

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Sistem distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar (*bulk power source*) sampai ke konsumen.

Fungsi distribusi tenaga listrik adalah:

- a. Pembagian atau penyaluran tenaga listrik ke beberapa tempat (pelanggan)
- b. Merupakan sub sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan pelanggan, karena catu daya pada pusat-pusat beban (pelanggan) dilayani langsung melalui jaringan distribusi

Tenaga listrik yang dihasilkan oleh pembangkit listrik besar dengan tegangan dari 11kV sampai 24kV dinaikkan tegangannya oleh gardu induk dengan transformator penaik tegangan menjadi 70kV, 154kV, 220kV atau 500kV kemudian disalurkan melalui saluran transmisi. Tujuan menaikkan tegangan ialah untuk memperkecil kerugian daya listrik pada saluran transmisi, dimana dalam hal ini kerugian daya adalah sebanding dengan kuadrat arus yang mengalir (I^2R). Dengan daya yang sama bila nilai tegangannya diperbesar, maka arus yang mengalir semakin kecil sehingga kerugian daya juga akan kecil pula.

Dari saluran transmisi, tegangan diturunkan lagi menjadi 20 kV dengan transformator penurun tegangan pada gardu induk distribusi, kemudian dengan sistem tegangan tersebut penyaluran tenaga listrik dilakukan oleh saluran distribusi primer. Dari saluran distribusi primer inilah gardu-gardu distribusi mengambil tegangan untuk diturunkan tegangannya dengan trafo distribusi menjadi sistem tegangan rendah, yaitu 220/380 Volt. Selanjutnya disalurkan oleh saluran distribusi sekunder ke konsumen-konsumen. Dengan ini jelas bahwa sistem distribusi merupakan bagian yang penting dalam sistem tenaga listrik secara keseluruhan.¹¹

¹¹ Hage. 2008. *Sistem Distribusi Tenaga Listrik*. <https://dunia-listrik.blogspot.com/2008/12/sistem-distribusi-tenaga-listrik.html>

Keandalan suatu sistem penyaluran distribusi tenaga listrik tergantung pada model susunan saluran, pengaturan operasi, dan prosedur pemeliharaan serta koordinasi peralatan pengaman. Tingkat keandalan kontinuitas penyaluran bagi konsumen tenaga listrik ialah berapa lama waktu padam yang terjadi dan berapa banyak waktu yang diperlukan untuk memulihkan kembali penyaluran tenaga listrik. Tingkat keandalan dalam pelayanan tenaga listrik dapat dibedakan menjadi lima hal, yaitu (SPLN 523, 1983:5):

Tingkat 1: Dimungkinkan padam berjam-jam yaitu waktu yang diperlukan untuk mencari dan memperbaiki bagian yang rusak karena adanya gangguan.

Tingkat 2: Padam beberapa jam yaitu waktu yang diperlukan untuk mengirim petugas ke lapangan, melokalisir gangguan dan melakukan manipulasi untuk dapat menghidupkan sementara dari arah atau saluran yang lain.

Tingkat 3: Padam beberapa menit, manipulasi oleh petugas yang *stand by* di gardu atau dilakukan deteksi/pengukuran dan pelaksanaan manipulasi jarak jauh.

Tingkat 4: Padam beberapa detik, pengaman dan manipulasi otomatis.

Tingkat 5: Tanpa padam, dilengkapi instalasi cadangan terpisah dan otomatis.³

2.2 Bagian Utama Saluran Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi tenaga listrik memiliki bagian-bagian dan peralatannya sendiri, yaitu sebagai berikut:

1. Gardu Induk (GI)

Gardu Induk adalah stasiun transmisi bisa diibaratkan sebagai stasiun atau terminal dalam transportasi listrik, dimana fungsi utamanya yaitu mentransformasikan tegangan. Beberapa fungsi penting dari Gardu Induk pada saluran distribusi meliputi:

a. Mentrasnformasikan tegangan (menaikkan atau menurunkan tegangan, sebagai contoh dari tegangan generator di pembangkitan dinaikkan ke tegangan

³ Erhaneli, "EVALUASI KEANDALAN SISTEM DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK BERDASARKAN INDEKS KEANDALAN SAIDI DAN SAIFI PADA PT. PLN (PERSERO) RAYON BAGAN BATU TAHUN 2015". Jurnal Teknik Elektro ITP, Volume 5, No.2, Juli 2016, Hal. 121-122

ekstra tinggi atau menurunkan tegangan, dari tegangan ekstra tinggi diturunkan menjadi tegangan tinggi atau tegangan menengah).

b. Mengatur aliran daya listrik dari saluran transmisi ke saluran transmisi lainnya kemudian mendistribusikan ke konsumen.

c. Pengukur, pengawas operasi serta pengaman sistem tenaga listrik.

d. Pengaturan pelayanan beban ke gardu induk lain dan ke gardu distribusi.

e. Sebagai tempat untuk menurunkan tegangan transmisi menjadi tegangan distribusi.

f. Sarana telekomunikasi.

