

BAB II

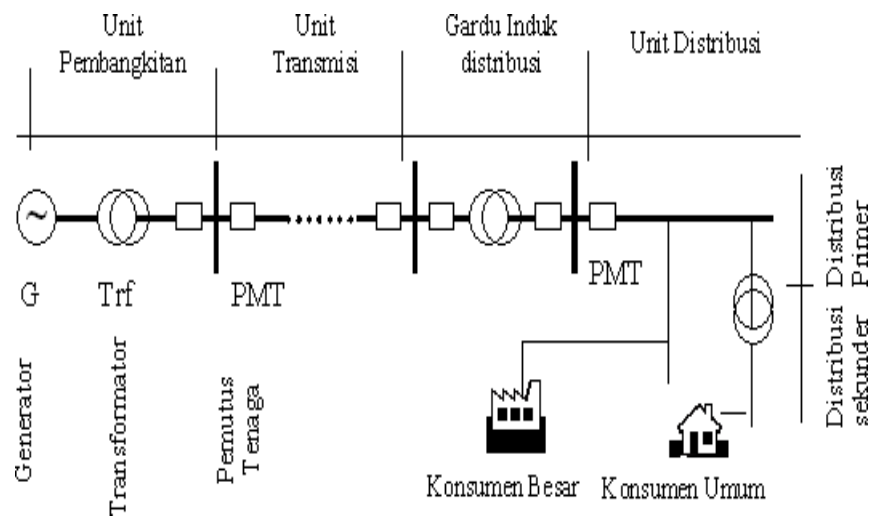
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan suatu sistem terpadu yang terbentuk oleh hubungan-hubungan peralatan dan komponen-komponen listrik seperti generator, transformator, jaringan tenaga listrik dan beban listrik.

Peranan utama dari sistem tenaga listrik adalah menyalurkan energi listrik yang dibangkitkan oleh generator ke konsumen yang membutuhkan energi listrik tersebut. Secara garis besar suatu sistem tenaga listrik dapat di kelompokkan ke bagian subsistan :

1. Bagian pembangkit
 - a. Generator
 - b. Gardu induk sebagian
2. Bagian penyaluran/transmisi daya
 - a. Saluran transmisi
 - b. Gardu induk
 - c. Saluran transmisi
3. Bagian distribusi dan beban
 - a. Gardu induk distribusi
 - b. Saluran distribusi primer (20kV)
 - c. Gardu distribusi
 - d. Saluran distribusi sekunder (380/220 V)
 - e. Beban listrik/ konsumen



Gambar 2.1. Single Line Diagram Sistem Tenaga Listrik

Apabila saluran transmisi menyalurkan tenaga listrik bertegangan tinggi ke pusat-pusat beban dalam jumlah besar, maka saluran distribusi berfungsi membagikan tenaga listrik tersebut kepada pihak pengguna melalui saluran tegangan rendah.

Generator sinkron di pusat pembangkit biasanya menghasilkan tenaga listrik dengan tegangan antara 6 – 20 kV yang kemudian, dengan bantuan transformator, tegangan tersebut dinaikkan menjadi 150-500 kV. Saluran tegangan tinggi (STT) menyalurkan tenaga listrik menuju pusat penerima; disini tegangan diturunkan menjadi tegangan subtransmisi 70kV. Pada gardu induk (GI), tenaga listrik yang diterima kemudian dilepaskan menuju transformator distribusi (TD) dalam bentuk tegangan menengah 20kV. Melalui transformator distribusi yang terbesar di berbagai pusat beban, tegangan distribusi primer ini diturunkan menjadi tegangan rendah 220/380 V yang akhirnya diterima pihak pengguna.⁹

⁹ Susilo, Rizal Tri. 2010. Sistem Tenaga Listrik. Diakses Juli 2022
<https://id.scribd.com/36440708/SISTEM-TENAGA-LISTRIK>

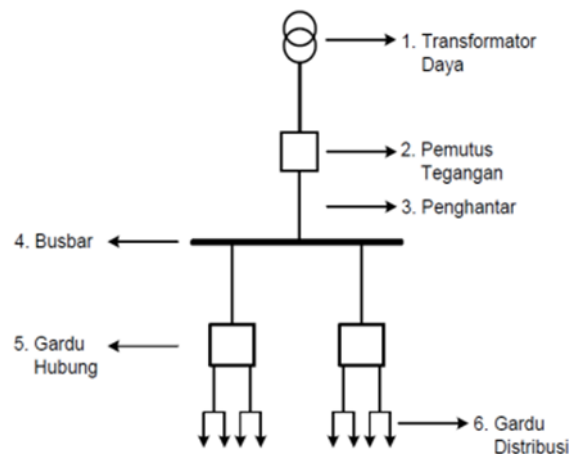
2.2 Jaringan Distribusi

Distribusi tenaga listrik adalah tahap akhir dalam pengiriman tenaga listrik ini merupakan proses membawa listrik dari sistem transmisi listrik menuju ke konsumen listrik. Gardu distribusi terhubung ke sistem transmisi dan menurunkan tegangan transmisinya dengan menggunakan transformator.

