



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik¹³

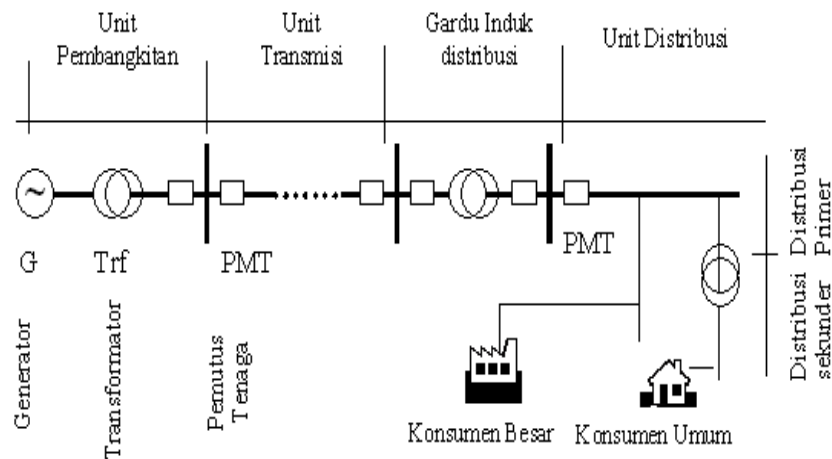
Sistem tenaga listrik terdiri dari lima sub sistem utama, yaitu pembangkit listrik, jaringan transmisi, gardu induk, jaringan distribusi dan beban. Pada pusat pembangkit terdapat generator dan transformator penaik tegangan (*step-up transformer*). Generator berfungsi untuk mengubah energi mekanis yang dihasilkan pada poros turbin menjadi energi listrik yang dimana pada umumnya generator membangkitkan daya listrik bertegangan rata – rata 11 kV hingga 25kV. Lalu melalui transformator penaik tegangan energi listrik dinaikkan menjadi 66kV hingga 500kV atau lebih. Pada transmisi tegangan 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 rendah dan dapat mengurangi rugi – rugi transmisi.

Tegangan tinggi yang dikirim melewati saluran transmisi akan menuju pusat – 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.

Setelah tenaga listrik disalurkan melalui saluran transmisi maka sampailah tenaga listrik di Gardu Induk (GI) sebagai pusat beban untuk diturunkan tegangannya melalui transformator penurun tegangan (*step-down transformer*) menjadi tegangan distribusi primer. Tegangan distribusi primer yang dipakai PLN adalah 20 KV. Setelah tenaga listrik disalurkan melalui jaringan distribusi primer maka kemudian tenaga listrik diturunkan tegangannya dengan menggunakan transformator distribusi (*step down transformer*) menjadi tegangan rendah dengan

¹³ Wibowo, Sigi Syah. 2018. *Analisa Sistem Tenaga*. Malang : UPT Percetakan dan Penerbitan Polinema.

tegangan standar 380/220 Volt. Tenaga listrik yang menggunakan standar tegangan rendah ini kemudian disalurkan melalui suatu jaringan yang disebut Jaringan Tegangan Rendah yang sering disebut dengan singkatan JTR. 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 incoming di Gardu Induk, sampai dengan Alat Penghitung dan Pembatas (APP) di instalasi konsumen yang berfungsi untuk menyalurkan dan mendistribusikan tenaga listrik dari Gardu Induk sebagai pusat beban ke pelanggan secara langsung atau melalui gardu-gardu distribusi (gardu trafo) dengan mutu yang memadai sesuai standar pelayanan yang berlaku. Dengan demikian sistem distribusi ini menjadi suatu sistem tersendiri karena unit distribusi ini memiliki komponen peralatan yang saling berkaitan dalam operasinya untuk menyalurkan tenaga listrik. Dimana sistem adalah perangkat unsur-unsur yang saling ketergantungan yang disusun untuk mencapai suatu tujuan tertentu dengan menampilkan fungsi yang ditetapkan.²

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



Distribusi ini dibagi menjadi dua bagian yaitu :

a. Distribusi Primer :

Distribusi Primer yaitu jaringan distribusi yang berasal dari jaringan transmisi yang diturunkan 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-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, Loop, 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.