Kompartemen utama pada Gardu Induk meliputi transformator, pemutus tenaga (PMT), pemisah (PMS), *lightning arrester*, trafo arus, *relay* proteksi dan trafo pemakaian sendiri (PS)

2. Gardu Distribusi

Gardu distribusi adalah komponen penting dalam penyaluran pada sistem distribusi tenaga listrik yang berfungsi untuk menurunkan tegangan dari tegangan menengah ke tegangan rendah untuk disalurkan dan digunakan oleh pelanggan. Di dalam gardu distribusi terdapat beberapa peralatan listrik seperti panel hubung bagi (PHB) TM, panel hubung bagi (PHB) TR, dan transformator distribusi (20 kV/ 380 V). Secara garis besar gardu distribusi dibagi ke dalam beberapa jenis menurut pemasangan konstruksi dan penggunaannya.

Menurut pemasangannya gardu distribusi dibagi menjadi gardu pasangan dalam (gardu beton/embok) dan pasangan luar (gardu portal/gardu cantol). Menurut penggunaannya ada gardu penggunaan umum (pelanggan listrik dengan tegangan rendah) dan gardu penggunaan khusus (untuk satu pelanggan listrik dengan tegangan menengah).

3. Gardu Hubung

Jaringan distribusi tenaga listrik yang biasa disalurkan oleh penyulang-penyulang dari gardu induk ke gardu distribusi bukan tidak mungkin mengalami gangguan. Untuk menangani gangguan yang menyebabkan tidak tersalurkan listrik pada gardu distribusi, maka dibuatlah gardu hubung yang menghubungkan

penyulang-penyulang dan gardu distribusi untuk manuver pengendali beban jika terjadi gangguan listrik.

Gardu hubung atau *switching substation* adalah gardu yang berfungsi sebagai sarana manuver pengendali beban listrik jika terjadi gangguan aliran listrik, program pelaksanaan pemeliharaan atau dengan maksud untuk mempertahankan kontinuitas pelayanan.

Gardu hubung terdiri dari rangkaian saklar beban (Load Break Switch / LBS), dan atau pemutus tenaga terhubung paralel. Gardu Hubung juga dapat dilengkapi sarana pemutus tenaga pembatas beban pelanggan khusus tegangan menengah. Konstruksi gardu hubung sama dengan konstruk gardu distribusi tipe beton. Pada ruang dalam gardu hubung dapat dilengkapi dengan ruang untuk gardu distribusi yang terpisah dan ruang untuk sarana pelayanan kontrol jarak jauh.

4. Konfigurasi Jaringan Primer

Konfigurasi jaringan primer pada suatu sistem jaringan distribusi sangat menentukan mutu pelayanan yang akan diperoleh khususnya mengenai kotinuitas pelayanannya. Adapun jenis jaringan primer yang biasa digunakan adalah jaringan distribusi pola radial, pola loop, pola grid dan pola spindle.

Jaringan distribusi primer (tegangan menengah) dan juga jaringan distribusi sekunder (tegangan rendah) pada umumnya beroperasi secara radial. Jaringan dengan sistem ring (loop) sesungguhnya bisa mengurangi rugi-rugi dalam jaringan, tetapi memerlukan alat sistem proteksi yang lebih canggih dan juga relatif mahal untuk jaringan distribusi.

Secara umum baik buruknya sistem penyaluran dan distribusi tenaga listrik terutama adalah ditinjau dari kontinuitas pelayanan, kualitas daya, perluasan dan penyebaran, fleksibilitas, kondisi dan dituasi lingkungan, serta pertimbangan ekonomis.

5. Pusat Pengatur Saluran Distribusi

Kegiatan operasi jaringan pada saluran distribusi untuk suatu kawasan tertentu dikordinir oleh pusat pengatur distribusi. Pusat pengatur distribusi terutama mengkoordinir operasi jaringan tegangan menengah. Sedangkan untuk jaringan tegangan rendah termasuk sambungan rumah dan instalasi pelanggan, operasinya

sebagian besar meliputi pekerjaan mengatasi gangguan, pelaksanaannya dilakukan oleh dinas gangguan yang tempatnya tersebar di berbagai tempat. Dikarenakan jaringan distribusi jangkauannya luas serta melibatkan banyak peralatan jika dibandingkan jaringan transmisi, sedangkan persoalan operasional terutama adalah mengatasi gangguan, maka pusat pengatur distribusi dibantu oleh dinas gangguan beserta mobil unit yang bergerak untuk mengatasi gangguan dalam jaringan atas perintah dan petunjuk pusat pengatur distribusi.

Disamping berfungsi untuk mengatasi gangguan, pusat pengatur pada saluran distribusi juga harus mengamati masalah masalah operasional lainnya yang terjadi dalam sistem operasi seperti:

- a. Analisa gangguan yang terjadi didalam sistem
- b. Mengkoordinir pekerjaan pemeliharaan dalam jaringan agar sedapat mungkin dicegah terjadinya pemadaman aliran listrik bagi pelanggan.
- c. Mengamati dan menganalisa perkembangan beban dalam setiap bagian jaringan distribusi agar dapat memberikan masukan yang tepat bagi perencanaan pengembangan jaringan distribusi.
- d. Mengamati dan menganalisa profil tegangan jaringan untuk selanjutnya memberikan saran-saran perbaikan.
- e. Mengamati dan menganalisa rugi-rugi yang terjadi dalam jaringan distribusi untuk kemudian melakukan langkah-langkah operasi agar rugi-rugi dapat dikurangi, misalnya melakukan manuver dalam jaringan.¹³

2.3 Distribution Supply Substation

Distribution Supply Substation (DSS) atau gardu distribusi di LRT Sumatera Selatan adalah sebuah peralatan catu daya dan merupakan bagian dari sistem distribusi daya yang berada di *signal hut*. DSS berfungsi untuk mengubah tegangan masukan 20kVAC menjadi tegangan 380/220VAC yang digunakan untuk

¹³ Rakhman, Alief. 2020. *Saluran Distribusi pada Sistem Tenaga Listrik*. <https://rakhman.net/electrical-id/saluran-distribusi-pada-sistem-tenaga-listrik/> (diakses 08 September 2020)

mensuplai tegangan kontrol pada sistem kereta dan untuk peralatan persinyalan dan telekomunikasi.

