

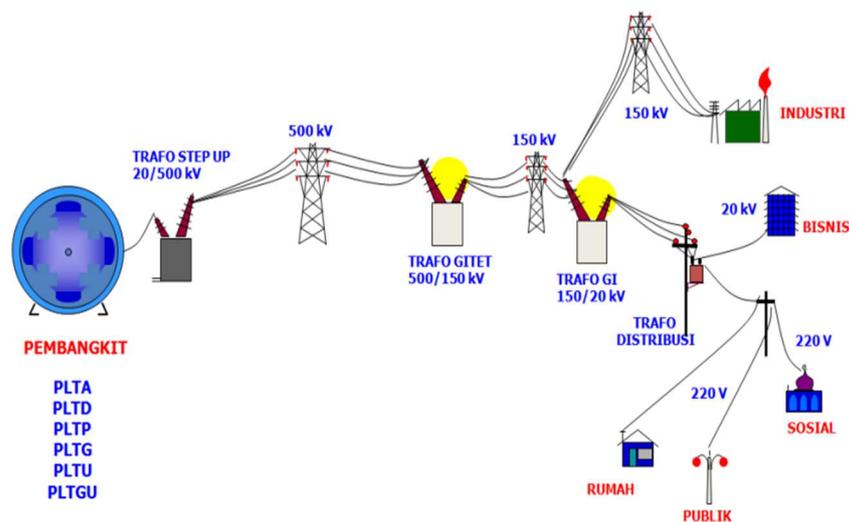


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik¹

Secara umum, sistem diartikan sebagai suatu kesatuan yang terdiri beberapa komponen atau elemen yang dihubungkan untuk memudahkan aliran informasi, materi atau energi untuk mencapai suatu tujuan. Dengan demikian, sebuah sistem pasti terdiri dari beberapa komponen penyusun yang dihubungkan sedemikian rupa sehingga dapat bekerja sesuai perannya masing-masing untuk mencapai tujuan tertentu. Bila dikaitkan dengan tenaga listrik, maka yang akan mengalir dalam sistem itu adalah tenaga listrik.

Sistem tenaga listrik adalah suatu sistem yang terdiri dari beberapa komponen, antara lain unit pembangkitan, saluran transmisi, gardu induk dan jaringan distribusi yang berhubungan sedemikian rupa dan berkerja sama untuk melayani kebutuhan tenaga listrik bagi pelanggan sesuai kebutuhan. Secara garis besar sistem tenaga listrik dapat digambarkan dengan skema gambar 2.1.



Gambar 2.1 Skema Sistem Tenaga Listrik

¹ Suropto, Slamet. 2017. *Sistem Tenaga Listrik*. Yogyakarta: LP3M UMY. Hal 1



2.1.1 Fungsi komponen sistem tenaga listrik

Fungsi masing-masing komponen secara garis besar adalah sebagai berikut:

1. Unit pembangkitan merupakan komponen sistem tenaga listrik yang terdiri dari generator pembangkit tenaga listrik yang digerakkan oleh turbin. Unit pembangkitan berfungsi untuk membangkitkan tenaga listrik dengan cara mengubah energi primer yang berasal dari sumber energi lain, misalnya air, batu bara, panas bumi atau minyak bumi menjadi energi listrik.
2. Saluran transmisi merupakan komponen sistem tenaga listrik yang berupa konduktor yang dibentang antara pembangkit dan gardu induk pusat beban atau antar gardu induk. Saluran transmisi berfungsi untuk menyalurkan daya atau energi listrik dari pusat pembangkitan ke gardu induk pusat beban atau antar gardu induk.
3. Gardu induk merupakan komponen sistem tenaga listrik yang terdiri dari peralatan pemutus-penghubung tenaga listrik dan trafo penurun tegangan yang terletak antara saluran transmisi dan jaringan distribusi. Gardu induk berfungsi untuk mengatur aliran tenaga listrik dan menyesuaikan level tegangan sistem.
4. Jaringan distribusi merupakan komponen sistem tenaga listrik yang terdiri dari penghantar yang dibentang mulai dari gardu induk sampai dengan lokasi pelanggan. Jaringan distribusi berfungsi untuk mendistribusikan energi listrik dari gardu induk pusat beban ke lokasi konsumen/pelanggan energi listrik. Sistem tenaga listrik mempunyai tujuan utama yaitu memenuhi kebutuhan energi listrik yang aman dan nyaman bagi konsumen/pelanggan sesuai kebutuhan, baik level tegangan, besar daya maupun jumlah energinya.



2.2 Pengertian Distribusi Tenaga Listrik²

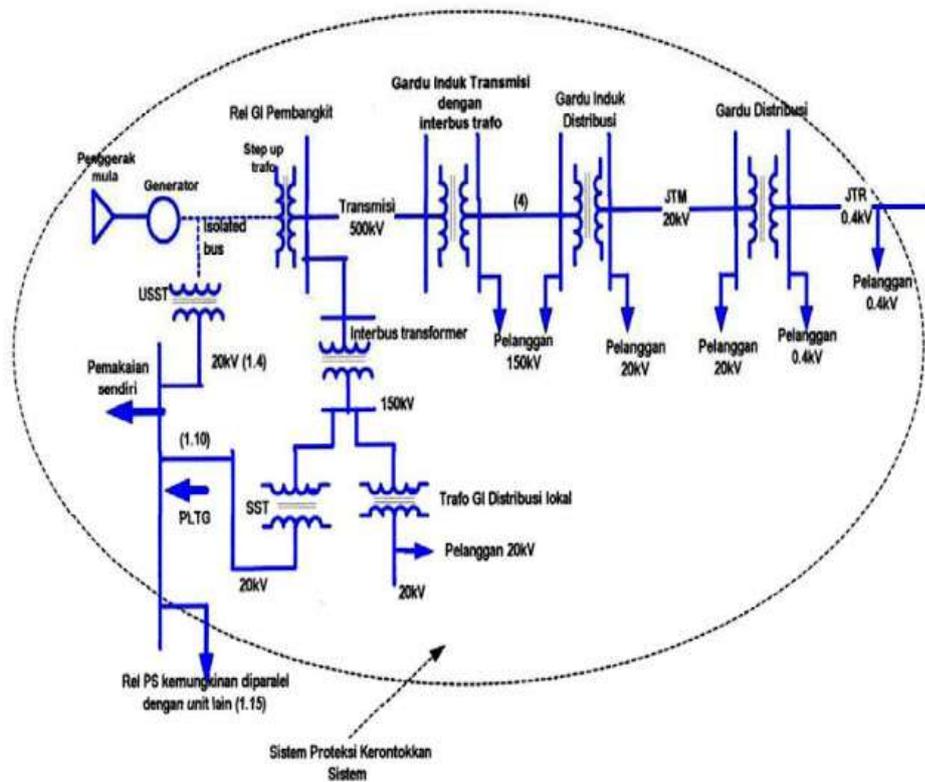
Sistem Distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Sistem distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar (Bulk Power Source) sampai ke konsumen. Jadi fungsi distribusi tenaga listrik adalah; 1) pembagian atau penyaluran tenaga listrik ke beberapa tempat (pelanggan), dan 2) 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 tenaga listrik besar dengan tegangan dari 11 kV sampai 24 kV dinaikkan tegangannya oleh gardu induk dengan transformator penaik tegangan menjadi 70 kV, 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 ($I^2 \cdot R$). 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 220/380Volt. 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.

