi²

Pengertian umum Gardu Distribusi tenaga listrik yang paling dikenal adalah suatu bangunan gardu listrik berisi atau terdiri dari instalasi Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Menengah (PHB-TM), Transformator Distribusi (TD) dan Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Rendah (PHB-TR) untuk memasok kebutuhan tenaga listrik bagi para pelanggan baik dengan Tegangan Menengah (TM 20 kV) maupun Tegangan Rendah (TR 220/380V).

² PT.PLN (Persero), *Buku 4 Standar Konstruksi Gardu Distribusi dan Gardu Hubung Tenaga Listrik*, Jakarta, 2010. Hal.1



Konstruksi Gardu distribusi dirancang berdasarkan optimalisasi biaya terhadap maksud dan tujuan penggunaannya yang kadang kala harus disesuaikan dengan peraturan Pemerintah daerah (Pemda) setempat.

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

Khusus pengertian Gardu Hubung adalah gardu yang ditujukan untuk memudahkan manuver pembebanan dari satu penyulang ke penyulang lain yang dapat dilengkapi/tidak dilengkapi RTU (*Remote Terminal Unit*). Untuk fasilitas ini lazimnya dilengkapi fasilitas DC Supply dari Trafo Distribusi pemakaian sendiri atau Trafo distribusi untuk umum yang diletakkan dalam satu kesatuan.

2.4. Transformator³

Transformator merupakan suatu peralatan listrik elektromagnetik statis yang berfungsi untuk memindahkan dan mengubah daya listrik dari suatu rangkaian listrik ke rangkaian listrik lainnya, dengan frekuensi yang sama dan perbandingan transformasi tertentu melalui suatu gandengan magnet dan bekerja berdasarkan

³Zuhal, Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya (Jakarta: PT Gramedia, 1988, cetakan 2016), hlm. 43-47



prinsip induksi elektromagnetis, dimana perbandingan tegangan antara sisi primer dan sisi sekunder berbanding lurus dengan perbandingan jumlah lilitan dan berbanding terbalik dengan perbandingan arusnya.

Dalam bidang teknik listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi:

1. Transformator daya
2. Transformator distribusi
3. Transformator pengukuran (terdiri dari transformator arus dan transformator tegangan).

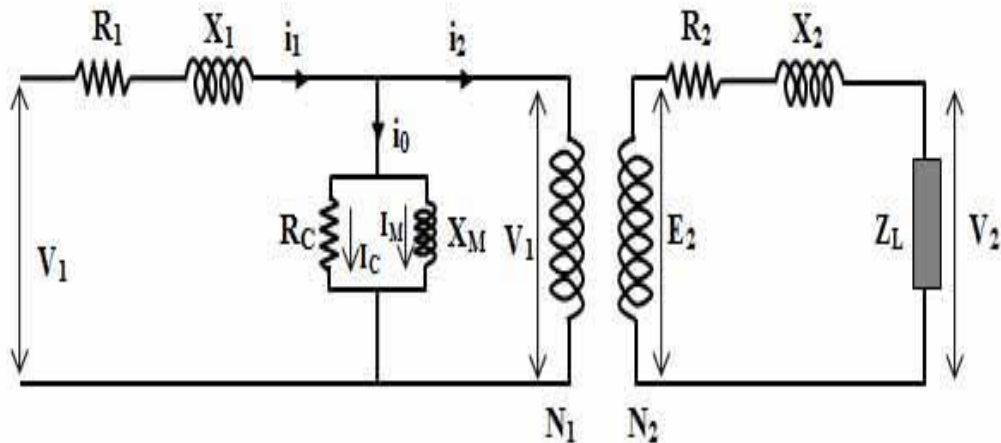
2.4.1. Prinsip kerja transformator

Apabila kumparan primer dihubungkan dengan sumber, maka akan mengalir arus bolak-balik I_1 pada kumparan tersebut. Arus I_1 akan menimbulkan fluks magnet yang berubah-ubah pada inti. Dengan adanya fluks magnet yang berubah-ubah, pada kumparan akan timbul gaya gerak listrik (GGL) induksi e_p .⁴ Daya listrik dari kumparan primer ke kumparan sekunder dengan perantara garis gaya magnet atau fluks magnet (Φ) yang dibangkitkan oleh aliran listrik yang mengalir melalui kumparan primer. Untuk dapat membangkitkan tegangan listrik pada kumparan sekunder, fluks magnet yang dibangkitkan oleh kumparan primer harus berubah-ubah. Untuk memenuhi hal ini, aliran listrik yang mengalir melalui kumparan primer haruslah aliran listrik arus bolak-balik (AC). Saat kumparan primer ke sumber listrik AC, pada kumparan primer timbul gaya gerak magnet bersama yang bolak-balik juga. Dengan adanya gaya gerak magnet ini, di sekitar kumparan primer timbul fluks magnet bersama yang juga bolak-balik. Adanya fluks magnet bersama ini, pada ujung-ujung kumparan sekunder timbul gaya gerak listrik sekunder yang mungkin sama, lebih tinggi, atau lebih rendah dari gaya gerak listrik primer. Hal ini tergantung pada perbandingan transformasi kumparan transformator tersebut.