Distribusi ini dibagi menjadi dua bagian yaitu :

a. 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 transformator pada gardu distribusi untuk disalurkan ke pelanggan. Pada distribusi primer terdapat tiga jenis dasar yaitu sistem radial, Lup, dan sistem jaringan primer.



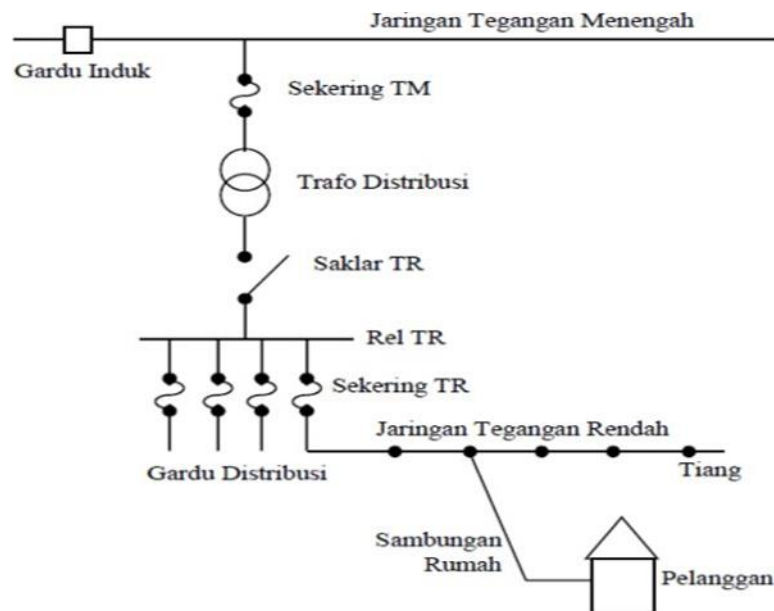
Gambar 2.2 Diagram Sistem Distribusi Primer

b. 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.²



Gambar 2.3. Single Line Diagram Jaringan Distribusi Sekunder

2.2.1 Sistem Operasi Jaringan Distribusi

Sistem operasi jaringan distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik secara keseluruhan, sistem distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya besar (Bulk Power Source) sampai kekonsumen. Pada

²Kadir, Abdul. 2000. *Distribusi dan Utilisasi tenaga listrik*. Jakarta : Universitas Indonesia.

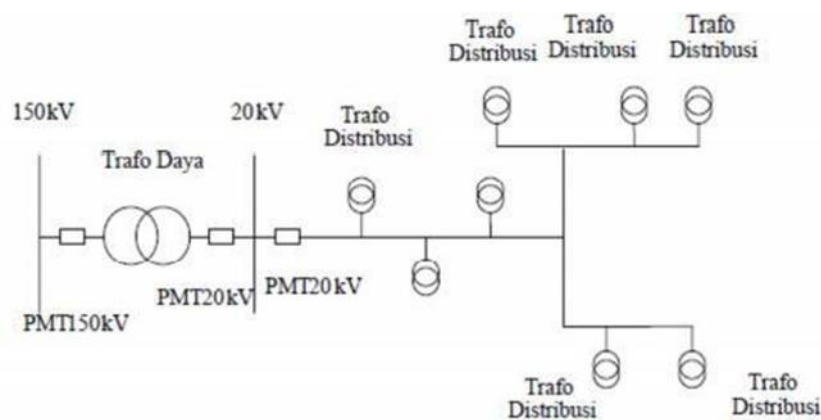
umumnya sistem distribusi tenaga listrik di Indonesia terdiri atas beberapa bagian, sebagai berikut :

1. Gardu Induk (GI)
2. Jaringan Tegangan Menengah (TM) / Distribusi Primer
3. Gardu Distribusi (GD)
4. Jaringan Tegangan Rendah (TR) / Distribusi Sekunder Gardu induk akan menerima daya dari jaringan transmisi kemudian menyalurkannya melalui jaringan distribusi primer menuju gardu distribusi.

Sistem jaringan distribusi terdiri dari dua bagian yaitu jaringan distribusi primer dan jaringan distribusi sekunder. Jaringan distribusi primer umumnya bertegangan menengah 20 kV. Tegangan tersebut kemudian diturunkan oleh transformator distribusi pada gardu distribusi menjadi tegangan rendah (220/380 volt) untuk selanjutnya disalurkan kepada konsumen melalui jaringan distribusi sekunder.

2.2.2 Sistem Distribusi Radial

Bentuk jaringan ini merupakan bentuk yang paling sederhana, banyak digunakan dan murah. Dinamakan radial karena saluran ini ditarik secara radial dari suatu titik yang merupakan sumber dari jaringan itu dan dicabang – cabangkan ke titik – titik beban yang dilayani.