Konsumen rumah tangga maupun komersil biasanya terhubung dengan jaringan distribusi sekunder melalui sambungan rumah. Konsumen yang membutuhkan tegangan yang lebih tinggi dapat mengajukan permohonan untuk langsung terhubung dengan jaringan distribusi primer, atau ke level subtransmisi.⁴

2.3 Gardu Distribusi⁸

Pengertian umum Gardu Distribusi tenaga listrik yang paling dikenal adalah suatu bangunan gardu listrik yang 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

⁴ Kadir, Abdul. 2000. *Distribusi dan Utilisasi Tenaga Listrik*. Jakarta : Universitas Indonesia.

⁸ PT. PLN (Persero). 2010. *Buku 4 Standar Konstruksi Gardu Distribusi dan Gardu Hubung Tenaga Listrik*. Jakarta : PT PLN (Persero).



kebutuhan tenaga listrik bagi para pelanggan baik dengan Tegangan Menengah (TM 20 kV) maupun Tegangan Rendah (TR 220/380V).

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

Secara garis besar gardu distribusi dibedakan atas :

- a. Jenis pemasangannya :
 - Gardu pemasangan luar : Gardu Portal, Gardu Cantol
 - Gardu pemasangan dalam : Gardu Beton, Gardu Kios
- b. Jenis Konstruksinya :
 - Gardu Beton (bangunan sipil : batu, beton)
 - Gardu Tiang : Gardu Portal dan Gardu Cantol
 - Gardu Kios
- c. Jenis Penggunaannya :
 - Gardu Pelanggan Umum
 - Gardu Pelanggan Khusus

2.3.1 Gardu Portal

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

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.

Guna mengatasi faktor keterbatasan ruang pada Gardu Portal, maka digunakan konfigurasi switching/proteksi yang sudah terakit ringkas sebagai RMU (*Ring Main 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 dengan remote control). *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.



Gambar 2.2 Gardu Portal

2.3.2 Gardu Cantol

Pada Gardu Distribusi tipe cantol, transformator yang terpasang adalah transformator dengan daya ≤ 100 kVA Fase 3 atau Fase 1. Transformator terpasang adalah jenis CSP (*Completely Self Protected Transformer*) yaitu peralatan switching dan proteksinya sudah terpasang lengkap dalam tangki transformator.



Gambar 2.3 Gardu Tipe Cantol

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

2.3.3 Gardu Beton

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



Gambar 2.4 Gardu Beton

2.3.4 Gardu Kios

Gardu tipe ini adalah bangunan *prefabricated* terbuat dari konstruksi baja, fiberglass atau kombinasinya, yang dapat dirangkai di lokasi rencana pembangunan gardu distribusi. Terdapat beberapa jenis konstruksi, yaitu Kios Kompak, Kios Modular dan Kios Bertingkat.

Gardu ini dibangun pada tempat-tempat yang tidak diperbolehkan membangun Gardu Beton. Karena sifat mobilitasnya, maka kapasitas transformator

distribusi yang terpasang terbatas. Kapasitas maksimum adalah 400 kVA, dengan 4 jurusan Tegangan Rendah. Khusus untuk Kios Kompak, seluruh instalasi komponen utama gardu sudah dirangkai selengkapnya di pabrik, sehingga dapat langsung di angkut kelokasi dan disambungkan pada sistem distribusi yang sudah ada untuk difungsikan sesuai tujuannya.



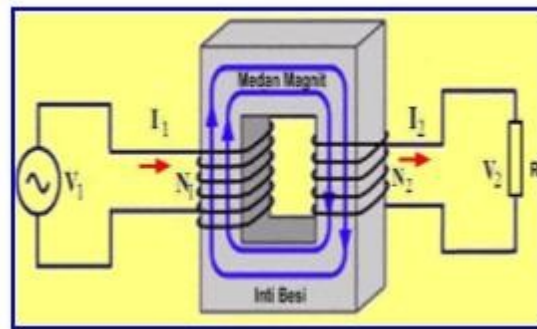
Gambar 2.5 Gardu Tipe Kios

2.4 Transformator¹²

Transformtor adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain dengan frekuensi yang sama, melalui suatu gandingan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnet.