Pada sistem penyaluran daya jarak jauh, selalu digunakan tegangan setinggi mungkin, dengan menggunakan trafo-trafo step-up. Nilai tegangan yang sangat tinggi ini (HV,UHV,EHV) menimbulkan beberapa konsekuensi

² Suhadi, dkk. 2008. *Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid 1*. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan. Hal 11

antara lain: berbahaya bagi lingkungan dan mahal nya harga perlengkapan-perlengkapannya, selain menjadi tidak cocok dengan nilai tegangan yang dibutuhkan pada sisi beban. Maka, pada daerah-daerah pusat beban tegangan saluran yang tinggi ini diturunkan kembali dengan menggunakan trafo-trafo step-down. Akibatnya, bila ditinjau nilai tegangannya, maka mulai dari titik sumber hingga di titik beban, terdapat bagian-bagian saluran yang memiliki nilai tegangan berbeda-beda.



Gambar 2.2 Sistem Penyaluran Tenaga Listrik

2.3 Gardu Distribusi³

Gardu Distribusi adalah bangunan gardu transformator yang memasok kebutuhan tenaga listrik bagi para pemanfaat baik dengan Tegangan Menengah maupun Tegangan Rendah.

³ PT.PLN(Persero). 2010. *buku 1 Kriteria Desain Enjineriing Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik*. Jakarta Selatan. Bab 4 hal 23

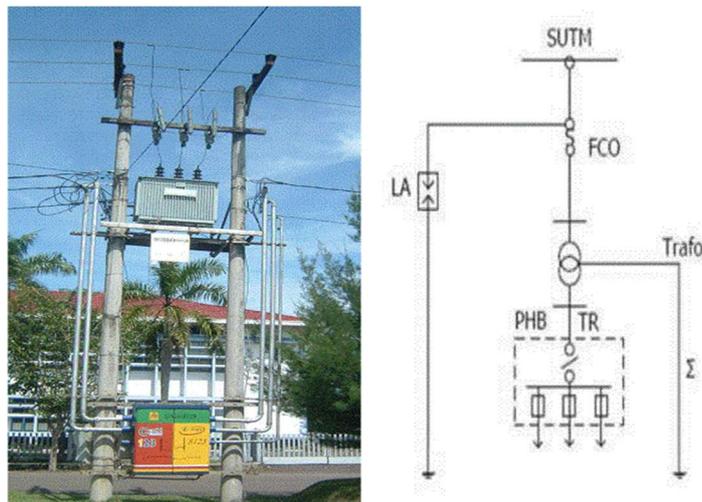
Gardu Distribusi merupakan kumpulan / gabungan dari perlengkapan hubung bagi baik Tegangan Menengah dan Tegangan Rendah. Jenis perlengkapan hubung bagi Tegangan Menengah pada Gardu Distribusi berbeda sesuai dengan jenis konstruksi gardunya.

Jenis konstruksi gardu dibedakan atas 2 jenis :

- a. Gardu Distribusi konstruksi pasangan luar. Umumnya disebut Gardu Portal (Konstruksi 2 tiang), Gardu Cantol (Konstruksi 1 tiang) dengan kapasitas transformator terbatas.
- b. Gardu Distribusi pasangan dalam. Umumnya disebut gardu beton (Masonry Wall Distribution Substation) dengan kapasitas transformator besar.

2.3.1 Gardu portal⁴

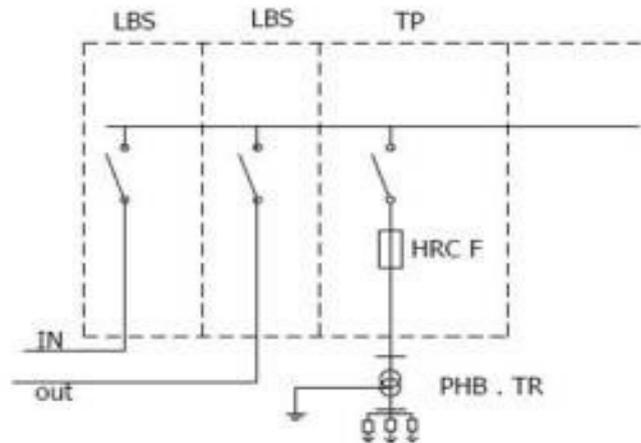
Umumnya konfigurasi Gardu Tiang yang dicatu dari SUTM adalah T section dengan peralatan pengaman Pengaman Lebur Cut-Out (FCO) sebagai pengaman hubung singkat transformator dengan elemen pelebur (pengaman lebur link type expulsion) dan Lightning Arrester (LA) sebagai sarana pencegah naiknya tegangan pada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



Gambar 2.3 Gardu Portal dan Diagram satu garis

⁴ PT.PLN(Persero). 2010. *buku 4 Konstruksi Gardu Distribusi dan Gardu Hubung Tenaga Listrik*. Jakarta Selatan. Hal 1

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.