Gambar 2.4 Sistem Distribusi Radial Catu Daya

berasal dari satu titik sumber dan karena adanya pencabangan – pencabangan tersebut, maka arus beban yang mengalir disepanjang saluran menjadi tidak sama sehingga luas penampang konduktor pada jaringan bentuk radial ini ukurannya tidak sama sehingga luas penampang konduktor pada jaringan bentuk radial ini ukurannya tidak sama karena arus yang paling besar mengalir pada jaringan yang paling dekat dengan gardu induk. Sehingga saluran yang paling dekat dengan gardu induk ini ukuran penampangnya relatif besar dan saluran cabang – cabangnya makin ke ujung dengan arus beban yang lebih kecil mempunyai ukuran konduktornya lebih kecil pula. Spesifikasi dari jaringan bentuk radial ini adalah :

1. Bentuknya sederhana.
2. Biaya investasinya murah.
3. Kualitas pelayanan dayanya relatif jelek, karena rugi tegangan dan rugi daya yang terjadi pada saluran relatif besar.
4. Kontinuitas pelayanan daya kurang terjamin sebab antara titik sumber dan titik beban hanya ada satu alternatif saluran sehingga bila saluran tersebut mengalami pemadaman total, yaitu daerah saluran sesudah atau dibelakang titik gangguan selama gangguan belum teratasi. Untuk melokalisir gangguan pada bentuk radial ini biasanya dilengkapi dengan peralatan pengaman, fungsinya untuk membatasi daerah yang mengalami pemadaman total, yaitu daerah saluran sesudah atau dibelakang titik gangguan selama gangguan belum teratasi.

2.2.3 Gangguan pada Jaringan Distribusi Tenaga Listrik

Dalam operasi sistem tenaga listrik sering terjadi gangguan yang dapat mengakibatkan terganggunya penyaluran tenaga listrik ke konsumen. Gangguan adalah suatu keadaan dari sistem penyaluran tenaga listrik yang menyimpang dari keadaan normal.

Berdasarkan ANSI/IEEE Std 100-1992 gangguan didefinisikan sebagai suatu kondisi fisis yang disebabkan kegagalan suatu perangkat, komponen atau suatu elemen untuk bekerja sesuai dengan fungsinya. Hubung singkat ialah suatu hubungan abnormal (termasuk busur api) pada impedansi yang relatif rendah terjadi

secara kebetulan atau disengaja antara dua titik yang mempunyai potensial yang berbeda. Pada dasarnya gangguan yang sering terjadi pada sistem distribusi saluran 20 kV menjadi dua macam yaitu gangguan dari dalam sistem dan gangguan dari luar sistem. Gangguan yang berasal dari dalam sistem dapat berupa kegagalan dari fungsi peralatan jaringan, kerusakan dari peralatan jaringan dan kerusakan dari peralatan pemutus beban. Gangguan yang berasal dari luar sistem dapat disebabkan oleh sentuhan pohon atau ranting pada penghantar, sambaran petir, manusia, binatang, cuaca dan lain-lain. Jenis gangguan yang terjadi pada jaringan distribusi dapat dibagi menjadi 2, yaitu :

- a. Dari lama gangguan :
 1. Gangguan permanen (dapat disebabkan oleh kerusakan peralatan, gangguan baru akan hilang setelah kerusakan diperbaiki).
 2. Gangguan temporer (gangguan yang tidak akan lama dan dapat normal atau hilang dengan sendirinya yang disusul dengan penutupan kembali peralatan hubungannya).
- b. Dari jenis gangguan :
 1. Gangguan satu fasa ke tanah
 2. Gangguan dua fasa ke tanah
 3. Gangguan fasa ke fasa
 4. Gangguan tiga fasa ke tanah

2.2.4 Karakteristik Jaringan Distribusi

Untuk daya yang sama, maka daya yang digunakan untuk menyalurkan akan naik dikarenakan rugi-rugi transmisi turun apabila tegangan transmisi ditinggikan. Namun, peninggian tegangan transmisi berarti juga menaikkan isolasi dan biaya peralatan dan gardu induk. Oleh karena itu pemilihan tegangan transmisi dilakukan dengan memperhitungkan daya yang disalurkan, jumlah rangkaian, jarak penyaluran, keandalan reliability, biaya peralatan untuk tegangan tertentu, serta tegangan-tegangan yang sekarang ada dan yang akan direncanakan. Kecuali itu, penentuan tegangan harus juga dilihat dari segi standarisasi peralatan yang ada. Penentuan tegangan merupakan bagian dari perancangan sistem secara keseluruhan. Di Indonesia, pemerintah telah menyeragamkan deretan tegangan

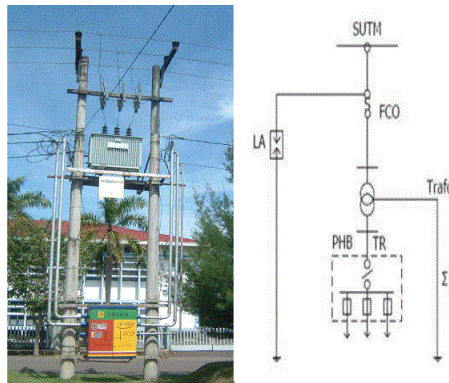
tinggi sebagai berikut: Tegangan nominal KV : 30 - 66 - 150 - 220 - 380 - 500. Tegangan tertinggi untuk perlengkapan KV: 36 - 72,5 - 170 - 245 - 420 - 525. Tegangan nominal 30 KV hanya diperkenankan untuk daerah asuhan dimana tegangan distribusi 20 KV tidak dipergunakan. Penentuan deretan tegangan diatas disesuaikan dengan rekomendasi International Electrotechnical Commission IEC. Menurut TIM PLN SPLN 121978 yang dikutip oleh Purwanto.