⁴ Sumanto, Teori Transformator (Yogyakarta: ANDI, 1996), hlm. 2-4

2.4.2. Rangkaian ekivalen⁵

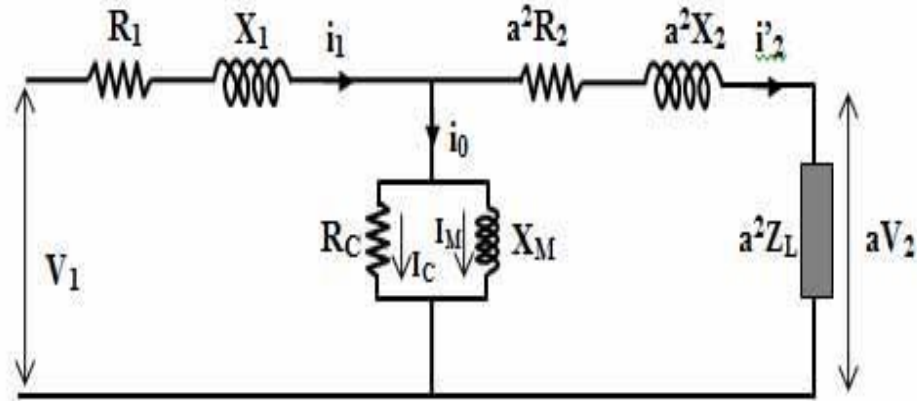
Transformator dapat dimodelkan dengan rangkaian elektrik ekivalen. Gambar rangkaian ekivalen sebuah transformator dapat dilihat pada Gambar 2.5



Gambar 2. 5 Rangkaian ekivalen transformator

Dari rangkaian transformator ideal di atas, apabila semua nilai parameter sekunder dinyatakan pada sisi rangkaian primer, harganya perlu dikalikan dengan faktor a^2 . Berikut model rangkaian ekivalen sebuah transformator jika dilihat dari sisi primer.

⁵ Zuhail, op.cit, hlm. 47-49



Gambar 2. 6 Rangkaian ekivalen transformator dilihat dari sisi primer

Keterangan :

I_1 = Arus pada sisi primer (A)

I_2 = Arus pada sisi sekunder (A)

V_1 = Tegangan pada sisi primer (V)

V_2 = Tegangan pada sisi sekunder (V)

R_1 = Hambatan pada sisi primer (Ω)

R_2 = Hambatan pada sisi sekunder (Ω)

X_1 = Reaktansi pada sisi primer (Ω)

X_2 = Reaktansi pada sisi sekunder (Ω)

I_c = Arus pada inti besi (A)

X_M = Reaktansi pemagnetan (Ω)

I_M = Arus pemagnetan (A)

R_c = Hambatan inti besi (Ω)

2.5. Transformator Distibusi⁶

Transformator distribusi adalah suatu peralatan listrik utama yang berperan penting untuk penyaluran daya listrik dalam suatu sistem distribusi, yang berfungsi untuk menurunkan tegangan distribusi primer yang merupakan tegangan menengah menjadi tegangan rendah pada sisi sekunder. Transformator distribusi yang umum digunakan adalah transformator *step down* 20/0.4 kV, tegangan phasa-phasa sistem JTR adalah 380 V, karena terjadi *drop voltage* maka tegangan rak TR dibuat diatas

⁶ Achmad Budiman, Andi Munair, "Analisa Beban Transformator Distribusi 3 Phasa Pada Penyulang 1 PT. PLN (Persero) ULK Tarakan", Jurnal Elektriika Borneo, Vol. 4 No.2, 2018, hlm. 17.



380 V agar tegangan pada ujung beban menjadi 380 V. Pada kumparan primer akan mengalir arus jika kumparan primer di hubungkan ke sumber listrik bolak-balik, sehingga pada inti transformator yang terbuat dari bahan feromagnet akan terbentuk sejumlah garis-garis gaya magnet (fluks). Karena arus yang mengalir merupakan arus bolak-balik maka garis-garis gaya magnet (fluks) terbentuk pada inti yang akan mempunyai arah dan jumlah yang berubah-ubah. Jika arus yang mengalir berbentuk sinusoidal maka garis-garis gaya magnet (fluks) yang terjadi akan berbentuk sinusoidal pula.