Terdapat beberapa gardu yang mensuplai tegangan untuk persinyalan LRT Sumatera Selatan yaitu:

- a. KM 2.7 dengan daerah suplai Bandara, KM 2.7, Asrama Haji
- b. DMG dengan daerah suplai Pundi Kayu, RSUD, Garuda Dempo, Demang
- c. AMP dengan daerah suplai Bumi Sriwijaya, Dishub, Cinde, Ampera
- d. DEPO dengan daerah suplai Polresta, Jakabaring, DJKA, OCC

Pada kubikel MV 20kV terdapat *Load Breaking Switch (LBS)* yang merupakan suatu alat pemutus atau penyambung sirkuit pada sistem distribusi listrik dalam keadaan berbeban. LBS mirip dengan alat pemutus tenaga (PMT) atau *Circuit Breaker (CB)* dan biasanya dipasang dalam saluran distribusi listrik. LBS digunakan untuk pemutusan lokal apabila terjadi gangguan atau ingin dilakukan perawatan jaringan distribusi pada daerah tertentu sehingga daerah yang tidak mengalami gangguan atau perawatan tidak mengalami pemadaman listrik. Pada saat terjadi bencana atau gangguan listrik seperti gempa, angin ribut, pohon tumbang, dan lain-lain sering terjadi gangguan pada jaringan distribusi seperti kabel tumbang. Pada kasus seperti itu diperlukan tindakan yang cepat dalam memutuskan saluran listrik untuk menghindari bahaya yang dapat ditimbulkan.

Berikut adalah foto kubikel MV 20kV yang digunakan pada DSS LRT Sumatera Selatan:



Gambar 2.1 Kubikel MV 20kV

2.4 Transformator

Transformator merupakan suatu peralatan listrik elektromagnetik statis yang berfungsi untuk memindahkan dan mengubah daya listrik dari suatu rangkaian listrik ke rangkaian listrik lainnya, dengan frekuensi yang sama dan perbandingan transformasi tertentu melalui suatu gandengan magnet dan bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetis, dimana perbandingan tegangan antara sisi primer dan sisi sekunder berbanding lurus dengan perbandingan jumlah lilitan dan berbanding terbalik dengan perbandingan arusnya.¹

Transformator adalah peralatan listrik (*apparatus electrical*) yang digunakan untuk menaikkan tegangan (*step up*) atau untuk menurunkan tegangan (*step down*). Transformator juga berfungsi untuk mentransformasi AC tegangan rendah arus tinggi menjadi AC tegangan tinggi arus rendah digunakan untuk transmisi tenaga listrik atau untuk mentransformasi AC tegangan tinggi arus rendah menjadi AC tegangan rendah arus tinggi digunakan untuk distribusi dan mentransformasi impedansi rangkaian menjadi impedansi yang berbeda supaya diperoleh pengalihan (*transfer*) daya yang lebih baik dari sumber ke beban.⁷

2.5 Jenis-jenis Transformator

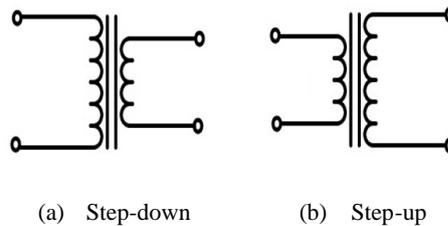
Berikut ini adalah beberapa jenis Trafo berdasarkan masing-masing pengklasifikasiannya.

Transformator berdasarkan level tegangan

Pengklasifikasian ini pada dasarnya tergantung pada rasio jumlah gulungan di kumparan primer dengan jumlah kumparan sekundernya. Jenis Trafo berdasarkan level tegangan ini diantaranya adalah:

¹ Adjie Pranatama, Laporan Akhir: “*PERHITUNGAN EFISIENSI TRANSFORMATOR DAYA 54 MVA PLTGU UNIT 1 DI PT. PLN (PERSERO) SEKTOR PEMBANGKITAN KERAMASAN PALEMBANG DENGAN BANTUAN SOFTWARE MATLAB*” (Palembang: POLSRI 2019), Hal. 6

⁷ M Anwar, Haris Afandi, Makalah: “*Transformator*” (Bali: UNDIKSHA 2005), Hal. 2



Gambar 2.2 Jenis-jenis transformator berdasarkan level tegangan

1. Transformator Step-up

Transformator step-up adalah jenis transformator yang memiliki fungsi untuk menaikkan suatu tegangan. Ciri-ciri transformator step-up :

- a. Jumlah lilitan pada kumparan primer selalu lebih kecil dibandingkan dengan jumlah lilitan pada kumparan sekunder ($N_p < N_s$).
- b. Tegangan primer juga selalu lebih kecil daripada tegangan sekunder ($V_p < V_s$).
- c. Untuk kuat arus primer selalu lebih besar dibanding dengan kuat arus sekunder ($I_p > I_s$).