Secara konstruksinya transformator terdiri atas dua kumparan yaitu primer dan sekunder. Bila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak – balik, maka fluks bolak – balik akan terjadi pada kumparan sisi primer, kemudian fluks tersebut akan mengalir pada inti transformator, dan selanjutnya fluks ini akan mengibas pada kumparan yang ada pada sisi sekunder yang mengakibatkan timbulnya fluks magnet di sisi sekunder, sehingga pada sisi sekunder akan timbul tegangan.

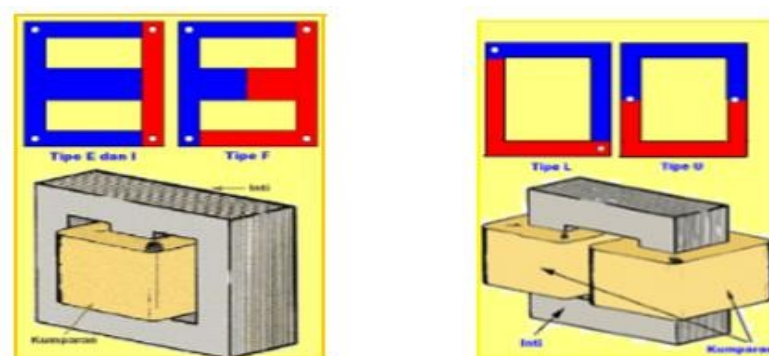
¹² Sumardjati, Prih, dkk. 2008. *Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik Jilid 3*. Jakarta : Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.



Gambar 2.6 Fluks Magnet Transformator

Berdasarkan cara melilitkan kumparan pada inti, dikenal dua jenis transformator, yaitu tipe inti (*core type*) dan tipe cangkang (*shell type*). 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.

Sedangkan 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.



a. Transformator Tipe Cangkang

b. Transformator Tipe Inti

Gambar 2.7 Tipe Transformator

Tujuan utama 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 pada rangka (koker) selesai dilakukan.

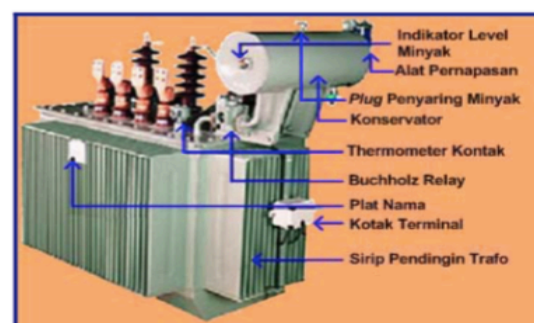
2.4.1 Transformator Daya 3 Fasa

Ditinjau dari jumlah fasanya transformator dibagi atas transformator satu fasa dan transformator tiga fasa. Sebuah transformator tiga fasa secara prinsip sama dengan sebuah transformator satu fasa, perbedaan yang paling mendasar adalah pada sistem kelistrikannya yaitu sistem satu fasa dan tiga fasa. Sehingga sebuah transformator tiga fasa bisa dihubung bintang, segitiga, atau zig – zag.

Transformator tiga fasa banyak digunakan pada sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik karena pertimbangan ekonomis. Transformator tiga fasa banyak sekali mengurangi berat dan lebar kerangka, sehingga harganya dapat dikurangi bila dibandingkan dengan penggabungan tiga buah transformator satu fasa dengan “*rating*” daya yang sama. Tetapi, transformator tiga fasa juga mempunyai kekurangan, diantaranya bila salah satu fasa mengalami kerusakan, maka seluruh transformator harus dipindahkan (diganti), tetapi bila transformator terdiri dari tiga buah transformator satu fasa, bila salah satu fasa transformator mengalami kerusakan, sistem masih bisa dioperasikan dengan sistem “*open delta*”.



a. Bagian dalam Transformator



b. Bagian Luar Transformator

Gambar 2.8 Konstruksi Transformator Tiga Fasa



2.4.2 Transformator Distribusi⁵

Transformator distribusi yang umum digunakan adalah transformator step-down 20KV/400V. 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 380 V. Pada kumparan primer akan mengalir arus jika kumparan primer dihubungkan ke sumber tegangan bolak-balik, sehingga pada inti transformator yang terbuat dari bahan ferromagnet akan terbentuk sejumlah garis-garis gaya magnet (fluks = ϕ).

