



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik⁹

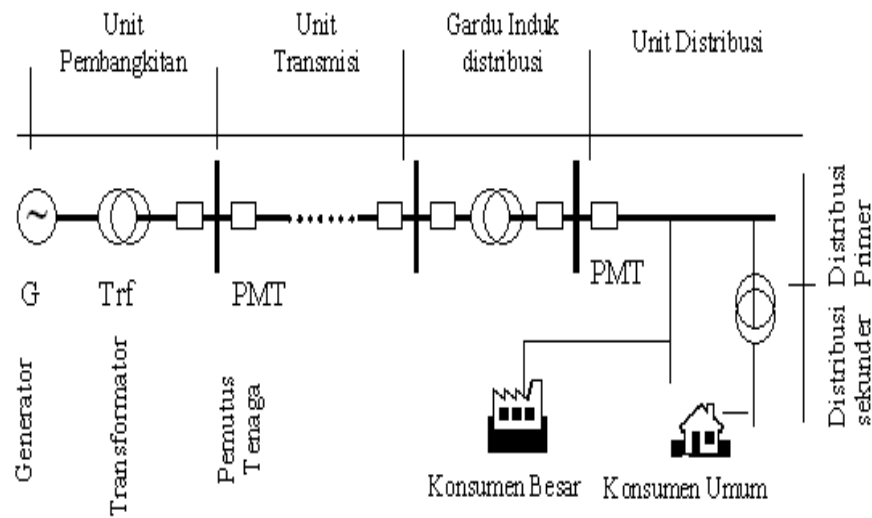
Sistem tenaga listrik merupakan suatu sistem terpadu yang terbentuk oleh hubungan-hubungan peralatan dan komponen-komponen listrik seperti generator, transformator, jaringan tenaga listrik dan beban listrik.

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

⁹ Susilo, Rizal Tri. 2010. *Sistem Tenaga Listrik*. Diakses Juli 2019.

<https://id.scribd.com/doc/36440708/SISTEM-TENAGA-LISTRIK>



Gambar 2.1. Single Line Diagram 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 trafo.

Distribusi ini dibagi menjadi dua bagian yaitu :

a. Distribusi Primer :

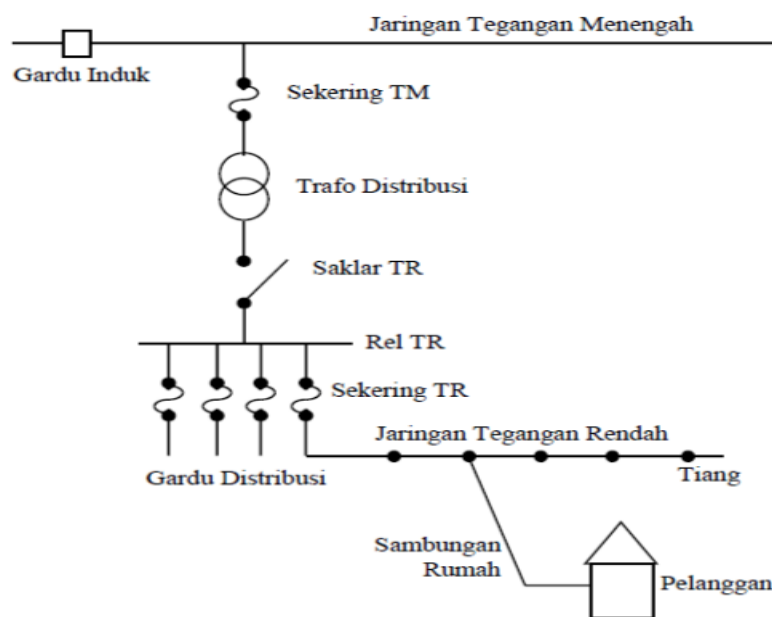
Yaitu jaringan distribusi yang berasal dari jaringan transmisi yang diturunkan tegangannya di Gardu Induk (GI) menjadi Tegangan Menengah (TM) dengan nominal tegangan 20 kV yang biasa disebut JTM (Jaringan Tegangan Menengah) lalu disalurkan ke lokasi-lokasi pelanggan listrik kemudian di turunkan tegangannya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

b. Distribusi Sekunder :

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.