Pada pembangkit listrik, transformator ini dimanfaatkan untuk menaikkan tegangan yang keluar dari generator. Hal ini bertujuan agar saat ditransmisikan ke jaringan listrik, listrik tidak akan kehilangan banyak daya. Tak hanya itu, transformator ini juga bisa digunakan pada perangkat inverter yang biasa digunakan untuk menaikkan tegangan menjadi lebih besar.

2. Transformator Step-down

Transformator step-down jenis transformator yang memiliki fungsi untuk menurunkan tegangan. Ciri – ciri transformator step-down :

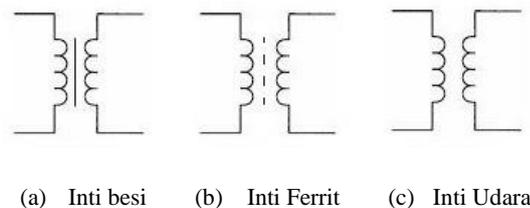
- a. Jumlah lilitan pada kumparan primer selalu lebih besar dibanding dengan jumlah lilitan pada kumparan sekunder ($N_p > N_s$).
- b. Tegangan pada primer juga lebih besar dibanding dengan tegangan sekunder ($V_p > V_s$).

- c. Untuk kuat arus primer selalu lebih kecil dari kuat arus sekunder ($I_p < I_s$)

Pada jaringan distribusi listrik, transformator ini berguna untuk mengubah tegangan grid yang tinggi menjadi tegangan rendah yang dapat dimanfaatkan pada peralatan rumah tangga. Misalnya pada adaptor AC–DC.

Transformator berdasarkan bahan inti yang digunakan

Berdasarkan media atau bahan inti yang digunakan untuk lilitan primer dan lilitan sekunder, dapat dibedakan sebagai berikut:



Gambar 2.3 Jenis-jenis transformator berdasarkan bahan inti yang digunakan

1. Transformator berinti udara (*Air Core Transformer*)

Pada transformator yang berinti udara, gulungan primer dan gulungan sekunder dililitkan pada inti berbahan non-magnetik yang biasanya berbentuk tabung yang berongga. Bahan non-magnetik yang dimaksud tersebut dapat berupa bahan kertas ataupun karton. Ini artinya, hubungan fluks antara gulungan primer dan gulungan sekunder adalah melalui udara. Tingkat kopling atau induktansi mutual diantara lilitan-lilitan tersebut lebih kecil dibandingkan dengan transformator yang berinti besi. Kerugian histerisis dan kerugian arus eddy yang biasanya terjadi pada trafo inti besi dapat dikurangi atau bahkan dapat dihilangkan pada transformator berinti udara ini. Transformator inti udara ini biasanya digunakan pada rangkaian frekuensi tinggi.

2. Transformator berinti besi (*Iron Core Transformer*)

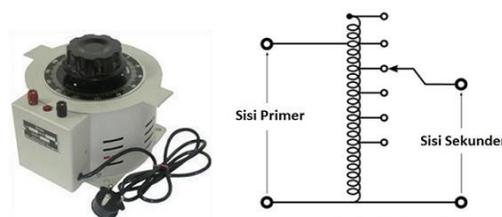
Pada transformator berinti besi, gulungan primer dan gulungan sekunder dililitkan pada inti lempengan - lempengan besi tipis yang dilaminasi. Plat - plat besi yang digunakan sebagai inti mempunyai bentuk serta ukuran yang

bervariasi, diantaranya seperti E, I, U, L dan lain lain. Transformator inti besi memiliki efisiensi yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan transformator yang berinti udara. Hal ini dikarenakan bahan besi mengandung sifat magnetik dan juga konduktif sehingga mempermudah jalannya fluks magnet yang ditimbulkan oleh arus listrik kumparan serta untuk mengurangi suhu panas yang ditimbulkan. Transformator yang berinti besi biasanya digunakan pada aplikasi frekuensi rendah.

3. Transformator inti ferrite

Transformator yang menggunakan bahan ferrite sebagai intinya memiliki daya tembus magnet yang terbilang tinggi. Transformator jenis ini lebih sering digunakan pada peralatan elektronik dibanding dengan elektrik. Transformator ferrite juga mempunyai bentuk dan ukuran yang bervariasi. Sementara untuk intinya secara umum berbentuk seperti huruf E. Untuk penggunaannya, lebih baik digunakan pada transformator yang menangani listrik berfrekuensi tinggi seperti pada *Switch Mode Power Supply* (SMPS), rectifier transformator dan sebagainya.

Transformator berdasarkan pengaturan lilitannya



Gambar 2.4 Transformator otomatis (*autotransformer*)

Transformator yang termasuk dalam jenis ini adalah transformator otomatis (*autotransformer*). *Autotransformer* atau transformator otomatis adalah transformator yang lilitan primer dan sekundernya dihubungkan secara listrik dan juga secara magnetik. Secara umum transformator otomatis digunakan dalam

penstart-an motor AC, yang mana tegangan yang dikenakan ke motor dikurangi selama periode penstart-an.⁶

Pengaturan lilitan ini sangat berbeda dengan transformator standar pada umumnya yang terdiri dari dua kumparan yang ditempatkan pada dua sisi berbeda yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Transformator otomatis ini sering digunakan sebagai transformator step-up dan step-down yang berfungsi untuk menaikkan tegangan maupun menurun tegangan pada kisaran 100V-110V-120V dan kisaran 220V-230V-240V bahkan pada kisaran 110V hingga 220V.