Gambar 2.4 Bagan Satu Garis Konfigurasi π Section Gardu Portal

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.



Gambar 2.5 Gardu Cantol

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

2.3.3 Gardu beton

Seluruh komponen utama instalasi yaitu transformator dan peralatan switching/proteksi, terangkai didalam bangunan sipil yang dirancang, dibangun dan difungsikan dengan konstruksi pasangan batu dan beton (masonry wall building).

Konstruksi ini dimaksudkan untuk pemenuhan persyaratan terbaik bagi keselamatan ketenagalistrikan.



Gambar 2.6 Gardu Beton

2.3.4 Gardu kios

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



Gambar 2.7 Gardu Kios

Gardu ini dibangun pada tempat-tempat yang tidak diperbolehkan membangun Gardu Beton. Karena sifat mobilitasnya, maka kapasitas transformator distribusi yang terpasang terbatas. Kapasitas maksimum adalah 400 kVA, dengan 4 jurusan Tegangan Rendah. Khusus untuk Kios Kompak, seluruh instalasi komponen utama gardu sudah dirangkai

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



Gambar 2.8 Gardu Kios Bertingkat

2.4 Transformator⁵

Transformator merupakan salah satu alat listrik yang banyak digunakan pada bidang tenaga listrik dan bidang elektronika. Pada bidang tenaga listrik, transformator digunakan mulai dari pusat pembangkit tenaga listrik sampai ke rumah-rumah.

Sebelum di transmisikan tegangan yang dihasilkan oleh pembangkit dinaikkan terlebih dahulu dengan menggunakan sebuah transformator daya dengan tujuan untuk mengurangi kerugian energi yang terjadi saat listrik di transmisikan.

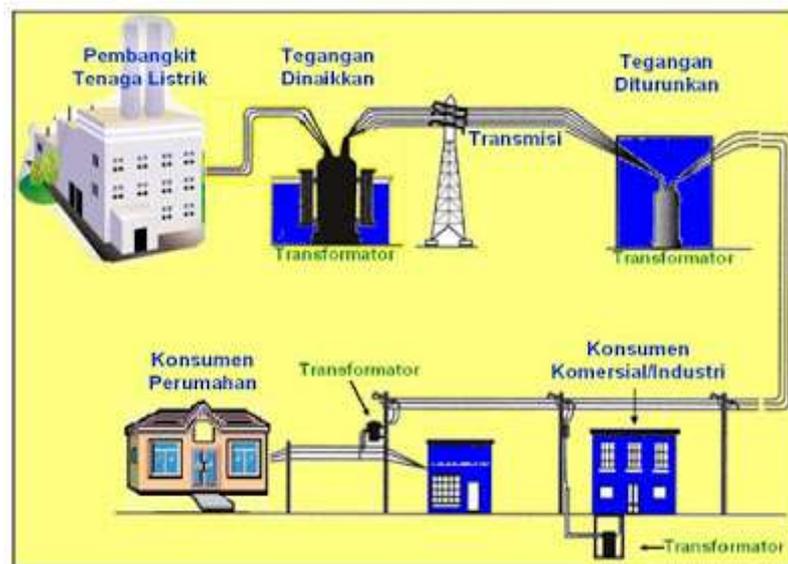
Kemudian sebelum digunakan oleh konsumen tegangan akan diturunkan lagi secara bertahap dengan menggunakan transformator distribusi, sesuai dengan peruntukkannya seperti kawasan industri, komersial, atau perumahan.

Transformator yang dimanfaatkan di rumah tangga pada umumnya mempunyai ukuran yang lebih kecil, seperti yang digunakan untuk

⁵ Sumardjati, Prih, dkk. 2008. *Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik Jilid 3*. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan. Hal 354

menyesuaikan tegangan dari peralatan rumah tangga listrik dengan suplai daya yang tersedia.

Transformator dengan ukuran yang lebih kecil lagi biasanya digunakan pada perangkat elektronik seperti radio, televisi, dan sebagainya.

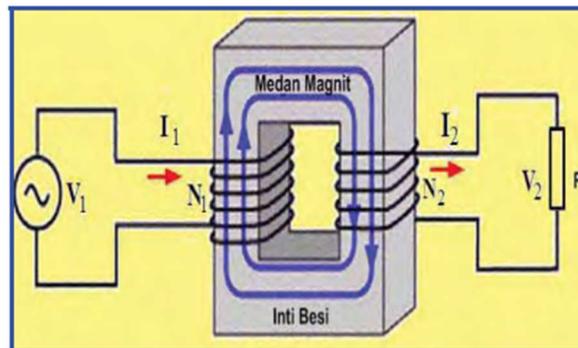


Gambar 2.9 Penggunaan Transformator pada Bidang Tenaga Listrik

2.4.1 Pengertian transformator

Transformator 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 mengimbas 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 Fluks Magnet Transformator

2.4.2 Konstruksi transformator⁶

Secara umum sebuah transformator tiga fasa mempunyai konstruksi hampir sama, yang membedakannya adalah alat bantu dan sistem pengamannya, tergantung pada letak pemasangan, sistem pendinginan, pengoperasian, fungsi dan pemakaiannya. Bagian utama, alat bantu, dan sistem pengamanan yang ada pada sebuah transformator daya, adalah :

1. Inti besi transformator

Seperti telah dijelaskan pada pembahasan transformator satu fasa inti besi berfungsi sebagai tempat mengalirnya fluks dari kumparan primer ke kumparan sekunder. Sama seperti transformator satu fasa, berdasarkan cara melilit kumparanya ada dua jenis, yaitu tipe inti dan tipe cangkang.

2. Kumparan transformator

Kumparan transformator terdiri dari lilitan kawat berisolasi dan membentuk kumparan. Kawat yang dipakai adalah kawat tembaga berisolasi yang berbentuk bulat atau plat. Kumparan-kumparan transformator diberi isolasi baik terhadap kumparan lain maupun inti besinya. Bahan isolasi berbentuk padat seperti kertas prespan, pertinak, dan lain-nya.