a. 1998: 6 Sistem jaringan distribusi tenaga listrik harus memenuhi karakteristik sebagai berikut:

1. Kontinuitas pelayanan yang baik, tidak sering terjadi pemutusan, baik karena gangguan maupun hal-hal yang direncanakan. Biasanya kontinuitas pelayanan terbaik diprioritaskan pada beban-beban yang dianggap vital dan sama sekali tidak dikehendaki mengalami pemadaman sekalipun dalam waktu yang relatif singkat.
2. Kualitas daya yang baik, antara lain meliputi: kapasitas daya yang memadai, tegangan yang selalu konstan dan frekuensi yang selalu konstan untuk arus bolak-balik.
3. Luasan dan penyebaran daerah beban yang dilayani seimbang. Khususnya untuk sistem tiga fasa, faktor keseimbangan atau kesimetrisan beban pada masing-masing fasa juga perlu diperhatikan.
4. Fleksibel dalam pengembangan dan perluasan daerah beban. Perencanaan sistem distribusi yang baik, tidak hanya bertitik tolak pada kesatuan beban yang sesaat, tetapi perlu diperhitungkan pula secara teliti kemungkinan pengembangan beban yang harus dilayani, bukan saja dalam hal penambahan kapasitas dayanya, tetapi dalam hal perluasan jaringan yang harus dilayani.
5. Kondisi dan situasi lingkungan, faktor ini merupakan pertimbangan dalam perencanaan untuk lingkungan bersangkutan, misalnya tentang konduktornya, konfigurasinya, tata letaknya dan pertimbangan dari segi estetika atau keindahannya.

2.1 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.



Gambar 2.6. Gardu Portal dan Bagan Satu Garis

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.

2.1 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.

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



Gambar 2.7. Gardu Tipe Cantol

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 2.8. Gardu Tipe 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 selengkapnyanya di pabrik, sehingga dapat langsung di angkut kelokasi dan disambungkan pada sistem distribusi yang sudah ada untuk difungsikan sesuai tujuannya.



Gambar 2.9 Gardu Tipe Kios

2.3.5 Gardu Distribusi Menurut Pemasangannya

Gardu distribusi menurut pemasangannya dibagi menjadi dua jenis, yaitu :

a. Gardu distribusi pasangan luar

Peralatan gardu induk pasang luar dipasang di udara terbuka. Berdasarkan carapemasangannya gardu distribusi pasangan luar dibagi menjadi empat bagian,yaitu :

1. *Pole Mounting* (Pemasangan di tiang)

Gardu distribusi dan peralatannya dipasang langsung pada tiang, carapemasangan ini cukup baik untuk transformator kecil sampai kapasitas 50KVA.

2. *H-Pole mounting* (Pemasangan di antara 2 tiang)

Gardu distribusi ini dipasang pada lengan antara dua tiang, cara pemasangan ini cocok untuk gardu berkapasitas sampai 200 KVA.

3. *Plat Form Mounting* (Pemasangan Bentuk Plat)

Gardu distribusi ini dipasang pada konstruksi tersendiri dari empat tiang untuk penempatan transformator, cara ini cocok untuk tempat dimana diperlukan peralatan yang membahayakan. Pemasangan ini sesuai dengan gardu berkapasitas 200KVA.

4. Pemasangan di Lantai

Gardu distribusi ini cocok untuk semua ukuran gardu, tetapi biasanya untuk kapasitas besar dari 250 KVA.

b. Gardu Distribusi Pasangan Didalam

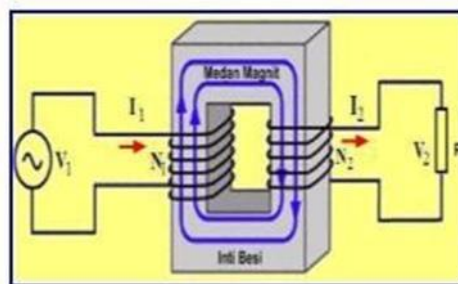
Gardu distribusi pasangan didalam memiliki jarak minimum yang harus dipenuhi sebagai persyaratan bangunan rumah transformator, yaitu :

1. Jarak dari sisi dinding pada satu sisi minimum 1,25 m.
2. Jarak dari sisi dinding pada dua sisi minimum 0,75 m.
3. Jarak dari sisi dinding pada tiga sisi minimum 100 m.
4. Jarak untuk sisi minimum 1,25 m.

2.4 Transformator

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 gandengan 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.

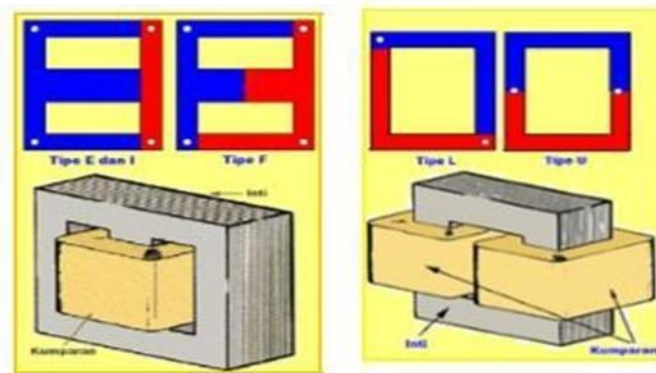


Gambar 2.10. Gambar Fluks Magnet Transformator

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 2.9), 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 2.9) 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.