Transformator berdasarkan penggunaannya

Transformator dapat digunakan untuk melakukan berbagai fungsi sesuai dengan kebutuhannya. Transformator jenis ini dapat diklasifikasikan menjadi:



Gambar 2.5 Jenis-jenis transformator berdasarkan penggunaannya

1. Transformator Daya (*Power Transformer*)

Transformator daya adalah jenis transformator yang berukuran besar dan digunakan untuk aplikasi transfer daya. Transformator daya ini sering digunakan di stasiun pembangkit listrik dan gardu transmisi. Transformator daya biasanya memiliki tingkat insulasi yang tinggi.

⁶ Lister, Eugene C.1993.Mesin dan Rangkaian Listrik Edisi Keenam (terjemahan). Penerbit Erlangga, Jakarta, Hal 183

2. Transformator Distribusi (*Distribution Transformer*)

Transformator distribusi digunakan untuk mendistribusikan energi listrik dari pembangkit listrik ke daerah perumahan ataupun lokasi industri. Pada dasarnya, transformator distribusi ini mendistribusikan energi listrik pada tegangan rendah untuk keperluan rumah tangga ataupun industri yang berada dalam kisaran tegangan 220V hingga 440V.

3. Trafo Pengukuran (*Measurement Transformer*)

Transformator pengukuran digunakan untuk mengukur kuantitas tegangan, arus listrik dan daya yang biasanya diklasifikasikan menjadi transformator tegangan dan transformator arus listrik dan lain-lainnya.

4. Trafo Pelindung (*Protector Transformer*)

Transformator pelindung ini digunakan untuk melindungi komponen listrik. Perbedaan utama antara transformator pelindung dan transformator pengukuran adalah pada akurasinya. Dimana transformator pelindung harus lebih akurat jika dibandingkan dengan transformator pengukuran.⁹

2.6 Prinsip Kerja Transformator

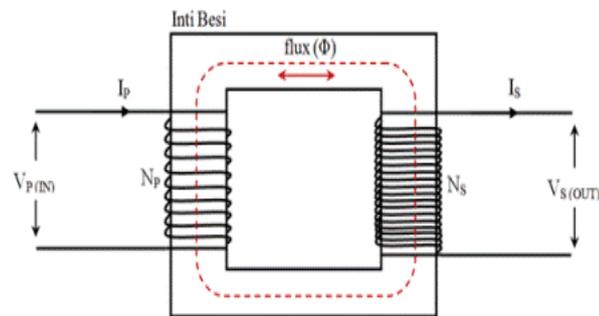
Dalam suatu eksperimennya, *Michael Faraday* dengan menggunakan bahan-bahan berupa sebuah koil, magnet batang dan galvanometer dapat membuktikan bahwa bila kita mendorong medan magnet batang ke dalam koil tersebut dengan kutub utaranya menghadap koil, ketika batang magnet sedang bergerak, jarum galvanometer memperlihatkan penyimpangan yang menunjukkan bahwa sebuah arus telah dihasilkan di dalam koil tersebut.

Bila batang magnet tersebut digerakkan dengan arah sebaliknya maka arah penunjukkan pada galvanometer arahnya pun berlawanan yang menunjukkan bahwa arah arus yang terjadi berlawanan juga. Jadi yang terjadi dalam percobaan itu adalah apa yang disebut arus imbas yang dihasilkan oleh tegangan gerak listrik imbas.

⁹ Rijono, Yon. 1997. Dasar Teknik Tenaga Listrik (Edisi Revisi). ANDI, Yogyakarta, Hal 3

Dari percobaan seperti telah dijelaskan diatas *Michael Faraday* dapat menyimpulkan bahwa tegangan gerak listrik imbas di dalam sebuah rangkaian listrik adalah sama dengan perubahan *fluks* yang melalui rangkaian-rangkaian tersebut. Jika kecepatan perubahan *fluks* dinyatakan didalam *weber/detik*, maka tegangan gerak listrik dinyatakan dalam Volt. Hal ini dikenal dengan hukum *Induksi Faraday*, tanda negatif menunjukkan bahwa arus induksi akan selalu mengadakan perlawanan terhadap yang menghasilkan arus induksi tersebut. Bila koil terdiri dari N Lilitan, tegangan gerak listrik imbas yang dihasilkan merupakan jumlah dari tiap lilitan.¹²

Prinsip kerja dari transformator melibatkan bagian-bagian utama pada transformator, yaitu: kumparan primer, kumparan sekunder dan inti transformator. Kumparan tersebut mengelilingi inti besi dalam bentuk lilitan.