⁶ Sumardjati, Prih, dkk. 2008. *Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik Jilid 3*. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan. Hal 369



3. Minyak transformator

Untuk mendinginkan transformator saat beroperasi maka kumparan dan inti transformator direndam di dalam minyak transformator, minyak juga berfungsi sebagai isolasi. Oleh karena itu minyak transformator harus memenuhi persyaratan, sebagai berikut:

- Mempunyai kekuatan isolasi (Dielectric Strength);
- Penyalur panas yang baik dengan berat jenis yang kecil, sehingga partikel-partikel kecil dapat mengendap dengan cepat;
- Viskositas yang rendah agar lebih mudah bersirkulasi dan kemampuan pendinginan menjadi lebih baik;
- Tidak nyala yang tinggi, tidak mudah menguap;
- Sifat kimia yang stabil.

4. Tangki transformator

Tangki transformator berfungsi untuk menyimpan minyak transformator dan sebagai pelindung bagian-bagian transformator yang direndam dalam minyak. Ukuran tangki disesuaikan dengan ukuran inti dan kumparan.

5. Konservator transformator

Konservator merupakan tabung berisi minyak transformator yang diletakan pada bagian atas tangki. Fungsinya adalah :

- Untuk menjaga ekspansi atau meluapnya minyak akibat pemanasan;
- Sebagai saluran pengisian minyak.

6. Sistem pendingin transformator

Sistem pendinginan pada transformator dibutuhkan supaya panas yang timbul pada inti besi dan kumparan dapat disalurkan keluar sehingga tidak merusak isolasi didalam transformator. Media yang digunakan pada sistem pendinginan dapat berupa : udara / gas, minyak dan air. Sirkulasinya dilakukan secara : alamiah (natural) dan atau paksaan (forced).



7. Bushing transformator

Bushing transformator adalah sebuah konduktor yang berfungsi untuk menghubungkan kumparan transformator dengan rangkaian luar yang diberi selubung isolator. Isolator juga berfungsi sebagai penyekat antara konduktor dengan tangki transformator. Bahan bushing adalah terbuat dari porselin yang tengahnya berlubang.

8. Alat pernapasan

Naik turunnya beban transformator dan suhu udara sekeliling transformator, mengakibatkan suhu minyak berubah-ubah mengikuti perubahan tersebut. Bila suhu minyak naik, minyak memuai dan mendesak udara diatas permukaan minyak keluar dari tangki dan bila suhu turun sebaliknya udara akan masuk. Keadaan ini merupakan proses pernapasan transformator. Tetapi udara luar yang lembab akan menurunkan nilai tegangan tembus minyak. Untuk mencegah hal itu transformator dilengkapi dengan alat pernafasan yang berupa tabung berisi zat hygroskopis, seperti kristal silikagel.

9. Tap changer

Tap changer adalah alat yang berfungsi untuk mengubah perbandingan lilitan transformator untuk mendapatkan tegangan operasi pada sisi sekunder sesuai yang dibutuhkan oleh tegangan jaringan (beban) atau karena tegangan sisi primer yang berubah-ubah. Tap changer (perubahan tap) dapat dilakukan dalam keadaan berbeban (on load) atau keadaan tidak ber-beban(off load). Untuk tranformator distribusi perubahan tap changer dilakukan dalam keadaan tanpa beban.

10. Sirip-sirip pendingin atau radiator

Berfungsi untuk memperluas daerah pendinginan, yaitu daerah yang berhubungan langsung dengan udara luar dan sebagai tempat terjadinya sirkulasi panas.



11. Alat indikator

Alat Indikator digunakan untuk memonitor kondisi komponen utama atau media bantu yang ada didalam transformator saat transformator beroperasi, seperti :

- suhu minyak ;
- permukaan minyak ;
- sistem pendinginan ;
- posisi tap

12. Rele Buchholz

Rele Buchholz biasa disebut juga rele gas, karena bekerjanya digerakan oleh pengembangan gas. Tekanan gas akan timbul bila minyak mengalami kenaikan temperatur yang diakibatkan oleh :

- Hubung singkat antar lilitan pada atau dalam fasa;
- Hubung singkat antar fasa;
- Hubung singkat antar fasa ke tanah;
- Busur api listrik antar laminasi;
- Busur api listrik karena kontak yang kurang baik.

Gas yang mengembang akan menggerakkan kontak-kontak rangkaian alarm atau rangkaian pemutus.

13. Plat nama

Plat nama yang terdapat pada bagian luar transformator sebagai pedoman saat pemasangan maupun perbaikan. Data-data yang dicantumkan seperti : Fasa dan frekuensi, daya nominal, tegangan primer/ sekunder, kelompok hubungan, arus nominal, % arus hubung singkat, sistem pendinginan, volume minyak, dan lain-lain.

2.4.3 Prinsip kerja transformator⁷

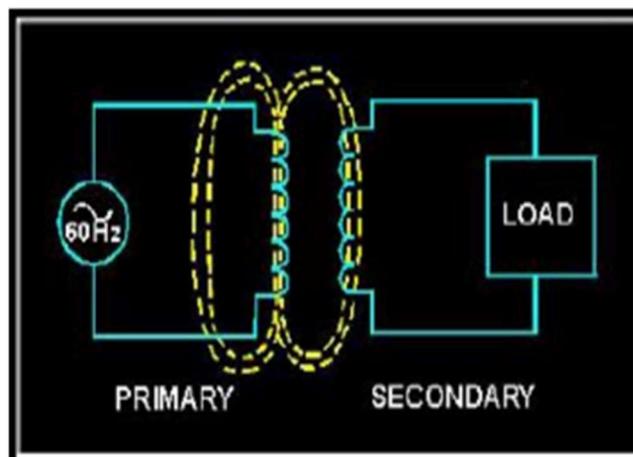
Trafo adalah perangkat elektrostatik yang digunakan untuk mentransfer energi listrik (tegangan atau arus) dari satu rangkaian ke

⁷ Candra, Adi, dan Syahreem Nurmutia. 2020. *Teknik Tenaga Listrik*. Tangerang Selatan: UNPAM PRESS. Hal 122

sirkuit lain dengan saling menginduksi dua rangkaian listrik tanpa mengubah frekuensi, yang bekerja sesuai dengan prinsip induksi elektromagnetik. (Mukhammad Rif'at Za'im, 2014).