Gambar 2.11. Transformator Tipe Cangkang (kiri) dan Tipe Inti (kanan)

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 transformator pada rangka (koker) selesai dilakukan.⁴

2.4.1 Transformator Daya 1 Fasa

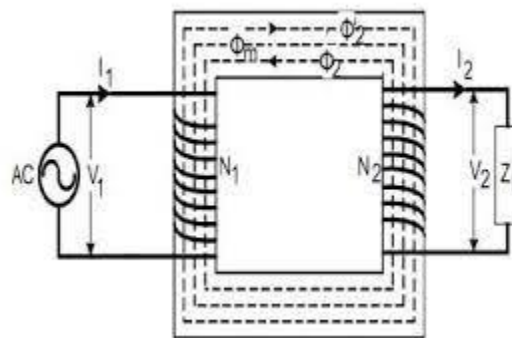
Transformator satu fasa adalah perangkat listrik yang menerima daya AC satu fasa dan mengeluarkan AC satu fasa. Ini digunakan dalam distribusi daya di

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

daerah non-perkotaan karena permintaan dan biaya keseluruhan lebih rendah daripada transformator distribusi 3-fasa.

Mereka digunakan sebagai transformator step-down untuk menurunkan tegangan rumah ke nilai yang sesuai tanpa perubahan frekuensi. Untuk alasan ini, biasanya digunakan untuk menyalakan peralatan elektronik di rumah. Artikel ini membahas gambaran umum tentang transformator 1 fasa. Rangkaian besi magnetik yang disebut "inti" biasanya digunakan untuk membungkus gulungan ini. Meskipun kedua kumparan ini diisolasi secara elektrik, keduanya terhubung secara magnetis.

Arus listrik ketika dilewatkan melalui primer transformator kemudian medan magnet dibuat, yang menginduksi tegangan pada transformator sekunder. Berdasarkan jenis aplikasinya, transformator satu fasa digunakan untuk menaikkan atau menurunkan tegangan pada output, Transformator ini biasanya merupakan transformator daya dengan efisiensi tinggi dan rugi-rugi rendah. Diagram transformator satu fasa ditunjukkan di bawah ini.



Gambar 2.12. Transformator Daya 1 Fasa

Transformator satu fasa bekerja berdasarkan prinsip Hukum Faraday Induksi Elektromagnetik. Biasanya, induksi timbal balik antara belitan primer dan sekunder bertanggung jawab atas operasi transformator pada transformator listrik. Transformator adalah perangkat statis yang mentransfer daya listrik dalam satu rangkaian ke rangkaian lain dengan frekuensi yang sama. Ini terdiri dari gulungan primer dan sekunder. Transformator ini beroperasi dengan prinsip induktansi timbal balik.

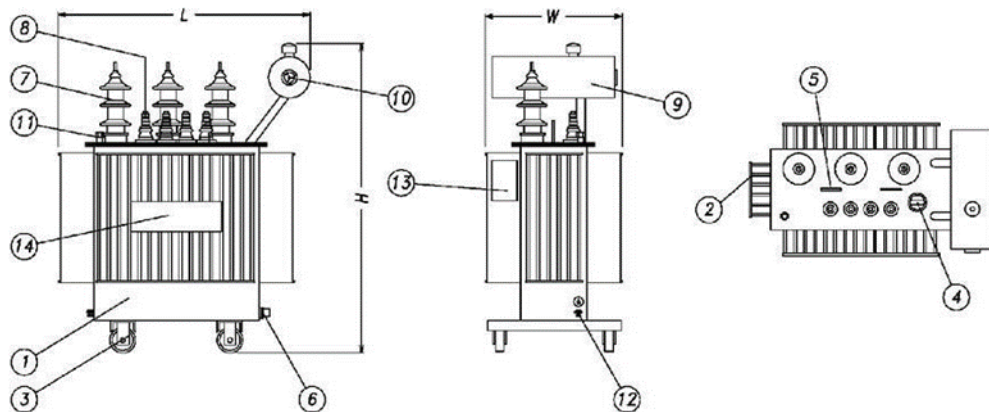
Ketika transformator primer dihubungkan ke suplai AC, arus mengalir dalam kumparan dan medan magnet terbentuk. Kondisi ini dikenal sebagai induktansi timbal balik dan aliran arus sesuai dengan Hukum Faraday induksi elektromagnetik. Ketika arus meningkat dari nol ke nilai maksimumnya, medan magnet menguat dan diberikan oleh $d\phi/dt$. Elektromagnet ini membentuk garis gaya magnet dan mengembang keluar dari kumparan membentuk jalur fluks magnet. Belitan kedua belitan dihubungkan oleh fluks magnet ini. Kekuatan medan magnet yang dihasilkan di inti bergantung pada jumlah belitan pada belitan dan jumlah arus. Fluks dan arus magnet berbanding lurus satu sama lain.

2.4.2 Transformator Daya 3 Fasa

Ditinjau dari jumlah fasanya transformator distribusi ada dua macam, yaitu transformator satu fasa dan transformator tiga fasa. Transformator tiga fasa mempunyai dua tipe yaitu tipe tegangan sekunder ganda dan tipe tegangan sekunder tunggal.