Karena arus yang mengalir merupakan arus bolak-balik, maka fluks yang terbentuk pada inti akan mempunyai arah dan jumlah yang berubah-ubah. Jika arus yang mengalir berbentuk sinusoidal, maka fluks yang terjadi akan berbentuk sinusoidal pula. Karena fluks tersebut mengalir melalui inti yang mana pada inti tersebut terdapat belitan primer dan sekunder, maka pada belitan primer dan sekunder tersebut akan timbul ggl (gaya gerak listrik) induksi, tetapi arah ggl induksi primer berlawanan dengan arah ggl induksi sekunder. Sedangkan frekuensi masing-masing tegangan sama dengan frekuensi sumbernya.

Hubungan transformasi tegangan adalah sebagai berikut:

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

Dimana,

- E1 = ggl induksi di sisi primer (volt)
- E2 = ggl induksi di sisi sekunder (volt) N1
- N1 = jumlah belitan sisi primer (turn)
- N2 = jumlah belitan sisi sekunder (turn)

⁵Kurniawan, Muhammad Aldo. 2019. *Analisa Pemerataan Beban Pada Gardu Distribusi M.285 Penyulang Kentang PT PLN (Persero) ULP Mariana*. Laporan Akhir Tidak Dipublikasikan. Palembang : Politeknik Negeri Sriwijaya.



2.5 Pembebanan Transformator

2.5.1 Arus Beban Penuh Transformator¹⁰

Untuk menentukan besarnya daya suatu transformator bila ditinjau dari sisi tegangan menengah (tegangan primer) dirumuskan sebagai berikut:

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

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 :

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

Dimana :

I_{FL} = arus beban penuh (A)

S = daya transformator (kVA)

V = tegangan sisi sekunder transformator (kV)

2.5.2 Persentase Pembebanan Transformator⁶

Dalam menghitung arus rata – rata beban pada transformator dapat menggunakan persamaan berikut :

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

Adapun nilai persentase pembebanan pada transformator dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\% \text{ Beban Trafo} = \frac{I_{rata-rata \text{ beban}}}{I_{beban \text{ penuh transformator (IFL)}}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.5)$$

¹⁰Setiadji, Julius Sentosa., Machmudsyah, Tabrani., Isnanto, Yanuar. 2008. *Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses Pada Trafo Distribusi*. Jurnal Teknik Elektro Vol. 8 No.1

⁶Latupeirissa, Hamles Leonardo. 2017. *Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses Daya Pada Trafo Distribusi Gardu KP-01 Desa Hative Kecil*. Jurnal Simetrik Vol.7 No.2



Dimana :

$I_{rata - rata \text{ beban}}$ = arus rata – rata beban yang digunakan (A)

$I_{\text{beban penuh transformator}}$ = arus beban penuh transformator (A)

2.6 Ketidakseimbangan Beban⁵

Yang dimaksud dengan keadaan beban seimbang adalah suatu keadaan dimana:

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

Besarnya arus fasa dalam keadaan seimbang (I) sama dengan besarnya arus rata – rata, sehingga koefisien a, b, dan c dapat diperoleh dengan persamaan :

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

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

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

Pada keadaan seimbang, besarnya nilai koefisien a, b dan c adalah 1. Dengan demikian, rata – rata ketidakseimbangan beban (dalam %) dapat diperoleh dengan persamaan :

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

Sedangkan yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang adalah keadaan dimana salah satu atau kedua syarat keadaan tidak seimbang tidak terpenuhi.

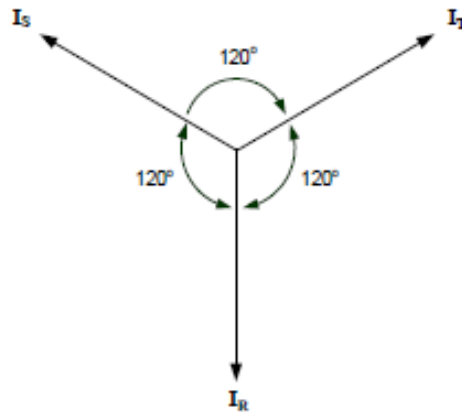
Kemungkinan keadaan tidak seimbang ada 3, yaitu :

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.