Berikut dijelaskan prinsip kerja pada transformator (Trafo) :

1. Trafo bekerja di bawah prinsip induksi elektromagnetik.
2. Menggunakan prinsip ini, yang mentransfer energi listrik dari satu belitan ke belitan lainnya dengan induksi bersama antara kedua belitan.
3. Aliran bolak-balik terbentuk pada inti magnetik ketika belitan primer dialiri energi dari sumber arus bolak-balik (V1) dan yang sekunder berada dalam sirkuit terbuka.
4. Aliran ini menghubungkan belitan primer dan sekunder; dengan demikian, ggl diinduksi di dalamnya karena laju perubahan koneksi aliran dengan belitan Keamanan kehidupan manusia dan hewan, membatasi sentuhan dan tegangan step ke nilai yang aman.
5. Kompatibilitas elektromagnetik (Elektomagnetic Compatibility), yaitu membatasi gangguan elektromagnetik Operasi yang benar dari jaringan pasokan listrik dan memastikan kualitas daya yang baik.



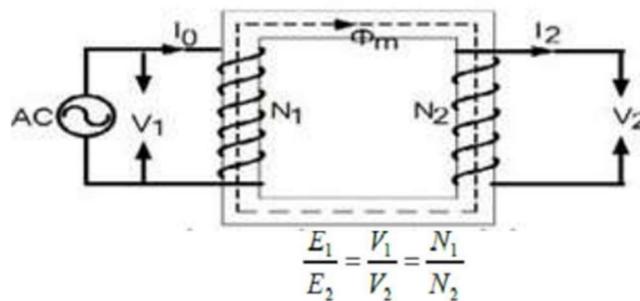
Gambar 2.11 Prinsip Kerja Transformator

2.4.4 Karakteristik transformator⁸

Berdasarkan karakteristiknya transformator bisa dibedakan menjadi dua yaitu : Keadaan transformator tanpa beban dan Keadaan transformator berbeban. Dimana dalam karakteristik ini harus dapat ditentukan salah satu di dalam pemilihan karakteristik transformator tersebut apakah dalam keadaan tanpa beban atau dalam keadaan berbeban.

1. Keadaan transformator tanpa beban

Keadaan transformator tanpa beban seperti pada gambar berikut :



Gambar 2.12 Keadaan Transformator Tanpa Beban

Bila kumparan primer transformator dihubungkan dengan sumber tegangan V_1 yang sinusoid maka akan mengalir arus primer I_0 yang juga sinusoid dan dengan menganggap belitan N_1 reaktif murni, I_0 akan tertinggal 90° dari V_1 dan fluks (Φ) sefasa dengan I_0 .

Dengan mengabaikan rugi tahanan dan adanya fluks bocor: Arus primer I_0 yang mengalir dalam kenyataannya bukan merupakan arus induktif murni, tapi terdiri atas komponen :

- Komponen arus pemagnetan (I_m).
- Komponen arus rugi tembaga (I_c).

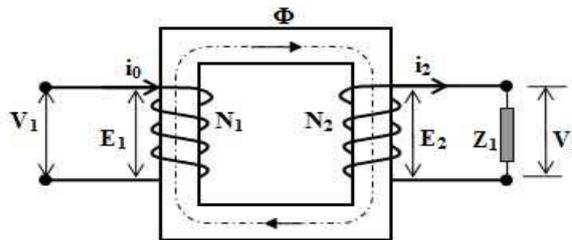
Fluks yang sinusoid ini akan menghasilkan tegangan induksi E_1 (hukum Faraday). Dalam hal ini tegangan induksi E_1 mempunyai

⁸ Sogen, Markus Dwiyanto Tobi. 2018. *Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses pada Transformator Distribusi di PT.PLN(Persero) Area Sorong*. Jurnal Teknik Elektro. 4(1).

kebesaran yang sama tetapi berlawanan arah dengan tegangan sumber V_1 .

2. Keadaan transformator berbeban

Keadaan transformator tanpa beban seperti pada gambar berikut :



Gambar 2.13 Keadaan Transformator Berbeban

Apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban Z_L , I_2 mengalir pada kumparan sekunder, dimana $I_2 = V_2/Z_L$ dengan $\theta_2 =$ faktor kerja beban.

Arus beban I_2 ini akan menimbulkan gaya gerak magnet (ggm) $N_2 I_2$ yang cenderung menentang fluks (Φ) Bersama yang telah ada akibat arus pemagnetan I_M . Agar fluks bersama itu tidak berubah nilainya, pada kumparan primer harus mengalir arus I_1 yang menentang fluks yang dibangkitkan oleh arus beban I_2 , hingga keseluruhan arus yang mengalir pada primer menjadi :

$$I_1 = I_0 + I_2 \dots\dots\dots(2.1)$$

Bila rugi besi diabaikan (IC diabaikan) maka $I_0 = I_M$

$$I_1 = I_M + I_2 \dots\dots\dots(2.2)$$

Untuk menjaga agar fluks tetap tidak berubah sebesar ggm yang dihasilkan oleh arus pemagnetan I_M saja, berlaku hubungan:

$$N_1 I_M = N_1 I_1 - N_1 I_2$$

$$N_1 I_M = N_1 (I_M + I_2) - N_2 I_2$$

Hingga :

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \dots\dots\dots(2.3)$$

Karena nilai IM dianggap kecil maka $I_2 = I_1$ jadi,

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \text{ atau } I_1 / I_2 = N_2 / N_1 \dots \dots \dots (2.4)$$

Keterangan:

I_0 = arus kumparan primer (A)

I_M = arus pemagnetan (A)

I_1 = arus primer (A)

I_2 = arus sekunder (A)

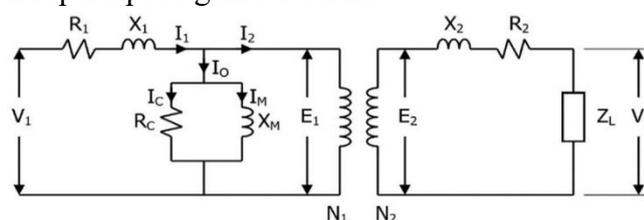
N_1 = lilitan primer

N_2 = lilitan sekunder

2.4.5 Rangkaian ekuivalen ⁹

Dalam pembahasan sebelumnya kita mengabaikan adanya tahanan dan fluks bocor. Analisis selanjutnya akan memperhitungkan kedua hal tersebut. Tidak seluruh fluks (Φ) yang dihasilkan oleh arus pemagnetan IM merupakan fluks bersama (Φ_M), sebagian darinya hanya mencakup kumparan primer (Φ_1) atau kumparan sekunder saja (Φ_2).