Sebuah transformator tiga fasa secara prinsip sama dengan sebuah transformator satu fasa, perbedaan yang paling mendasar adalah pada sistem kelistrikkannya yaitu sistem satu fasa dan tiga fasa. Sehingga sebuah transformator tiga fasa bisa dihubungkan 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”.



Gambar 2.13. Transformator Distribusi 3 fasa kelas 20 kV

Keterangan gambar diatas adalah :

1. Tanki minyak
2. Radiator
3. Roda
4. Tap Changer
5. Lubang untuk tarikan
6. Penyumbat keluaran minyak
7. Bushing tegangan tinggi
8. Bushing tegangan rendah
9. Konservator
10. Indikator minyak
11. Katup pengaman
12. Terminal pembumian
13. Name Plate
14. Merek transformator

2.4.3 Transformator Distribusi

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 berikut⁴ :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \dots\dots\dots(2.1)^4$$

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)
- a = perbandingan transformasi

2.4.4 Perhitungan Persentase Pembebanan Transformator

Menurut Frank D. Petruzella, dalam menghitung persentase pembebanan suatu transformator dapat diketahui dengan menggunakan persamaan sebagai berikut¹ :

$$\% \text{ Beban} = \frac{V_{\text{phasa-phasa}} \times I_{\text{rata-rata}} \times \sqrt{3}}{\text{Daya Transformator}} \times 100\% \dots\dots(2.2)^1$$

¹ Frank D. Petruzella, *Elektronik Industri*, Jakarta : Andi Offset, 2001.

⁴ Ibid

Rumus untuk menghitung Irata-rata adalah :

$$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \dots\dots\dots(2.3)^1$$

Keterangan :

I_{rata-rata} = rata-rata arus beban (A)

I_{FL} = Arus beban penuh (A)

I_r = arus fasa R (A)

I_s = arus beban S (A)

I_t = arus beban T (A)

2.4.5 Perhitungan Ketidakseimbangan Beban Transformator

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

Dimana besarnya arus fasa dalam keadaan seimbang (I) sama dengan besarnya arus rata – rata, maka koefisien a, b, dan c diperoleh dengan³ :

$$a. = \frac{I_R}{I_{rata-rata}}$$

$$b. = \frac{I_S}{I_{rata-rata}}$$

$$c. = \frac{I_T}{I_{rata-rata}}$$

$$\% \text{ ketidakseimbangan} = \frac{(|a-1|+|b-1|+|c-1|)}{3} \times 100\% \dots\dots (2.5)^3$$

³Moh.Dahlan, Akibat Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses Pada Transformator Distribusi, Kudus, Hal 4.

2.5 Pengukuran Arus dan Tegangan pada Gardu Distribusi

Pengukuran adalah suatu perbandingan antara suatu besaran dengan besaran lain yang sejenis secara eksperimen dan salah satu besaran dianggap sebagai standar. Dalam pengukuran listrik terjadi juga perbandingan, dalam perbandingan ini digunakan suatu alat bantu (alat ukur). Alat ukur ini sudah dikalibrasi, sehingga dalam pengukuran listrikpun telah terjadi perbandingan. Sebagai contoh pengukuran tegangan pada jaringan tenaga listrik dalam hal ini tegangan yang akan diukur diperbandingkan dengan penunjukkan dari Voltmeter.

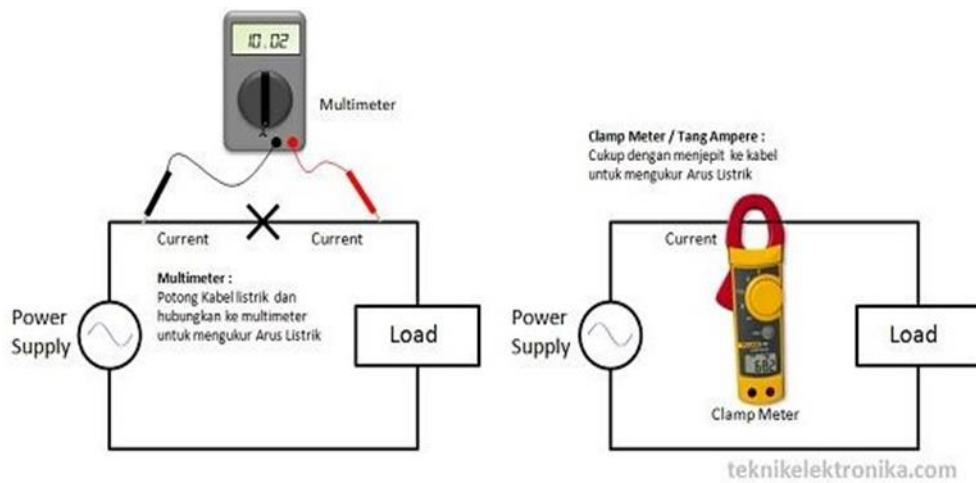
Pada pengukuran listrik dapat dibedakan dua hal, yaitu Pengukuran besaran listrik, seperti arus (Ampere), tegangan (Volt), daya listrik (Watt), dan pengukuran besaran nonlistrik, seperti suhu, kuat cahaya, tekanan, dll.