Gambar 2.2. Single Line Diagram Jaringan Distribusi Sekunder

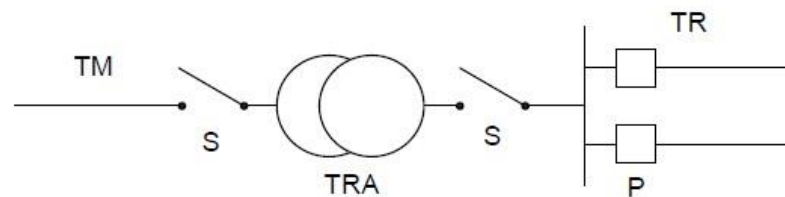
2.3 Gardu Distribusi⁵

Sebuah gardu distribusi pada dasarnya merupakan tempat memasang transformator distribusi beserta perlengkapannya. Sebagaimana diketahui, transformator distribusi berfungsi untuk menurunkan tegangan menengah (di

⁵ PT. PLN (Persero). (2010). *Buku 4 Standar Konstruksi Gardu Distribusi dan Gardu Hubung Tenaga Listrik*. Jakarta.

Indonesia 20 kV) menjadi tegangan rendah (di Indonesia 220/380V). Dengan demikian transformator distribusi merupakan suatu penghubung antara jaringan tegangan menengah dan jaringan tegangan rendah. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa di dalam sebuah gardu distribusi akan “masuk” saluran tegangan menengah dan “keluar” saluran tegangan rendah.

Paling banyak gardu distribusi hanya berisi satu transformator sebagaimana terlihat pada gambar 2.14.



Gambar 2.3. Skema Gardu Distribusi

Keterangan:

TRA = Transformator Distribusi

P = Proteksi

S = Saklar atau Pemisah

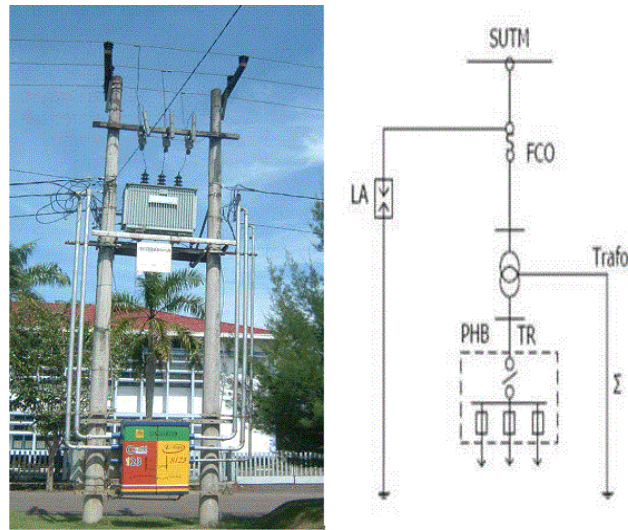
TM = Tegangan Menengah

TR = Tegangan Rendah

Kabel tegangan menengah memasuki gardu dan melalui sebuah saklar atau pemisah dihubungkan pada transformator. Saklar atau pemisah pada sisi tegangan rendah sering tidak terpasang dan langsung disambungkan pada proteksi yang berupa sekring.

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.



Gambar 2.4. 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.

2.3.2 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.

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 2.5. 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 2.6 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.

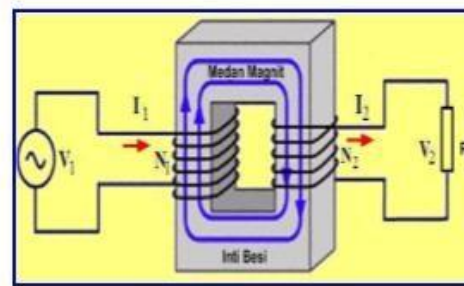


Gambar 2.7 Gardu Tipe Kios

2.4 Transformator⁴

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 3.1)



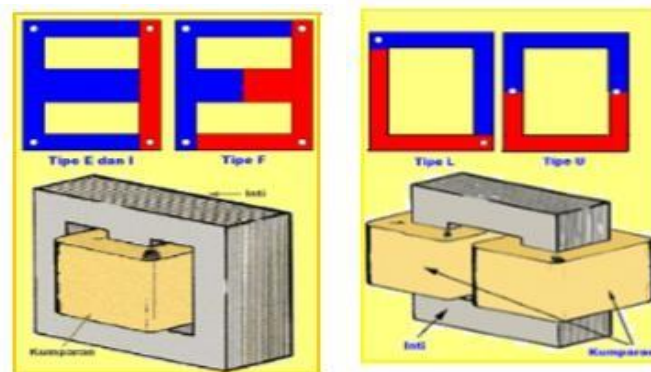
Gambar 2.8. Gambar Fluks Magnet Transformator

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.