Gambar 2.6 Prinsip kerja transformator

Apabila kumparan pada sisi primer transformator dihubungkan dengan suatu sumber tegangan bolak-balik sinusoidal (V_1), maka akan mengalir arus bolak-balik yang juga sinusoidal (I_1) pada kumparan tersebut. Arus bolak-balik ini akan menimbulkan fluks magnetik (Φ) yang sefasa dan juga sinusoidal di sekeliling kumparan. Akibat adanya inti trafo yang menghubungkan kumparan pada sisi primer dan kumparan pada sisi sekunder, maka fluks magnetik akan mengalir bersama pada inti trafo dari kumparan primer menuju kumparan sekunder sehingga akan membangkitkan tegangan induksi pada sisi sekunder trafo:

¹² Komponen Elektronika. 2015. *Cara Kerja Transformator*. <https://dokumen.tips/dokuments/cara-kerja-transformator-komponen-elektronika.html> (diakses 05 September 2020)

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana :

e_1 = GGL induksi pada kumparan primer (Volt)

N_1 = jumlah belitan pada sisi primer

$d\Phi/dt$ = perubahan fluks terhadap waktu (Wb/s)

Dari persamaan tersebut diketahui bahwa tegangan induksi yang terbangkitkan pada kumparan transformator berbanding lurus dengan jumlah lilitan kumparan pada inti transformator. Selain itu, tegangan induksi juga dapat terbangkitkan apabila ada perubahan fluks terhadap waktu, jika fluks yang mengalir adalah konstan maka tegangan induksi tidak dapat terbangkitkan.

Setiap trafo juga memiliki suatu besaran yang dinamakan perbandingan transformasi (a), untuk menunjukkan perbandingan lilitan atau perubahan level tegangan dan arus pada sisi primer dan sekunder yang ditransformasikan pada trafo tersebut. Berikut perumusannya:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{V_P}{V_S} = \frac{I_S}{I_P} = \frac{N_P}{N_S} = a \dots\dots\dots (2.2)^{10}$$

2.7 Komponen Transformator

Komponen utama transformator tenaga terdiri dari bagian-bagian diantaranya: inti besi, kumparan transformator, minyak transformator, bushing, tangki konservator, peralatan bantu pendinginan transformator, tap changer dan alat pernapasan (*dehydrating breather*).

2.7.1 Inti Besi

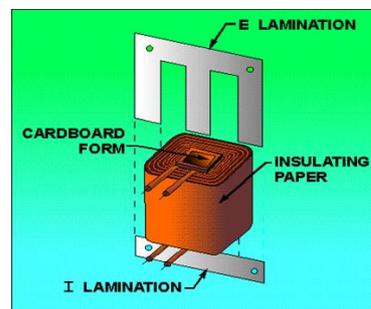
Inti besi berfungsi untuk mempermudah jalan fluksi, magnetik yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Dibuat dari

¹⁰ Zuhail. 1995. Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya, PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, Hal 45

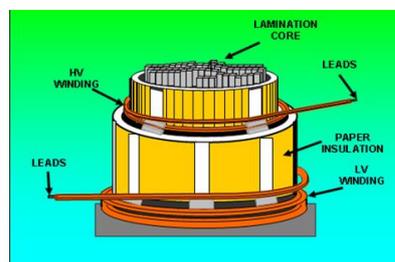
lempengan- lempengan besi tipis yang berisolasi, untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh Eddy Current.

2.7.2 Kumparan Transformator

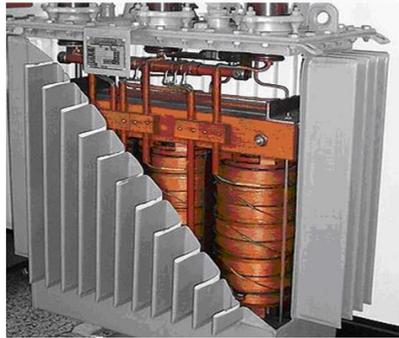
Kumparan transformator adalah beberapa lilitan kawat berisolasi yang membentuk suatu kumparan atau gulungan. Kumparan tersebut terdiri dari kumparan primer dan kumparan sekunder yang diisolasi baik terhadap inti besi maupun terhadap antar kumparan dengan isolasi padat seperti karton, pertinak dan lain-lain. Kumparan tersebut sebagai alat transformasi tegangan dan arus.



Gambar 2.7 Konstruksi belitan transformator



Gambar 2.8 Gambaran fisik belitan transformator tenaga



Gambar 2.9 Komponen-komponen internal transformator

2.7.3 Minyak Transformator

Minyak Transformator merupakan salah satu bahan isolasi cair yang dipergunakan sebagai isolasi dan pendingin pada transformator. Sebagai bagian dari bahan isolasi, minyak harus memiliki kemampuan untuk menahan tegangan tembus, sedangkan sebagai pendingin minyak transformator harus mampu meredam panas yang ditimbulkan, sehingga dengan kedua kemampuan ini maka minyak diharapkan akan mampu melindungi transformator dari gangguan.

2.7.4 Bushing

Bushing yaitu sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator merupakan alat penghubung antara kumparan transformator dengan jaringan luar. Bushing sekaligus berfungsi sebagai penyekat/isolator antara konduktor tersebut dengan tangki transformator.



Gambar 2.10 Bushing Transformator

2.7.5 Tangki Konservator

Tangki konservator berfungsi untuk menampung minyak cadangan dan uap/udara akibat pemanasan trafo karena arus beban. Diantara tangki dan trafo dipasangkan relai bucholtz yang akan menyerap gas produksi akibat kerusakan minyak. Untuk menjaga agar minyak tidak terkontaminasi dengan air, ujung masuk saluran udara melalui saluran pelepasan/venting dilengkapi media penyerap uap air pada udara, sering disebut dengan silika gel dan dia tidak keluar mencemari udara disekitarnya.