2.6. Ketidakseimbangan Beban pada Transformator⁷

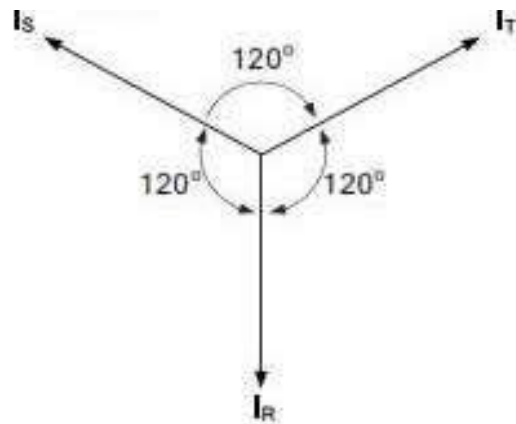
Yang dimaksud dengan keadaan seimbang adalah suatu keadaan di mana:

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

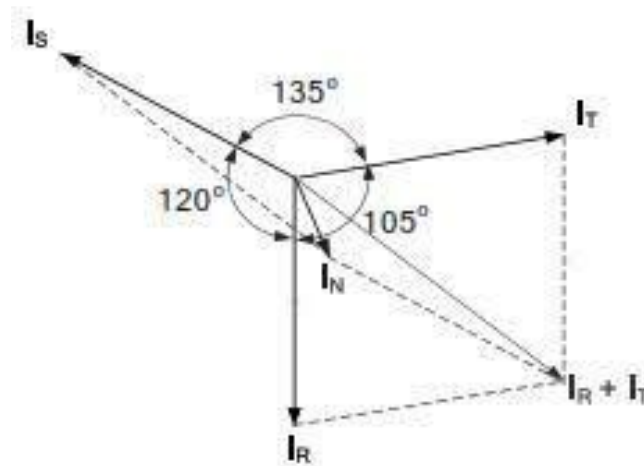
Sedangkan yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang adalah keadaan dimana salah satu atau kedua syarat keadaan seimbang tidak terpenuhi. Kemungkinan keadaan tidak seimbang ada 3 yaitu :

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

⁷ Markus Dwiyanto Tobi. "Pengaruh Optimasi Transformator Daya Terhadap Perkembangan Beban Feeder Untuk Meminimalisasi Gangguan dan Defisit Beban Listrik di Wiayah Sorong-Provinsi Papua Barat", *Electro Luceat* Vol. 3 No. 1, 2017, hlm 5-6.



Gambar 2. 7 Vektor diagram arus 1(a)



Gambar 2. 8 Vektor diagram arus 1(b)

Pada gambar 1(a) menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , I_T) adalah sama dengan nol sehingga tidak muncul arus netral (I_N). Sedangkan pada Gambar 1(b) menunjukkan vektor diagram arus yang tidak seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , I_T) tidak sama dengan nol sehingga muncul sebuah besaran yaitu arus netral (I_N) yang besarnya bergantung dari seberapa besar faktor ketidakseimbangannya. Daya transformator bila ditinjau dari sisi tegangan tinggi (primer) dapat dirumuskan sebagai berikut :



$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

dimana :

- S = daya transformator (kVA)
- V = tegangan sisi primer transformator (kV)
- I = arus jala-jala (A)

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

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

dimana :

- I_{FL} = arus beban penuh (A)
- S = daya transformator (kVA)
- V = tegangan sisi sekunder transformator (kV)

Dengan demikian untuk menghitung persentase pembebanannya adalah sebagai berikut :

$$\% b = \frac{I_{rata-rata}}{I_{FL}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

dimana:

- % b = Persentase pembebanan (%)
- $I_{rata-rata}$ = Arus rata-rata (A)
- I_{FL} = Arus beban penuh (A)

2.7. Rugi-Rugi pada Transformator⁸

Pada umumnya energi listrik yang dimasukkan ke transformator tidak sama dengan energi listrik yang dikeluarkan dari transformator tersebut. Hal ini

⁸ Zuhail, op.cit, hlm. 54-55



dikarenakan adanya rugi-rugi yaitu adanya pada transformator tersebut. Rugi-rugi daya dapat dibagi menjadi dua yaitu rugi inti (P_i) dan rugi tembaga (P_{cu}). Selain rugi inti dan rugi tembaga, ada lagi rugi-rugi yang menyebabkan berkurangnya efisiensi transformator, yaitu rugi-rugi akibat arus netral pada transformator (P_n) dan rugi-rugi akibat arus netral yang mengalir ke tanah (P_G).