⁵Kurniawan, Muhammad Aldo. 2019. *Analisa Pemerataan Beban Pada Gardu Distribusi M.285 Penyulang Kentang PT PLN (Persero) ULP Mariana*. Laporan Akhir Tidak Dipublikasikan. Palembang : Politeknik Negeri Sriwijaya.

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

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



Gambar 2.9 Vektor Diagram Arus Dalam Keadaan Seimbang

Gambar 2.9 menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan seimbang. Masing-masing nilai pada ketiga vektor arus diatas apabila dijumlahkan akan bernilai nol. Keadaan ini 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 :

$$\begin{aligned} I_N &= I_R + I_S + I_T \dots \dots \dots (2.7) \\ &= I \angle -\theta + I \angle -120^\circ - \theta + I \angle -240^\circ - \theta \\ &= I \cos(-\theta) + jI \sin(-\theta) + I \cos(-\theta - 120^\circ) + jI \sin(-\theta - 120^\circ) + I \cos(-\theta - 240^\circ) \\ &= I [\cos(-\theta) + \cos(-\theta - 120^\circ) + I \cos(-\theta - 240^\circ)] + jI [\sin(-\theta) + \sin(-\theta - 120^\circ) + \sin(-\theta - 240^\circ)] \end{aligned}$$

Dengan menggunakan persamaan identitas trigonometri :

$$\cos(\alpha - \beta) = \cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta \dots\dots\dots(2.8)$$

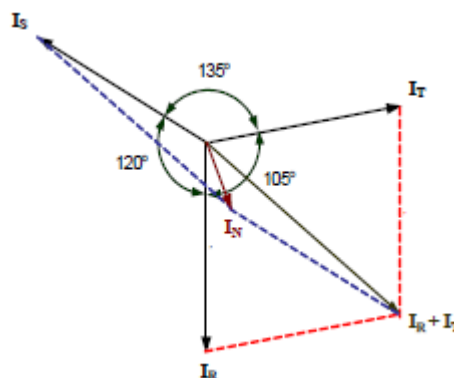
$$\sin(\alpha - \beta) = \sin \alpha \cos \beta - \cos \alpha \sin \beta \dots\dots\dots(2.9)$$

Masukkan identitas trigonometri ke persamaan :

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

$$I_N = I \left[\cos(-\theta) - \frac{1}{2}\cos(-\theta) + \frac{\sqrt{3}}{2}\sin(-\theta) - \frac{1}{2}\cos(-\theta) - \frac{\sqrt{3}}{2}\sin(-\theta) \right] + jI \left[\sin(-\theta) - \frac{1}{2}\sin(-\theta) - \frac{\sqrt{3}}{2}\cos(-\theta) - \frac{1}{2}\sin(-\theta) + \frac{\sqrt{3}}{2}\cos(-\theta) \right]$$

$I_N = 0$ A (Pada saat keadaan beban seimbang)



Gambar 2.10 Vektor Diagram Arus Dalam Keadaan Tidak Seimbang

Sedangkan pada gambar 2.10 menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan tidak seimbang. Terdapat perbedaan nilai pada masing - masing fasa, dan apabila dijumlahkan tidak bernilai nol. Selain itu, sudut antar fasanya juga tidak membentuk 120° . Keadaan ini akan memunculkan arus netral (I_N) dan besar dari arus netral ini berpengaruh pada besar dari faktor ketidakseimbangannya. Dalam sistem tenaga tiga fasa ideal, arus netral adalah jumlah vektor dari arus tiga fasa, harus sama dengan nol. Di bawah kondisi operasi normal, beberapa ketidakseimbangan fasa terjadi mengakibatkan arus netral kecil.



2.7 Rugi Akibat Adanya Arus Pada Penghantar Netral Transformator¹¹

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

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

Dimana :

P_N = rugi rugi pada penghantar netral transformator (watt)

I_N = arus pada penghantar netral (A)

R_N = tahanan penghantar netral (ohm)

2.8 Rugi – rugi Transformator¹

Dasar ketika 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 (P_{core}) dan rugi tembaga (P_{copper}).