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

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 2.9. Transformator Tipe Cangkang (kiri) dan Tipe Inti (kanan)

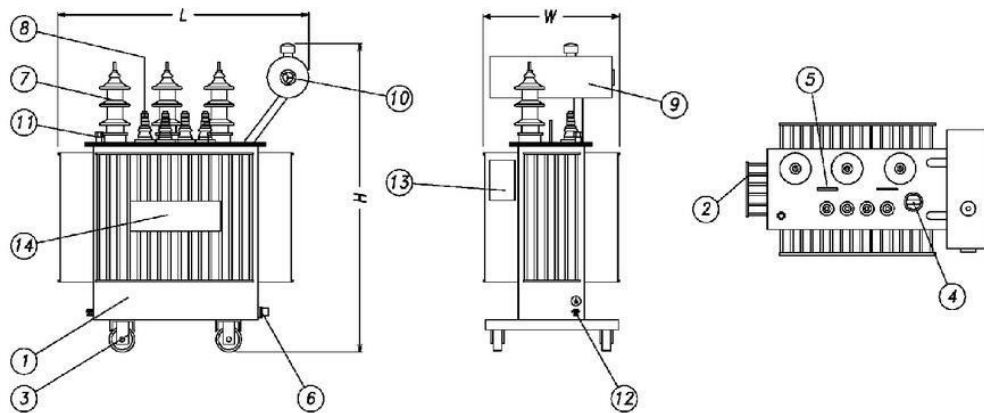
Tujuan utama penyusunan inti secara berlapis ini adalah untuk mengurangi kerugian energy akibat “Eddy Current” (arus pusar), dengan cara laminasi seperti ini maka ukuran jerat induksi yang berakibat terjadinya rugi energy di dalam inti bias dikurangi. Proses penyusunan inti transformator biasanya dilakukan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

2.4.1 Transformator Daya 3 fasa

Ditinjau dari jumlah fasanya trafo distribusi ada dua macam, yaitu trafo satu fasa dan trafo tiga fasa. Trafo 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 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”.



Gambar 2.10. Trafo 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 trafo

2.4.2 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 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)
- α = perbandingan transformasi

2.4.3 Perhitungan Persentase Pembebanan Transformator

Untuk dapat menghitung pembebanan transformator dapat menggunakan rumus dibawah ini :

$$\text{KVA Beban} = (I_R \cdot V_{R-N}) + (I_S \cdot V_{S-N}) + (I_T \cdot V_{T-N}) \dots \dots \dots (2.2)$$

Keterangan :

- I_R = Arus fasa R
- V_{R-n} = Tegangan fasa R terhadap Netral
- I_S = Arus fasa S
- V_{S-n} = Tegangan fasa S terhadap Netral
- I_T = Arus fasa T
- V_{T-n} = Tegangan fasa T terhadap Netral

$$\% \text{ Beban Trafo} = \frac{\text{KVA Beban}}{\text{KVA Trafo}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.3)$$

2.4.4 Perhitungan Ketidakseimbangan Beban Trafo³

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

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

$$a = \frac{I_R}{I_{rata-rata}}$$
$$b = \frac{I_S}{I_{rata-rata}}$$
$$c = \frac{I_T}{I_{rata-rata}}$$

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

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

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 penunjukan dari Voltmeter.

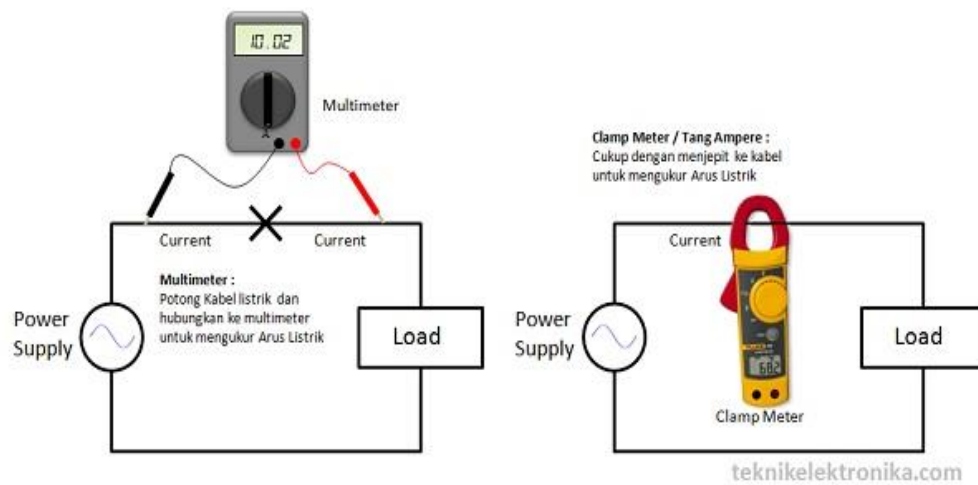
Pada pengukuran listrik dapat dibedakan dua hal, yaitu Pengukuran besaran listrik, seperti arus (*Ampere*), tegangan (*Volt*), daya listrik (*Watt*), dan pengukuran besaran nonlistrik, seperti suhu, kuat cahaya, tekanan, dll.