Dalam melakukan pengukuran, pertama harus ditentukan cara pengukurannya. Cara dan pelaksanaan pengukuran itu dipilih sedemikian rupa sehingga alat ukur yang ada dapat digunakan dan diperoleh hasil dengan ketelitian seperti yang dikehendaki. Juga cara itu harus semudah mungkin, sehingga diperoleh efisiensi setinggi-tingginya. Jika cara pengukuran dan alatnya sudah ditentukan, penggunaannya harus dengan baik pula. Setiap alat harus diketahui dan diyakini cara kerjanya. Dan harus diketahui pula apakah alat-alat yang akan digunakan dalam keadaan baik dan mempunyai kelas ketelitian sesuai dengan keperluannya. Jadi jelas pada pengukuran listrik ada tiga unsur penting yang perlu diperhatikan yaitu cara pengukuran, orang yang melakukan pengukuran, alat yang digunakan.

Lalu, pada pengukuran arus dan tegangan di sebuah transformator, pengukuran dapat terlaksana dengan menggunakan langkah kerja yang tepat dan alat yang digunakan adalah alat yang sesuai kebutuhan.

2.5.1 Alat Ukur yang Digunakan

Alat ukur tang ampere atau dikenal juga dengan sebutan Ampere meter jepit bekerja dengan prinsip, yang sama dengan inti primer sebuah transformator arus. Dengan alat ukur tang ampere ini, pengukuran arus dapat dilakukan tanpa memutuskan suplai listrik terlebih dahulu. Konstruksi dari alat ukur tang ampere ini diperlihatkan pada gambar 2.4 sebagai berikut :



Gambar 2.14. Penggunaan Tang Ampere

2.5.2 Langkah-langkah Meting Gardu Distribusi

Pengukuran arus dan tegangan atau disebut meting merupakan suatu kegiatan yang dilakukan untuk mengetahui besar arus dan tegangan pada setiap jurusan di gardu distribusi, serta pada rel busbar utamanya.

Untuk mengukur besarnya arus listrik ada berbagai macam Alat yang digunakan, tetapi alat yang paling mudah untuk digunakan yaitu memakai tang ampere karena kita tidak perlu melakukan pengkabelan dan fleksibel bisa dipakai dimana saja.

Adapun langkah-langkah penggunaan tang ampere, yaitu sebagai berikut :

1. Posisikan switch pada posisi Amperemeter (A), karena selain untuk mengukur arus, tang ampere juga bisa di pakai untuk mengukur tahanan dan tegangan.
2. Adjust tang ampere sehingga menunjukkan Angka nol.
3. Pilih skala yang paling besar dulu, bila hasil pengukuran lebih kecil maka pindahkan ke skala yang lebih kecil untuk hasil pengukuran yang lebih akurat.
4. Pilihlah jenis pengukuran yang akan kita lakukan, AC atau DC. Tapi, ada juga tang ampere yang hanya untuk mengukur AC saja, biasanya tang ampere jenis analog.

5. Kalungkan tang ampere ke salah satu kabel. Hasil pengukuran akan segera terlihat.
6. Geser html tahan untuk menahan hasil pengukuran ini.
7. Matikan posisi menahan, untuk melakukan pengukuran kembali.

2.6 Penghantar

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 sangat mahal harganya, maka secara ekonomis tembaga dan aluminium paling banyak digunakan.

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.⁶

2.7 Pengertian Beban

Beban adalah suatu sirkuit akhir pemanfaatan dari suatu jaringan tenaga listrik, yang berarti tempat terjadinya suatu perubahan energi dari energi listrik menjadi energi lainnya, seperti cahaya, panas, gerakan, magnet, dan sebagainya tetapi beban dapat pula berupa suatu sirkuit yang bukan pemanfaatan akhir dari suatu jaringan tenaga listrik, tetapi berupa jaringan listrik yang lebih kecil dan sederhana, seperti beban dari jaringan tegangan tinggi adalah suatu gardu induk,

⁶ PT.PLN (Persero). 1997. Standar Perusahaan Listrik Negara 50.
Jakarta : PT.PLN (Persero)

dimana gardu induk belum berupa sirkit akhir dari pemanfaatan energi listrik. Untuk jaringan distribusi primer, bebannya adalah setiap transformator distribusi tetapi untuk pembahasan laporan ini bebannya adalah sirkit akhir dari pemanfaatan, karena pembahasan dititik beratkan pada transformator distribusi jenis tiang portal. Beban dari transformator distribusi ini berupa feeder – feeder satu fasa tegangan rendah yang secara langsung dapat dihubungkan dengan sirkit akhir pemanfaatan seperti rumah tinggal, pertokoan, dan industri kecil.

Beban merupakan sirkit akhir pemanfaatan dari jaringan tenaga listrik yang harus dilayani oleh sumber tenaga listrik tersebut untuk diubah menjadi bentuk energi lain. Oleh karena itu, pelayanan terhadap beban haruslah terjamin kontinuitasnya untuk menjaga kehandalan dari sistem tenaga listrik. Untuk mencapai keadaan yang handal tersebut, suatu sistem tenaga listrik haruslah dapat mengatasi semua gangguan yang terjadi tanpa melakukan pemadaman terhadap bebannya.