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. Secara umum total rugi – rugi pada transformator dirumuskan pada persamaan berikut :

$$P_{Losses} = P_{copper} + P_{core} \dots\dots\dots(2.11)$$

Dimana :

P_{Losses} = Total rugi – rugi transformator (W)

P_{copper} = Rugi – rugi kumparan transformator (W)

P_{core} = Rugi – rugi inti besi transformator (W)

¹¹Sogen, Markus Dwiyanto Tobi. 2018. *Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses Pada Transformator Distribusi Di PT PLN (Persero) Area Sorong*. Jurnal Electro Luceat Vol. 4 No. 1.

¹Elnizar, Hendri., Gusmedi, Herri., Zebua, Osea. 2021. *Analisis Rugi – Rugi (Losses) Transformator Daya 150/20 KV di PT PLN (Persero) Gardu Induk Sutami PLTG Tarahan*. Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro Vol. 15 No. 2. 118-119.



2.8.1 Rugi Tembaga (PCu)

Rugi-rugi yang disebabkan oleh arus mengalir pada kawat tembaga. Rugi-rugi tembaga akan berbanding lurus dengan besarnya beban sehingga meningkatnya arus beban akan meningkatkan rugi-rugi tembaga juga. Rugi – rugi ini dapat ditulis sebagai berikut :

$$P_{CU} = I_P^2 R_1 + I_S^2 R_2 \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana :

- P_{CU} = rugi – rugi tembaga (watt)
- I_P = arus primer (A)
- I_S = arus sekunder (A)
- R_1 = resistansi kumparan primer (Ω)
- R_2 = resistansi kumparan sekunder (Ω)

Perumusan di atas diperuntukkan hanya sebagai pendekatan. Disebabkan arus beban yang terus mengalami perubahan, rugi tembaga juga tidak konstan karena tergantung pada nilai beban.

2.8.2 Rugi Besi (Pi)

Rugi inti pada transformator dibagi atas dua bagian, yaitu rugi hysteresis dan arus eddy yang dapat diukur melalui percobaan/test tanpa beban, 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 arus pusar pada inti besi. Jadi rugi inti dapat ditulis dalam persamaan:

$$P_{fe} = P_h + P_e \dots\dots\dots (2.13)$$

Dimana :

- P_{fe} = rugi inti (watt)
- P_h = rugi hysteresis (watt)
- P_e = rugi arus eddy (watt)

1. Rugi Hysteresis (P_h)

Rugi *hysteresis* adalah rugi yang diakibatkan oleh fluks (Φ) bolak-balik di inti besi. Pada besi yang mendapat fluks bolak-balik, Rugi hysteresis per cycle



berbanding dengan luas lup (jerat) hysteresis. Rugi *hysteresis* dapat dituliskan dalam bentuk persamaan sebagai berikut:

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{maks}^{1.6} \text{ watt} \dots\dots\dots (2.14)$$

Dimana :

- Kh = konstanta hysteresis
- B_{maks} = fluks maksimum (weber)
- F = Frekuensi (Hz)

2. Rugi – rugi Arus Eddy

Rugi-rugi ini disebabkan pemanasan pada ketebalan inti besi oleh arus yang terinduksi pada inti dan perbedaan tegangan antara sisinya makan akan membangkitkan arus yang berputar – putar pada sisi yang luas/tebal. Adanya arus eddy berdasar pada fluks magnetik yang mana perbedaan tegangan antara sisinya yang memberikan perubahan fluks tersebut. Pada dasarnya induksi tegangan di besi ini sama seperti pada transformator (dapat dianggap bahwa tiap lempeng besi adalah sekunder yang terhubung singkat), maka emf induksi di inti akan berbanding dengan fluks ($e = 4,44 f n \Phi$). Impedansi dari inti yang di aliri arus dapat dianggap konstan untuk laminasi yang tipis dan tidak tergantung pada frekuensi, untuk frekuensi rendah atau frekuensi daya listrik, sehingga dapat dituliskan persamaan:

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{maks}^{1.6} \text{ watt} \dots\dots\dots (2.15)$$

$$B_M = \frac{\Phi_M}{A} \dots\dots\dots(2.16)$$

Dimana,

$$\Phi_M = \frac{10^8 \cdot (E_{ff})_2}{4,44 \cdot f \cdot N_2} \dots\dots\dots (2.17)$$

Dan

$$(E_{ff})_2 = 4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot \Phi_M \cdot 10^8 \text{ Volt} \dots\dots\dots(2.18)$$

Jadi, rugi besi (rugi inti) adalah :

$$P_i = P_h + P_e \dots\dots\dots (2.19)$$



Untuk mengetahui rugi – rugi pada transformator dapat dilihat pada tabel 2.1 yang berdasarkan SPLN D3.002-1:2007.

Tabel 2.1 Nilai Rugi – rugi Transformator Distribusi⁹

DAYA	Rugi tanpa beban (rugi besi)	Rugi berbeban pada 75°C
KVA	Watt	Watt
25	75	425
50	125	800
100	210	1420
160	300	2000
200	355	2350
250	420	2750
315	500	3250
400	595	3850
500	700	4550
630	835	5400
800	1000	6850
1000	1100	8550
1250	1400	10600
1600	1680	13550
2000	1990	16900
2500	2350	21000

⁹PT PLN (Persero). 2007. *Standar Perusahaan Listrik Negara D3.002-1*. Jakarta : PT PLN (Persero).



2.9 Beban Listrik³

Tujuan utama dari sistem distribusi tenaga listrik adalah mendistribusikan tenaga listrik dari gardu induk sampai ke pelanggan atau beban. Salah satu faktor utama yang paling penting dalam perencanaan sistem distribusi tenaga listrik adalah karakteristik dari berbagai jenis beban listrik tersebut. Karakteristik jenis beban listrik sangat diperlukan agar sistem distribusi tegangan dan pengaruh termis dari pembebanan dapat dianalisis dengan baik.

Dalam sistem distribusi tenaga listrik jenis beban listrik dikelompokkan menjadi dua macam, yaitu beban linear dan beban non linear. Yang dimaksud dari beban linear adalah beban yang memberikan bentuk gelombang keluaran yang linear, artinya arus mengalir sebanding dengan impedansi dan perubahan tegangan. Sedangkan beban non linear adalah beban yang memberikan bentuk gelombang keluaran yang tidak sebanding dengan tegangan dalam setiap setengah siklus, sehingga bentuk gelombang maupun tegangan keluarannya tidak sama dengan gelombang masukannya atau dengan kata lain disebut distorsi tegangan dan arus listrik. Gangguan yang terjadi akibat distorsi arus dan tegangan disebut dengan harmonik.

2.9.1 Karakteristik Beban Listrik

Dalam sistem listrik arus bolak-balik (AC) karakteristik beban listrik dapat diklasifikasikan menjadi tiga macam, yaitu :

a. Beban Resistif (R)

Beban resistif, yaitu beban yang terdiri dari komponen tahanan ohm saja (*resistance*), seperti elemen pemanas (*heating element*) dan lampu pijar. Beban jenis ini hanya mengkonsumsi beban aktif saja dan mempunyai faktor daya sama dengan satu. Tegangan dan arus sefasa. Persamaan daya sebagai berikut :

$$P = V.I \dots\dots\dots(2.20)$$

³ Jumadi., Tambunan, Juara Mangapul. 2015. *Analisis Pengaruh Jenis Beban Listrik Terhadap Kinerja Pemutus Daya Listrik di Gedung CYBER Jakarta*. Jurnal Energi & Kelistrikan Vol. 7 No. 2.



Gambar 2.11 Arus dan Tegangan Pada Beban Resistif

b. Beban Induktif (L)

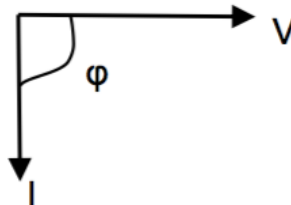
Beban induktif, yaitu beban yang terdiri dari kumparan kawat yang dililitkan pada suatu inti, seperti : (*coil*), transformator, dan solenoida. Beban ini dapat mengakibatkan pergeseran fasa (*phase shift*) pada arus sehingga bersifat tertinggal sebesar 90^0 terhadap tegangan (*lagging*). Hal ini disebabkan oleh energi yang tersimpan berupa medan magnetis yang akan mengakibatkan fasa arus bergeser menjadi tertinggal terhadap tegangan. Beban jenis ini menyerap daya aktif dan daya reaktif.