Gambar 2.11 Tangki Konvensator

2.7.6 Peralatan Bantu Pendinginan Transformator

Peralatan bantu pendinginan transformator berfungsi untuk menjaga agar transformator bekerja pada suhu rendah. Pada inti besi dan kumparan – kumparan akan timbul panas akibat rugi-rugi tembaga. Maka panas tersebut mengakibatkan kenaikan suhu yang berlebihan, ini akan merusak isolasi, maka untuk mengurangi kenaikan suhu yang berlebihan tersebut transformator perlu dilengkapi dengan alat atau sistem pendingin untuk menyalurkan panas keluar transformator.

Secara alamiah media pendingin (minyak isolasi) mengalir karena perbedaan suhu tangki minyak dan sirip-sirip transformator (Radiator). Untuk mempercepat pendinginan transformator dilengkapi dengan kipas yang dipasang di radiator transformator dan pompa minyak agar sirkulasi minyak lebih cepat dan pendinginan lebih optimal.



Gambar 2.12 Pendingin Transformator

Tabel 2.1 Klasifikasi Pendinginan Transformator

CARA PENDINGINAN	JENIS	SINGKATAN
Pendinginan Alam	Air Natural Colling (Pendinginan dengan udara biasa)	AN
	Oil-immersed Natural Colling (Pendinginan dengan direndam kedalam minyak)	ON
	Oil natural Air natural (pendinginan dengan udara dan minyak)	ONAN
	Oil-immersed forced-oil circulation (pendinginan dengan direndam kedalam minyak)	OFN
	Oil-immersed Forced-Oil Corculation with Air-Blast Colling (Pendinginan dengan direndam kedalam minyak yang dialirkan dengan semburan udara)	OFB
Pendinginan Buatan (Udara)	Oil-immersed Air-blast Colling/Oil Naturan Air Force (Pendinginan dengan direndam kedalam minyak dan dihembuskan udara)	OB/ONAF
	Air-blast Colling (Pendinginan dengan udara yang dihembuskan)	AB

Pendinginan buatan (Air)	Oil-immersed Water Colling (Pendingin dengan direndam minyak dan juga dibantu dengan air) Oil-immersed Forced-oil Circulation with Water Colling (Pendingin dengan direndam kedalam minyak yang dialirkan dan juga dibantu dengan pendinginan air)	OFW
--------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

2.7.7 Tap Changer

Tap changer berfungsi untuk menjaga tegangan keluaran yang diinginkan dengan input tegangan yang berubah-ubah. Kualitas operasi tenaga listrik jika tegangan nominalnya sesuai ketentuan, tapi pada saat operasi dapat saja terjadi penurunan tegangan sehingga kualitasnya menurun, untuk itu perlu alat pengatur tegangan agar tegangan selalu pada kondisi terbaik, konstan dan berkelanjutan.

Ditinjau dari cara pengoperasiannya, tap changer terdiri dari dua tipe yaitu *on-load* yang bekerja secara otomatis jika merasakan tegangan kurang/lebih dan *off-load* yang dapat dipindah tap hanya jika trafo tidak berbeban/bertegangan.

2.7.8 Pengaman

- 1) Peralatan proteksi internal, berupa relay Bucholz (deteksi gas), Jansen membrane (pengaman tekanan lebih), relay tekanan lebih, relay pengaman tangki, dan *Neutral Grounding Resistance/ NGR* atau resistance pentanahan transformator.
- 2) Peralatan tambahan untuk pengaman transformator, meliputi pemadam kebakaran, thermometer pengukur langsung, thermometer pengukur tidak langsung.
- 3) Relay proteksi transformator, meliputi relay arus lebih, relay diferensial (mengamankan dari hubung singkat yang terjadi di daerah pengaman), relay gangguan tanah terbatas, relay arus lebih berarah, relay connections, relay gangguan tanah, dan relay tangki tanah.

2.7.9 Indikator

Untuk mengawasi selama transformator beroperasi, maka perlu adanya indikator pada transformator, yaitu indikator suhu minyak, indikator permukaan minyak, indikator sistem pendingin, indikator kedudukan tap dan sebagainya.

2.7.10 Alat Pernapasan (*Dehydrating Breather*)

Alat pernapasan (*Dehydrating Breather*) Sebagai tempat penampungan pemuaiian minyak isolasi akibat panas yang timbul, maka minyak ditampung pada tangki yang sering disebut sebagai konservator. Pada konservator ini permukaan minyak diusahakan tidak boleh bersinggungan dengan udara, karena kelembaban udara yang mengandung uap air akan mengkontaminasi minyak walaupun proses pengkontaminasinya berlangsung cukup lama. Untuk mengatasi hal tersebut, udara yang masuk kedalam tangki konservator pada saat minyak menjadi dingin memerlukan suatu media penghisap kelembaban, yang digunakan biasanya adalah silica gel.