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 2.11. 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 handle 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.

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, dimana gardu induk belum berupa sirkuit akhir dari pemanfaatan energi listrik. Untuk jaringan distribusi primer, bebannya adalah setiap transformator distribusi tetapi untuk pembahasan laporan ini bebannya adalah sirkuit 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 sirkuit akhir pemanfaatan seperti rumah tinggal, pertokoan, dan industri kecil.

Beban merupakan sirkuit 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.

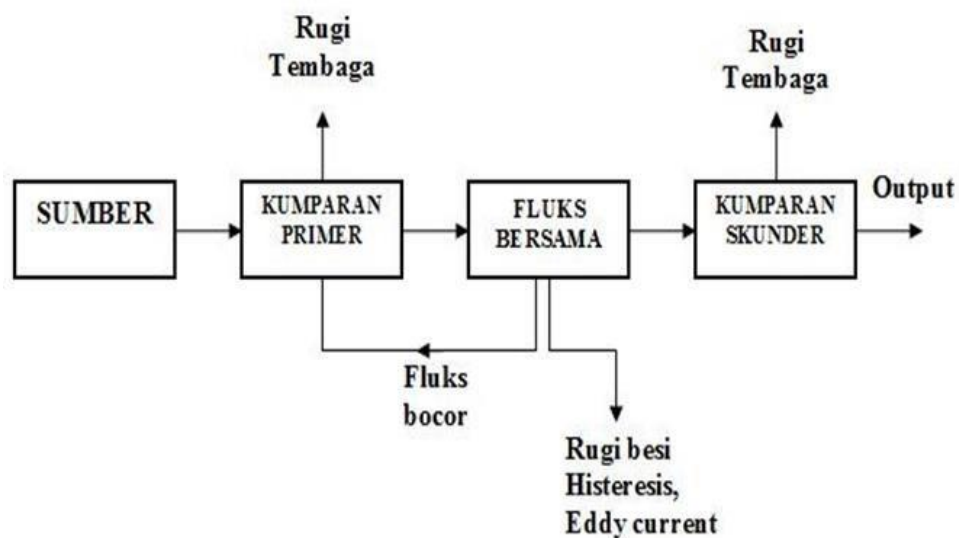
2.8 Rugi – rugi Transformator

Menurut Drs. Yon Rijono rugi-rugi daya transformator berupa rugi inti atau rugi besi dan rugi tembaga yang terdapat pada kumparan primer maupun sekunder. Untuk mengurangi rugi besi haruslah diambil inti besi yang penampangnya cukup besar agar fluks magnet mudah mengalir di dalamnya. Untuk memperkecil rugi tembaga, harus diambil kawat tembaga yang penampangnya cukup besar untuk mengalirkan arus listrik yang diperlukan. Rugi inti terdiri dari rugi arus eddy dan rugi histerisis. Rugi arus eddy timbul

akibat adanya arus pusar pada inti yang menghasilkan panas. Adapun arus pusar inti ditentukan oleh tegangan induksi pada inti yang menghasilkan perubahan- perubahan fluks magnet.

Rugi histerisis merupakan rugi tenaga yang disebabkan oleh fluks magnet bolak-balik pada inti.

Gambar di bawah ini adalah diagram rugi-rugi pada transformator:



Gambar 2.12. Diagram Rugi – rugi Transformator¹⁰

2.8.1 Rugi Tembaga (P_{Cu})¹⁰

Rugi yang disebabkan arus beban mengalir pada kawat tembaga dapat sebagai:

$$P_{cu} = I^2 R \dots \dots \dots (2.6)$$

Karena arus beban berubah – ubah, rugi tembaga juga tidak konstan bergantung pada beban.