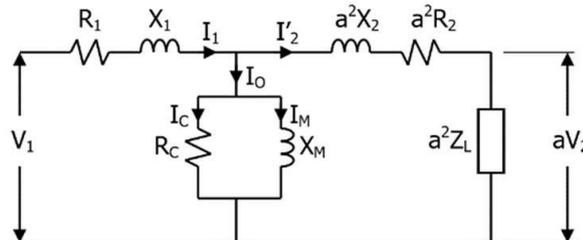
Dalam model rangkaian (rangkaian ekuivalen) yang dipakai untuk menganalisis kerja suatu transformator, adanya fluks bocor Φ_1 dan Φ_2 ditunjukkan sebagai reaktansi X_1 dan X_2 . Sedang rugi tahanan ditunjukkan dengan R_1 dan R_2 . Dengan demikian model rangkaian dapat dituliskan seperti pada gambar berikut :



Gambar 2.14 Rangkaian Ekuivalen 1

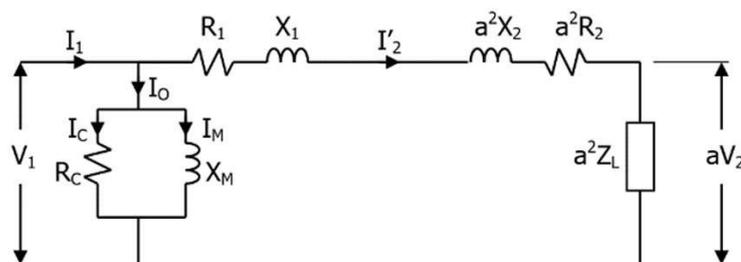
⁹ Zuhail. 2000. *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama. Hal 47

Apabila parameter rangkaian sekunder dinyatakan dalam harga rangkaian primer, harganya perlu dikalikan dengan faktor a . Sekarang model rangkaian menjadi seperti terlihat pada gambar berikut :



Gambar 2.15 Rangkaian Ekivalen 2

Untuk memudahkan analisis (perhitungan), model rangkaian tersebut dapat diubah menjadi seperti dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 2.16 Rangkaian Ekivalen 3

2.4.6 Parameter transformator¹⁰

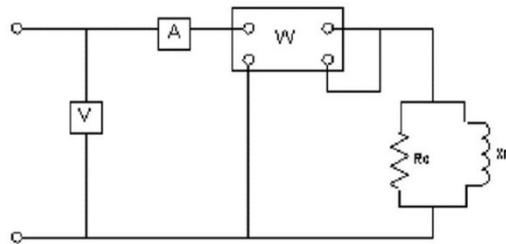
Parameter transformator yang terdapat pada model rangkaian (rangkaian ekivalen) R_c , X_M , R_{ek} , dan X_{ek} , dapat ditentukan besarnya dengan dua macam pengukuran (test) yaitu : Pengukuran beban nol dan Pengukuran hubung singkat.

1. Pengukuran Beban Nol

Dalam keadaan tanpa beban bila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan V_1 , maka hanya I_0 yang mengalir.

¹⁰ Sogen, Markus Dwiyanto Tobi. 2018. *Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses pada Transformator Distribusi di PT.PLN(Persero) Area Sorong*. Jurnal Teknik Elektro. 4(1).

Rangkaian pengukuran untuk keadaan tanpa beban adalah seperti gambar berikut :



Gambar 2.17 Rangkaian Pengukuran Beban Nol

Dari pengukuran didapatkan data :

- Daya masuk (P1) → ditunjukkan oleh wattmeter
- Arus I0 → ditunjukkan oleh ampermeter
- tegangan V1 → ditunjukkan oleh voltmeter

Dari ketiga data tersebut dapat ditentukan : $R_C = \frac{V_1^2}{P_1}$

$$Z_o = \frac{V_1}{I_o}$$

Sedangkan : $Z_o = R_C // jX_m = \frac{jX_m R_C}{R_C + jX_m} \dots\dots\dots(2.5)$

Sehingga dapat dinyatakan : $\frac{V_1}{I_o} = \frac{jX_m R_C}{R_C + jX_m} \dots\dots\dots(2.6)$

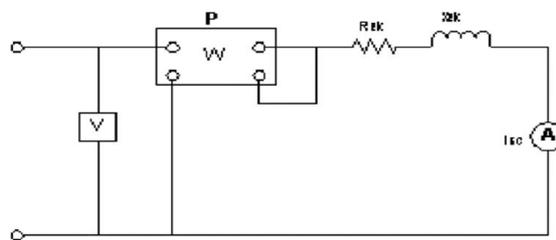
Keterangan:

- Rc = tahanan tembaga (Ω)
- Zo = impedansi primer (Ω)
- Xm = reaktansi pemagnetan (Ω)

Dengan menggantikan Rc setara dengan persamaan diatas maka besarnya Xm dapat ditentukan.

2. Pengukuran Hubung Singkat

Hubungan singkat berarti kombinasi beban ZL diperkecil menjadi nol, sehingga hanya impedansi $Z_{ek} = R_{ek} + jX_{ek}$ yang membatasi arus. Karena harga R_{ek} dan X_{ek} ini relatif kecil, harus dijaga agar tegangan yang masuk (V_{hs}) cukup kecil sehingga arus yang dihasilkan tidak melebihi arus nominal. Harga I_0 akan relatif kecil bila dibandingkan dengan arus nominal, sehingga pada pengukuran ini dapat diabaikan. Rangkaian pengukuran untuk keadaan hubung singkat adalah seperti gambar berikut :



Gambar 2.18 Rangkaian Pengukuran Hubung Singkat

Dari pengukuran didapatkan data :

- Daya yang masuk (P_{hs}) → ditunjukkan oleh wattmeter
- Arus I_{hs} → ditunjukkan oleh ampermeter
- Tegangan V_{hs} → ditunjukkan oleh voltmeter