Kebalikan jika trafo panas maka pada saat menyusut maka akan menghisap udara dari luar masuk kedalam tangki dan untuk menghindari terkontaminasi oleh kelembaban udara maka diperlukan suatu media penghisap kelembaban yang digunakan biasanya adalah silica gel, yang secara khusus dirancang untuk maksud tersebut diatas.⁴

2.8 Daya Aktif, Daya Semu, dan Daya Reaktif

2.8.1 Daya Aktif

Daya aktif atau daya nyata dirumuskan dengan $VI \cos \theta$ dengan simbol P dalam satuan watt (W), kilo watt (KW), mega watt (MW).

$$P = VI \cos \theta \text{ untuk 1 fasa} \dots\dots\dots(2.3)$$

$$P = \sqrt{3} \cdot VI \cos \theta \text{ untuk 3 fasa} \dots\dots\dots(2.4)$$

$$P_1 = P_2 \rightarrow V_1 \times I_1 = V_2 \times I_2 \dots\dots\dots(2.5)$$

⁴ Evan Adytia Septiawan, Laporan Akhir: “*PERHITUNGAN EFISIENSI TRANSFORMATOR 80 MVA DI PLTU UNIT 2 PT. PLN (PERSERO) SEKTOR PEMBANGKITAN BUKIT ASAM*” (Palembang: POLSRI 2019), Hal. 10-16

2.8.2 Daya Semu

Perkalian tegangan V dengan arus I dalam kedua besaran ini dalam bentuk bilangan kompleks adalah VI^* yang dinamakan daya semu dengan simbol S dalam satuan volt ampere (VA), kilo volt ampere (KVA), mega volt ampere (MVA). Arus I^* adalah arus konjugate dari I .

$$S = VI, \text{ untuk 1 fasa} \dots\dots\dots (2.6)$$

$$S = \sqrt{3} \cdot VI, \text{ untuk 3 fasa} \dots\dots\dots (2.7)$$

2.8.3 Daya Reaktif

Daya reaktif atau daya khayal dirumuskan dengan $S \sin \theta$ atau $VI \sin \theta$ dengan simbol Q , dalam satuan volt ampere reaktif (VAR), kilo volt ampere reaktif (KVAR), mega volt ampere reaktif (MVAR).

$$Q = VI \sin \theta, \text{ untuk 1 fasa} \dots\dots\dots (2.8)$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot S \sin \theta = \sqrt{3} \cdot VI \sin \theta, \text{ untuk 3 fasa} \dots\dots\dots (2.9)^2$$

2.9 Rugi-rugi Transformator

Rugi – rugi transformator terbagi menjadi dua antara lain sebagai berikut:

2.9.1 Rugi Variabel

Rugi yang disebabkan arus beban mengalir pada kawat tembaga $P_{CU} = I^2R$. Karena arus beban berubah-ubah, rugi tembaga juga tidak tetap tergantung pada beban.

$$P_{cu} = I_1^2 R_1 \dots\dots\dots (2.10)$$

$$P_{cu} = I_2^2 R_2 \dots\dots\dots (2.11)$$

Dengan demikian rugi tembaga total:

$$\begin{aligned} P_{cu} &= P_{cu1} + P_{cu2} \\ &= I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \dots\dots\dots (2.12) \end{aligned}$$

² Cekmas Cekdin dan Taufik Barlian, Rangkaian Listrik, Penerbit ANDI YOGYAKARTA, 2013, Hal 74

Jumlah total rugi-rugi pada transformator adalah:

$$P_{\text{rugi total}} = P_{\text{rugi-rugi Cu}} + P_{\text{rugi inti}} \dots \dots \dots (2.13)$$

Besarnya rugi-rugi tembaga pada setiap perubahan beban dapat ditentukan dengan persamaan:

$$P_{t2} = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2 \times P_{t1} \dots \dots \dots (2.14)$$

dimana:

P_{t2} = Rugi-rugi tembaga pada saat pembebanan tertentu

P_{t1} = Rugi-rugi tembaga beban penuh

S_2 = Beban yang dioperasikan

S_1 = Nilai pengenalan⁸

2.9.2 Rugi Tetap

Rugi tetap merupakan rugi-rugi transformator yang tidak dipengaruhi oleh keadaan beban, hal ini dipengaruhi oleh rugi histerisis (rugi yang disebabkan fluks bolak-balik pada inti besi) dan rugi arus Eddy (rugi yang disebabkan oleh arus pusar pada inti besi).¹⁰

2.10 Efisiensi Transformator

Efisiensi transformator adalah perbandingan antara keluaran daya yang berguna dan masuk daya total. Karena masukan ke transformator sama dengan keluaran daya yang berguna ditambah kerugiannya, maka persamaan efisiensi dapat ditulis dalam bentuk sebagai berikut:

$$\text{Daya keluaran} = \text{daya masukan} - \text{kerugian}$$

$$\begin{aligned} \text{Persen efisiensi} &= \frac{\text{daya keluaran}}{\text{daya masukan}} \times 100\% \\ &= \frac{\text{daya masukan} - \text{kerugian}}{\text{daya masukan}} \times 100\% \quad \dots \dots \dots (2.15) \end{aligned}$$

⁸ Mutiar. 2019. "PERHITUNGAN EFISIENSI TRANSFORMATOR 60 MVA DI PT. PLN (PERSERO) GARDU INDUK PRABUMULIH". *Politeknik Negeri Sriwijaya*. Hal. 33

⁸ Ibid. Hal. 33

¹⁰ Zuhail, op.cit, Hal 55

Dari persamaan di atas, jelaslah bahwa efisiensi transformator dapat ditentukan untuk setiap beban dengan pengukuran langsung daya masukannya dan daya keluarannya.⁶

Karena transformator tidak memiliki bagian bergerak yang menyebabkan kehilangan daya akibat gesekan, kebanyakan transformator memiliki efisiensi yang sangat tinggi, biasanya lebih tinggi dari 90%.⁵

⁶ Lister, Eugene C. , *op.cit*, Hal 176-177

⁵ Linsley, Trevor. *Instalasi Listrik Dasar*, Penerbit Erlangga, 2004, Hal 152