2.7.1. Rugi-rugi inti

Rugi-rugi inti (P_i) dapat digolongkan kepada dua bagian yaitu rugi histeresis dan rugi *Eddy Current*. Adapun persamaan untuk mencari rugi inti, yaitu:

$$P_i = P_h + P_e \dots\dots\dots (2.4)$$

dimana:

P_i = rugi inti (watt)

P_h = rugi histeresis (watt)

P_e = rugi *Eddy Current* (watt)

Rugi histeresis (P_h), yaitu rugi yang disebabkan fluks bolak – balik pada inti besi yang dinyatakan sebagai :

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B^u \text{ maks} \dots\dots\dots (2.5)$$

dimana :

K_h = konstanta histeresis

f = frekuensi (Hz)

B_{maks} = kerapatan fluks maksimum (*weber*)



Rugi *eddy current* (P_e), yaitu rugi yang disebabkan arus pusar pada inti besi yang persamaannya dinyatakan sebagai berikut:

$$P_e = K_e \cdot f^2 \cdot B_{maks}^n \dots\dots\dots (2.6)$$

dimana:

K_e = konstanta *Eddy Current*

f = frekuensi (Hz)

B_{maks} = kerapatan fluks maksimum (*weber*)

2.7.2. Rugi-rugi tembaga

Rugi-rugi tembaga disebabkan arus mengalir pada kawat tembaga yang terjadi pada kumparan sekunder. Persamaan untuk mencari rugi tembaga dapat ditulis sebagai berikut:

$$P_{cu} = I^2 \cdot R \dots\dots\dots (2.7)$$

dimana:

P_{cu} = Rugi tembaga (watt)

I = Arus pada penghantar (A)

R = Tahanan penghantar (Ω)

2.7.3. Rugi-rugi akibat arus netral pada transformator

Sebagai akibat dari ketidakseimbangan beban antara tiap-tiap fasa pada sisi sekunder transformator (fasa R, fasa S dan fasa T) mengalirlah arus di netral transformator. Arus yang mengalir pada penghantar netral transformator ini



menyebabkan rugi-rugi. Dan rugi-rugi pada penghantar netral dapat dirumuskan sebagai berikut:

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

dimana :

P_N = Rugi-rugi yang timbul pada penghantar netral (watt)

I_N = Arus yang mengalir melalui kawat netral (A)

R_N = Tahanan pada kawat netral (Ω)

2.8. Arus Netral

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

1. Kondisi beban tidak seimbang
2. Karena adanya arus harmonisa akibat beban *non-linear*

Arus yang mengalir pada kawat netral yang merupakan arus bolak-balik untuk sistem distribusi tiga fasa empat kawat adalah penjumlahan vektor dari ketiga arus fasa dalam komponen simetris. Untuk arus tiga fasa dari suatu sistem yang tidak seimbang dapat juga diselesaikan dengan menggunakan metode komponen simetris. Dengan menggunakan notasi-notasi yang sama seperti pada tegangan akan didapatkan persamaan-persamaan untuk arus-arus phasanya sebagai berikut :

$$I_a = I_1 + I_2 + I_0 \dots\dots\dots(2.9)$$

$$I_b = a^2 I_1 + a I_2 + I_0 \dots\dots\dots(2.10)$$

$$I_c = a I_1 + a^2 I_2 + I_0 \dots\dots\dots(2.11)$$

dimana :

I_1 = Arus urutan positif (A)

I_2 = Arus urutan negatif (A)

I_0 = Arus urutan nol (A)

I_a = Arus pada fasa a (A)

I_b = Arus pada fasa b (A)

I_c = Arus pada fasa c (A)



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

$$I_1 = \frac{1}{3}(I_a + a I_b + a^2 I_c) \dots\dots\dots(2.12)$$

$$I_2 = \frac{1}{3}(I_a + a^2 I_b + a I_c) \dots\dots\dots(2.13)$$

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \dots\dots\dots(2.14)$$

dimana :

- I_1 = Arus urutan positif (A) I_a = Arus pada phasa a (A)
- I_2 = Arus urutan negatif (A) I_b = Arus pada phasa b (A)
- I_0 = Arus urutan nol (A) I_c = Arus pada phasa c (A)

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

$$I_N = I_a + I_b + I_c \dots\dots\dots(2.15)$$

dimana :