Dengan mengukur tegangan V_{hs} , arus I_{hs} , dan daya P_{hs} , akan dapat dihitung parameter :

$$\text{Tahanan ekivalen : } R_{ek} = \frac{P_{hs}}{(I_{hs})^2} \dots\dots\dots(2.7)$$

$$\text{Impedansi ekivalen : } Z_{ek} = \frac{V_{hs}}{I_{hs}} = R_{ek} + jX_{eq} \dots\dots\dots(2.8)$$

$$\text{Reaktansi ekivalen : } X_{ek} = \sqrt{(Z_{ek})^2 - (R_{ek})^2} \dots\dots\dots(2.9)$$

Keterangan:

R_{ek} = tahanan ekivalen (Ω)

Z_{ek} = impedansi ekivalen (Ω)

X_{ek} = reaktansi ekivalen (Ω)



2.5 Kualitas Daya Listrik¹¹

Sistem penyaluran pada distribusi tenaga listrik yang disalurkan ke konsumen akan berpengaruh terhadap kualitas daya yang diterima oleh konsumen. Kualitas daya listrik ialah suatu konsep penggambaran baik dan buruknya mutu daya listrik diakibatkan karena gangguan pada sistem tenaga listrik. Taraf ukur keandalan serta kualitas terhadap daya listrik ditentukan oleh parameter-parameter yaitu :

1. Frekuensi (Hz) merupakan penjumlahan dari siklus arus bolak-balik per satuan detik.
2. Tegangan (V) yang dimana harus memiliki tegangan yang baik, tegangan yang baik ialah tegangan yang stabil pada nilai yang telah ditentukan. Pemadaman listrik, baik yang direncanakan maupun yang tidak direncanakan.

Maka dari itu sistem penyaluran terhadap kualitas daya harus memiliki kondisi yang baik, kualitas daya yang baik dapat dilihat dari tegangan yang selalu konstan serta tegangan nominal dengan kapasitas daya yang memenuhi, dan mempunyai nilai tegangan yang stabil (konstan), terutama untuk rugi-rugi tegangan yang terjadi di ujung saluran.

Maka dari itu, alat-alat tenaga listrik mengakibatkan tidak dapat beroperasi dengan optimal apabila tegangan yang disalurkan terlalu rendah. Begitu pula dengan tegangan yang tidak stabil yang akan mengakibatkan alat-alat dari sistem tenaga listrik rusak terhadap perubahan tegangan.

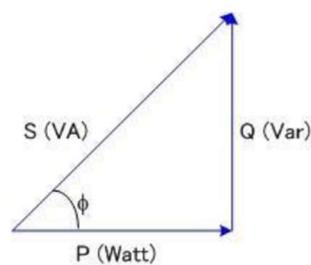
Penyambungan alat-alat sistem tenaga listrik mempunyai syarat tertentu agar dapat meminimalisir adanya perubahan tegangan yang tidak stabil, yaitu tegangan dari sumber harus sama dengan tegangan yang dibutuhkan.

Pada daya listrik mempunyai satuan watt, yang merupakan perkalian dari tegangan (Volt) dan arus (ampere), sehingga besaran daya dinyatakan :

¹¹ Imaulana irsyadi. 2021. *Analisa Mengatasi Transformator Yang Overload Dengan Metoda Uprating Transformator pada Gardu Distribusi di PT.PLN (Persero) ULP Tanjung Karang*. Skripsi. Tidak Diterbitkan. Fakultas Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan. Institut Teknologi PLN: Jakarta.

1. Daya Aktif (P) Daya aktif adalah daya yang terpakai untuk melakukan energy sebenarnya. Dengan satuan pada daya aktif adalah Watt.
2. Daya Reaktif (Q) Daya reaktif merupakan jumlah daya yang diperlukan untuk pembentukan medan magnet. Medan magnet tersebut akan terbentuk fluks medan magnet. dengan satuan dari daya reaktif adalah Var.
3. Daya Semu (S) Daya semu merupakan daya yang dihasilkan oleh perkalian anatar tegangan dan arus dalam suatu jaringan. Beban yang bersifat daya semu adalah beban yang bersifat resistansi. Dengan satuan pada daya semu adalah VA.

Segitiga daya merupakan suatu segitiga yang menggambarkan hubungan matematika antara daya semu, daya aktif dan daya reaktif.



Keterangan :

S = Daya Semu (VA)

Q = Daya Reaktif (Var)

P = Daya Aktif (Watt)

Gambar 2.19 Segitiga Daya

2.6 Pembebanan Transformator Daya¹²

Pengertian beban merupakan sirkit akhir pemanfaatan dari jaringan tenaga listrik yang harus dilayani oleh sumber tenaga listrik tersebut untuk diubah menjadi bentuk energi lain seperti cahaya, panas, gerakan, magnet, dan sebagainya.

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

¹² Muh Randi WS. 2020. *Studi Analisa Dampak Overload Transformator Terhadap Kualitas Daya di PT.PLN(Persero) ULP Pangkep*. Skripsi. Tidak Diterbitkan. Fakultas Teknik. Universitas Muhammadiyah Makasar: Makasar. Hal 20



dapat mengatasi semua gangguan yang terjadi tanpa melakukan pemadaman terhadap bebannya.