Persamaan daya aktif untuk beban induktif adalah sebagai berikut:

$$P = V.I.Cos \varphi \dots\dots\dots (2.21)$$

Dimana :

φ = Sudut antara arus dan tegangan



Gambar 2.12 Arus dan Tegangan Pada Beban Induktif

c. Beban Kapasitif (C)

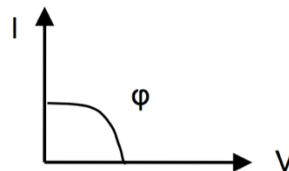
Beban kapasitif, yaitu beban yang memiliki kemampuan kapasitansi atau kemampuan untuk menyimpan energi yang berasal dari pengisian elektrik (*electrical discharge*) pada suatu sirkuit. Komponen ini dapat menyebabkan arus terdahulu terhadap tegangan (*leading*). Beban jenis ini menyerap daya aktif dan mengeluarkan daya reaktif.

Persamaan daya aktif untuk beban induktif adalah sebagai berikut :

$$P = V.I.\cos \varphi \dots\dots\dots (2.22)$$

Dimana :

φ = Sudut antara arus dan tegangan



Gambar 2.13 Arus dan Tegangan Pada Beban Kapasitif

2.10 Penghantar⁷

Penghantar dalam teknik elektro adalah zat yang dapat menghantarkan arus listrik, baik berupa zat padat, cair atau gas. Karena sifatnya yang konduktif maka disebut konduktor. Konduktor yang baik adalah yang memiliki tahanan jenis yang kecil. Pada umumnya logam bersifat konduktif. Emas, perak, tembaga, aluminium, zink, besi berturut-turut memiliki tahanan jenis semakin besar. Jadi sebagai penghantar emas adalah sangat baik, tetapi karena harganya sangat mahal, maka secara ekonomis tembaga dan aluminium paling banyak digunakan.

Kabel listrik adalah media untuk mengantarkan arus listrik ataupun informasi. Bahan dari kabel ini beraneka ragam, khusus sebagai pengantar arus listrik, umumnya terbuat dari tembaga dan umumnya dilapisi dengan pelindung. Selain tembaga, ada juga kabel yang terbuat dari serat optik, yang disebut dengan fiber optic cable. Penghantar atau kabel yang sering digunakan untuk instalasi listrik penerangan umumnya terbuat dari tembaga.

Secara garis besar, berdasarkan ada atau tidaknya isolasi penghantar dibedakan menjadi dua macam, yaitu penghantar berisolasi dan penghantar tanpa

⁷Nawawi, A. 2018. *Perencanaan Instalasi Penerangan Pada Bangunan Tempat Tinggal Yang Aman Dan Efisien*. Swara Patra : Majalah Ilmiah PPSDM Migas Vol. 07 No. 1. <http://ejurnal.ppsdmmigas.esdm.go.id/sp/index.php/swarapatra/article/view/170> (Accessed: 18 April 2022).



isolasi. Kemudian untuk kabel berdasarkan penggunaannya dibedakan menjadi 3 macam yaitu, kabel instalasi, kabel tanah dan kabel fleksibel.

Jenis konduktor untuk SUTM yang dipakai adalah AAAC (all aluminium alloy conductor), suatu campuran aluminium dengan silicium (0,4% - 0,7%), magnesium (0,3% - 0,35%) dan ferum (0,2% - 0,3%), mempunyai kekuatan yang lebih besar daripada aluminium murni, tetapi kapasitas arusnya lebih rendah.

Untuk SUTR dipakai kabel pilin udara (twisted cable) suatu kabel dengan inti AAC berisolasi XLPE (cross linked polyethylene), dilengkapi kawat netral AAAC sebagai penggantung, dan dipilin.