¹⁰ Zuhail. 1991. *Dasar Tenaga Listrik*. Bandung : Penerbit ITB

2.8.2 Rugi Besi (P_i)

Rugi besi terdiri atas:

- 1) Rugi Histerisis, yaitu rugi yang disebabkan fluks bolak-balik pada inti besi yang dinyatakan sebagai:

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{maks}^{1.6} \text{ watt}$$

Keterangan

K_h = konstanta

B_{maks} = fluks maksimum (weber)

- 2) Rugi arus eddy, yaitu rugi yang disebabkan arus pusar pada inti besi.

Dirumuskan sebagai :

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{maks}^{1.6} \text{ watt}$$

$$B_M = \frac{\Phi_M}{A}$$

Dimana,

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

Dan

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

Jadi, rugi besi (rugi inti) adalah :

$$P_i = P_h + P_e$$

Untuk mengetahui rugi – rugi pada transformator dapat dilihat pada tabel 2.1 yang berdasarkan SPLN 50 tahun 1997.

Tabel 2.1 Nilai Rugi – rugi Transformator Distribusi⁶

KVA Rating	Rugi Besi (watt)	Rugi Tembaga (watt)
25	115	700
50	190	1100
100	320	1750
160	400	2000
200	550	2850
315	770	3900
400	930	4600
680	1300	6500
800	1950	10200
1000	2300	12100
1250	2700	15000
1600	3300	18100

2.9 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:

$$P_N = I_N^2 + R_N \dots \dots \dots (2.7)$$

dimana

P_N = rugi rugi pada penghantar netral transformator (watt)

I_N = arus pada penghantar netral (A)

R_N = tahanan penghantar netral

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

PT. PLN (Persero)

2.10 Ketidakseimbangan Beban¹

Yang dimaksud dengan keadaan seimbang adalah suatu keadaan dimana :

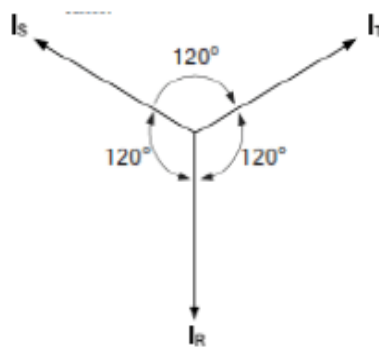
1. Ketiga vektor arus atau tegangan sama besar
2. Ketiga vektor saling membentuk sudut 120° satu sama lain.

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 2.13. Vektor Diagram Arus Dalam Keadaan Seimbang

¹ Saputra, Erfan. 2015. *Analisa Pemerataan Beban Gardu Distribusi U. 046 PT.PLN (Persero) Rayon Ampera Palembang*. Tidak Diterbitkan



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 :

$$\begin{aligned} I_N &= I_A + I_B + I_C \dots\dots\dots(2.8) \\ &= I \angle -\theta + I \angle -120^\circ - \theta + I \angle -240^\circ - \theta \\ &= I \cos(-\theta) + jI \sin(-\theta) + I \cos(-\theta - 120^\circ) + jI \sin(-\theta - 120^\circ) + I \cos(-\theta - 240^\circ) \\ &= I[\cos(-\theta) + \cos(-\theta - 120^\circ) + I \cos(-\theta - 240^\circ)] + jI[\sin(-\theta) + \sin(-\theta - 120^\circ) + \sin(-\theta - 240^\circ)] \end{aligned}$$

Dengan menggunakan persamaan identitas trigonometri :

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

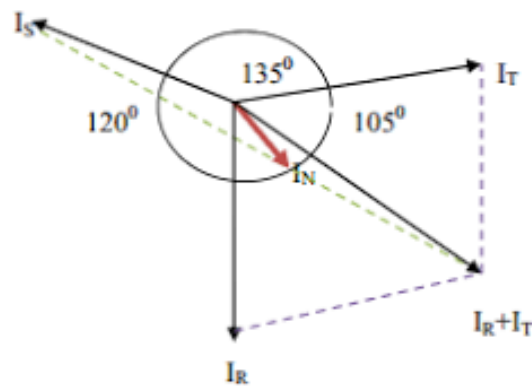
$$\sin(\alpha - \beta) = \sin \alpha \cos \beta - \cos \alpha \sin \beta$$

Masukkan identitas trigonometri ke persamaan :

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

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

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



Gambar 2.14. 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.