2.6.1 Perhitungan arus beban penuh

Daya transformator dalam perhitungan setiap phasa dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$S = V \times I \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana:

S = daya transformator (kVA)

V = tegangan pada phasa (V)

I = arus pada phasa (A)

Daya transformator bila ditinjau dari sisi tegangan tinggi (primer) dapat diketahui dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$S = \sqrt{3} \times V \times I \dots\dots\dots(2.11)$$

Dimana:

S = daya transformator (kVA)

V = tegangan sisi primer transformator (V)

I = arus (A)

Sehingga untuk mengitung arus beban penuh (IFL) dapat menggunakan persamaan:

$$IFL = S/V \times \sqrt{3} \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana:

IFL = arus beban penuh (A)

S = daya transformator (kVA)

V = tegangan sisi sekunder transformator (V)



Dan untuk menghitung arus rata-rata beban transformator menggunakan persamaan berikut :

$$I \text{ rata - rata} = \frac{(IR + IS + IT)}{3} \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana:

I rata-rata = arus rata-rata beban (A)

IR, IS, IT = arus tiap fasa (A)

2.6.2 Perhitungan persentase pembebanan transformator¹³

$$\% \text{Beban} = S \text{ Total Beban} / S \text{ Transformator} \times 100\% \dots\dots(2.14)$$

Keterangan :

STotal : Total daya yang tersalurkan (KVA)

STransformator : Daya pada transformator (KVA)

2.6.3 Perhitungan analisis pertumbuhan beban transformator menggunakan metode least square¹⁴

Oleh karena faktor pembebanan ini menjadi penyebab utama kerusakan pada overload maka disini penulis hendak mencoba menganalisa mengenai perkiraan pembebanan dalam beberapa tahun kedepan guna mengantisipasi berapa lama transformator ini akan bekerja sesuai dengan standarnya, dan harus di uprating kembali. Perhitungannya menggunakan Metode Least Square. Metode ini adalah metode yang digunakan untuk menentukan persamaan trend data yang mencakup analisa Time Series dengan dua kasus data genap dan ganjil (Pangestu Subagyo, 2013).

¹³ Imaulana irsyadi. 2021. *Analisa Mengatasi Transformator Yang Overload Dengan Metoda Uprating Transformator pada Gardu Distribusi di PT.PLN (Persero) ULP Tanjung Karang*. Skripsi.Tidak Diterbitkan. Fakultas Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan. Institut Teknologi PLN: Jakarta. Hal 21

¹⁴ Nugraha,MT.& Dian,F. (2021). *Penannggulangan Overload Transformator Distribusi dengan Metode Uprating di Gardu PNBS 20 KV ULP Pangandaran*. SNETO. 297



Adapun persamaan trend dengan metode Least Square menurut (Sutjipto dkk, 2019) sebagai berikut :

$$Y_n = a + bx \dots \dots \dots (2.15)$$

Untuk mencari nilai a dan b dari persamaan trend dapat digunakan dua persamaan normal sebagai berikut :

$$\Sigma Y = n.a + b. \Sigma X \text{ dan } \Sigma XY = a. \Sigma X + b. \Sigma X^2$$

Bila titik tengah data sebagai tahun dasar, maka $\Sigma X = 0$ dan dapat dihilangkan dari kedua persamaan diatas dan menjadi :

$$a = \frac{\Sigma Y}{n} \dots \dots \dots (2.16)$$

$$b = \frac{\Sigma XY}{\Sigma X^2} \dots \dots \dots (2.17)$$

Dimana:

- Y_n = data berkala (time series)
- X = variabel waktu
- a = nilai trend pada tahun dasar
- b = rata-rata pertumbuhan nilai trend pada tiap tahun

2.7 Overload pada Transformator¹⁵

Menurut PT.PLN (Persero), transformator distribusi diusahakan agar tidak dibebani lebih dari 80 % atau dibawah 40 %. Jika melebihi atau kurang dari nilai tersebut transformator bisa dikatakan overload atau underload. Diusahakan agar transformator tidak dibebani keluar dari range tersebut. Bila beban transformator terlalu besar maka dilakukan penggantian transformator atau penyisipan transformator atau mutasi transformator. Overload akan

¹⁵ Muh Randi WS. 2020. *Studi Analisa Dampak Overload Transformator Terhadap Kualitas Daya di PT.PLN(Persero) ULP Pangkep*. Skripsi. Tidak Diterbitkan. Fakultas Teknik. Universitas Muhammadiyah Makasar: Makasar. Hal 21



menyebabkan transformator menjadi panas dan kawat tidak sanggup lagi menahan beban, sehingga timbul panas yang menyebabkan naiknya suhu lilitan tersebut. Kenaikan ini menyebabkan rusaknya isolasi lilitan pada kumparan transformator.

Transformator mempunyai batasan-batasan dalam operasinya. Apabila transformator digunakan secara terus-menerus dalam kondisi overload, maka akan mengalami peningkatan pada suhu dan panas pada transformator pun bertambah. Sehingga akan merusak isolasi, material dan transformator akan rusak. Selain itu, mempengaruhi kualitas daya transformator, drop tegangan pada ujung jaringan dan berakibat susut umur pada transformator (Samsurizal & Hadinoto, 2020).

2.8 Uprating Transformator¹⁶

Metode uprating transformator ini juga berfungsi untuk mengatasi overload pada transformator. Metode ini paling simpel atau mudah tanpa syarat-syarat apapun untuk mengatasi transformator overload. Metode uprating yaitu penambahan daya transformator misalnya dari 100kVA menjadi 200kVA, 200 kVA di uprating menjadi 400kVA. Adapun beberapa faktor kenapa harus di lakukannya uprating transformator untuk mengurangi overload.

1. Finansial

Jika dilihat perbedaan dari transformator sisip. Metode uprating atau penambahan daya transformator adalah jauh lebih murah di banding transformator sisip. Karena pada dasarnya, uprating transformator ini hanya menambah daya misalkan dari 200kVA menjadi 400 kVA sedangkan transformator sisip ini harus melakukan beberapa perencanaan dari segi perencanaan pembangunan, perhitungan, finansial, lahan, waktu, tempat yang tepat seperti diperkotaan, material, penjualan kVA terhadap

¹⁶ Samsurizal, Benyamin H. 2020. *Studi Analisa Dampak Overload Transformator Terhadap Kualitas Daya di PT.PLN(Persero) UP3 Pondok Gede*. Kilat. 9 (1).



konsumen seperti didaerah perkotaan sehingga penjualan listrik kekonsumen tidak sia sia dan lain sebagainya. Disamping itu metode transformator sisip jauh lebih mahal dibanding uprating transformator. Karena metode uprating transformator hanya menambah kapasitas daya yang lebih besar dari sebelumnya.

2. Lahan

Untuk melakukan uprating transformator hanya menambah daya yang lebih besar dari daya sebelumnya. Sehingga tidak membutuhkan lahan yang luas.

3. Material

Metode uprating transformator tidak dibutuhkan lagi untuk memberi material sehingga metode ini adalah yang paling tepat khususnya wilayah ULP Indralaya.