- I_N = Arus netral (A)
- I_a = Arus pada phasa a (A)
- I_b = Arus pada phasa b (A)
- I_c = Arus pada phasa c (A)

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.14) ke (2.15) maka diperoleh :

$$I_N = 3I_0 \dots\dots\dots(2.16)$$

dimana :

- I_N = Arus netral (A)
- I_0 = Arus urutan nol (A)

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



2.9. Penyaluran dan Susut Daya pada Transformator⁹

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:

$$P = 3.V.I.\cos \varphi \dots\dots\dots (2.17)$$

Daya yang sampai ujung terima akan lebih kecil dari P karena terjadi penyusutan dalam saluran. Jika (I) adalah besaran arus fasa dalam penyaluran daya sebesar P pada keadaan seimbang, maka pada penyaluran daya yang sama tetapi dengan keadaan tak seimbang besarnya arus-arus fasa dapat dinyatakan dengan koefisien a, b dan c sebagai berikut:

$$I_R = a. I \dots\dots\dots (2.18)$$

$$I_S = b. I \dots\dots\dots (2.19)$$

$$I_T = c. I \dots\dots\dots (2.20)$$

Dengan I_R , I_S , dan I_T berturut-turut adalah arus di fasa. Bila faktor daya di ketiga fasa dianggap sama walaupun besarnya arus berbeda, besarnya daya yang disalurkan dapat dinyatakan sebagai:

$$P = a + b + c V. I. \cos \varphi \dots\dots\dots (2.21)$$

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

$$a + b + c = 3 \dots\dots\dots (2.22)$$

⁹ Moh. Dahlan, Akibat Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses Pada Transformator Distribusi, Kudus, hlm. 4.

Dimana pada keadaan seimbang, nilai $a = b = c = 1$. Dengan demikian, rata-rata ketidakseimbangan beban dalam (%), yaitu:

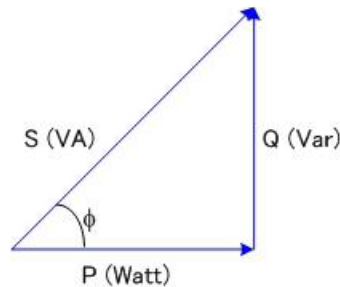
$$\% \text{ ketidakseimbangan beban} = \frac{|a-1|+|b-1|+|c-1|}{3} \times 100\% \dots (2.23)$$

2.10. Faktor Daya

Faktor daya ($\cos \phi$) dapat didefinisikan sebagai rasio perbandingan antara daya aktif (Watt) dan daya semu (VA) yang digunakan dalam listrik arus bolak-balik (AC) atau beda sudut fasa antara V dan I yang biasanya dinyatakan dalam $\cos \phi$. Berdasarkan pengertian tersebut, faktor daya ($\cos \phi$) dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\cos \phi = \frac{P}{S} \dots (2.24)$$

Untuk penjelasan tentang daya-daya dapat dilihat pada segitiga daya berikut ini :



Gambar 2. 9 Segitiga daya

2.10.1. Daya aktif

Daya aktif (*Active Power*) adalah daya yang terpakai untuk melakukan energi sebenarnya. Satuan daya aktif adalah Watt. Adapun persamaan untuk mencari daya aktif sebagai berikut :

$$P = V.I.\cos \phi \dots (2.25)$$



2.10.2. Daya reaktif

Daya reaktif adalah jumlah daya yang diperlukan untuk pembentukan medan magnet. Dari pembentukan medan magnet maka akan terbentuk fluks medan magnet. Contoh daya yang menimbulkan daya reaktif adalah transformator, motor, dan lain – lain. Satuan daya reaktif adalah Var.

$$Q = V.I.\text{Sin } \phi \dots\dots\dots (2.26)$$

2.10.3. Daya semu

Daya semu merupakan daya listrik yang melalui suatu penghantar transmisi atau distribusi dengan satuan VA. Daya ini merupakan hasil perkalian antara tegangan dan arus yang melalui penghantar. Adapun persamaan untuk mencari daya semu sebagai berikut :

$$S = V.I \dots\dots\dots (2.27)$$

2.11. Efisiensi¹⁰

Untuk setiap mesin atau peralatan listrik, efisiensi ditentukan oleh besarnya rugi-rugi yang selama operasi normal. Untuk mencari besarnya efisiensi pada transformator, maka dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.28)$$

$$P_{in} = P_{out} + \sum \text{rugi} - \text{rugi} \dots\dots\dots (2.29)$$

Dengan demikian:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \sum \text{rugi} - \text{rugi}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.30)$$

¹⁰ Sumanto, op.cit, hlm. 39.