2.8 Rugi Akibat Adanya Arus Pada Penghantar Netral Transformator

Sebagai akibat dari beban yang tidak seimbang tiap-tiap fasa pada sisi sekunder transformator (fasa R, S, dan T) mengalirlah arus di penghantar netral transformator. Arus yang mengalir pada penghantar netral transformator ini menyebabkan rugi-rugi. Untuk menghitung rugi-rugi pada penghantar netral dapat dirumuskan sebagai berikut.⁸

$$PN = IN^2 + RN \dots \dots \dots (2.6)^8$$

Dimana,

PN = rugi rugi pada penghantar netral transformator (watt)

IN = arus pada penghantar netral (A)

RN = tahanan penghantar netral

⁸ Zuhail. 1991. *Dasar Tenaga Listrik*. Bandung : Penerbit ITB

2.9 Ketidakseimbangan Beban

Yang dimaksud dengan keadaan seimbang adalah suatu keadaan dimana :

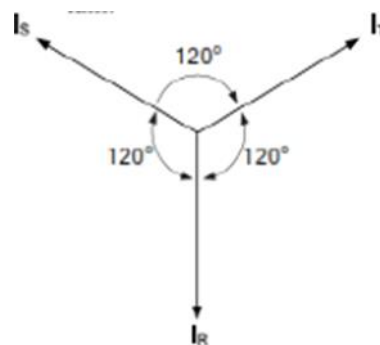
1. Ketiga vektor arus atau tegangan sama besar
2. Ketiga vektor saling membentuk sudut 120° satu sama lain.

Sedangkan yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang adalah keadaan dimana salah satu atau kedua syarat keadaan 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.
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 2.15 Vektor Diagram Arus Dalam Keadaan Seimbang

Gambar 2.13 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

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

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

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

Disubstitusikan ke persamaan :

$$\begin{aligned} I_N &= I_A + I_B + I_C \dots \dots \dots (2.7)^7 \\ &= I \angle -\theta + I \angle -120^\circ - \theta + I \angle -240^\circ - \theta \\ &= I \cos(-\theta) + jI \sin(-\theta) + I \cos(-\theta - 120^\circ) + jI \sin(-\theta - 120^\circ) + I \cos(-\theta - 240^\circ) \\ &= I[\cos(-\theta) + \cos(-\theta - 120^\circ) + I \cos(-\theta - 240^\circ)] + jI[\sin(-\theta) + \sin(-\theta - 120^\circ) + \sin(-\theta - 240^\circ)] \end{aligned}$$

Dengan menggunakan persamaan identitas trigonometri :

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

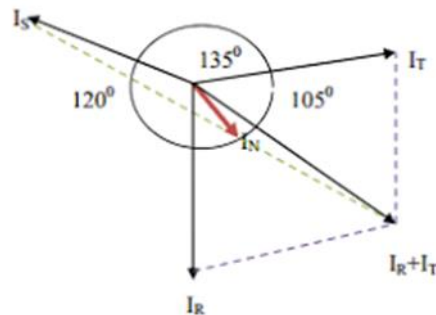
$$\sin(\alpha - \beta) = \sin \alpha \cos \beta - \cos \alpha \sin \beta$$

Masukkan identitas trigonometri ke persamaan :

$$\begin{aligned} I_N &= I[\cos(-\theta) + \cos(-\theta)\cos 120^\circ + \sin(-\theta)\sin 120^\circ + \\ &\quad \cos(-\theta)\cos 240^\circ + \sin(-\theta)\sin 240^\circ] + jI[\sin(-\theta) + \\ &\quad \sin(-\theta)\cos 120^\circ - \cos(-\theta)\sin 120^\circ + \sin(-\theta)\cos 240^\circ - \\ &\quad \cos(-\theta)\sin 240^\circ] \end{aligned}$$

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

$$I_N = 0 \text{ A (pada saat keadaan beban seimbang)}$$



Gambar 2.16 Vektor Diagram Arus Dalam Keadaan Tidak Seimbang

Sedangkan pada gambar 2.14 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.⁷

2.10 Prosedur Perhitungan

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

1. Mengumpulkan data hasil pengukuran gardu distribusi PB794.
2. Memasukkan nilai tegangan pada fasa R, S, dan T serta kapasitas transformator untuk menentukan persentase pembebanan transformator distribusi.
3. Menghitung persentase pembebanan transformator distribusi pada setiap fasa.
4. Menghitung ketidakseimbangan transformator distribusi.

⁷ Setiadji, J.S., Muchmudsyah, T., & Isnanto, Y. (2008). Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses Pada Transformator Distribusi. Surabaya

5. Menghitung arus netral yang mengalir pada transformator distribusi akibat beban tidak seimbang.
6. Setelah didapat nilai arus pada netral (IN), langkah selanjutnya masukkan nilai c arus pada netral dan tahanan penghantar netral untuk menentukan rugi daya akibat arus yang mengalir pada netral (PN).
7. Menghitung rugi daya akibat arus yang mengalir pada netral.
8. Jika rugi daya belum didapatkan maka kembali pada tahap sebelumnya, jika rugi daya sudah didapatkan maka lanjut pada tahap berikutnya.
9. Tahapan selesai.