

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian yang Relevan

Pada penelitian yang dilakukan oleh Akhori Saputra mengenai Analisis Penanggulangan Overload Transformator Distribusi Dengan Metode Uprating di PT PLN (Persero) ULP Sutami menjelaskan bahwa untuk mengetahui faktor- faktor yang mempengaruhi transformator dalam keadaan *overload* dan melihat rugi- rugi daya beserta nilai efisiensi pada transformator sebelum dan sesudah *uprating* transformator. Diketahui bahwa dari hasil analisis beserta perhitungannya setelah *uprating* transformator, persentase pembebanan trafo berkurang dari persentase pembebanan 95,05% dari kapasitas transformator 200kVA menjadi 73% dengan penambahan daya ke transformator sebesar 250kVA. Metode uprating transformator ini menjadi metode yang digunakan untuk menanggulangi *overload* transformator pada gardu KRGK 0136 dikarenakan metode ini tidak membutuhkan lahan yang luas bahkan material tambahan.

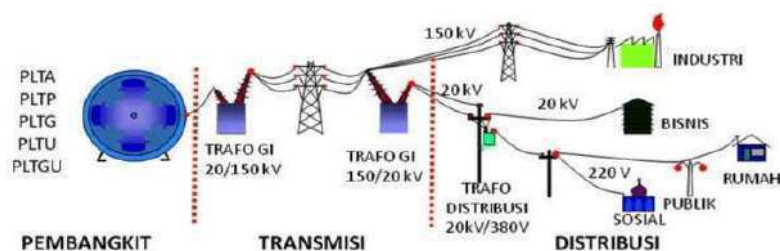
Pada jurnal listrik yang disusun oleh Nur Risya Difa Kusuma Ningrum, dkk mengenai Analisis Perbandingan Uprating dan Sisip Transformator Tiga Fase untuk Mengantisipasi Terjadinya Overload pada Transformator Distribusi Penyulang GJN-12 Nomor Tiang U3-89/1 PT PLN (Persero) ULP Yogyakarta Kota menjelaskan bahwa pada dilakukan perbandingan pengaruh *uprating* dan sisip transformator untuk mengatasi *overload* transformator. Perbandingan dilakukan dengan simulasi *uprating* dan sisip transformator menggunakan aplikasi ETAP untuk mengetahui pengaruh metode – metode tersebut pada pembebanan dan persentase drop tegangan. Selain itu juga dilakukan perbandingan biaya menggunakan perbandingan Rancangan Anggaran Biaya (RAB) pada pekerjaan *uprating* dan sisip transformator. Hasil dari analisis tersebut menunjukkan bahwa efektivitas sama pada kedua metode tersebut karena persentase pembebanan dan drop tegangan mengalami penurunan yang sama. Sedangkan dari segi biaya, metode *uprating* transformator membutuhkan biaya yang lebih murah sehingga uprating lebih efisien dari sisip transformator dalam

mengantisipasi terjadinya overload pada transformator distribusi penyulang GJN-12 nomor tiang U3-89/1 PT PLN (Persero) ULP Yogyakarta Kota.

2.2. Landasan Teori

2.2.1. Pendistribusian Tenaga Listrik

Energi listrik yang kita gunakan sehari-hari diperoleh melalui proses yang panjang mulai dari pembangkit, transmisi, distribusi, hingga ke konsumen industri maupun rumah tangga. Awal mulanya listrik dibangkitkan di pembangkit, lalu tegangan yang dihasilkan dari pembangkit dinaikkan menggunakan transformator *step-up* yang kemudian disalurkan melalui jaringan transmisi tegangan ekstra tinggi (500kV) atau tegangan tinggi (70kV dan/atau 150kV) menuju gardu induk dan konsumen industri (150kV). Tujuan tegangan dinaikkan sebelum disalurkan melalui jaringan transmisi agar meminimalisir rugi-rugi daya akibat panjangnya saluran. Di gardu induk, tegangan diturunkan ke tegangan menengah (20kV) menggunakan trafo *step-down* dan dialirkan melalui jaringan distribusi primer menuju gardu distribusi dan konsumen menengah (20kV). Pada gardu distribusi inilah transformator distribusi memiliki peran untuk menurunkan tegangan menengah (20kV) menjadi tegangan rendah (380/220 Volt) sebelum akhirnya disalurkan ke konsumen akhir seperti konsumen rumah tangga, fasilitas komersial, dan industri kecil melalui jaringan distribusi sekunder.



Gambar 2.1. Saluran Distribusi Listrik

<https://artema.co.id/saluran-distribusi-listrik/>

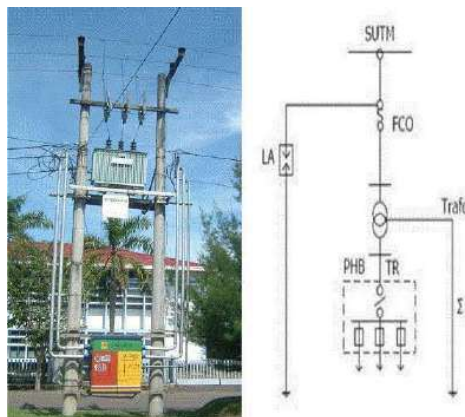
Distribusi dilihat dari tegangannya dibagi menjadi distribusi primer dan distribusi sekunder [1]. Distribusi primer berfungsi menyalurkan listrik dari transmisi

ke penyulang-penyulang (*feeder*) setelah trafo *step-down* menurunkan tegangannya menjadi 20 kV. Tegangan ini diklasifikasikan sebagai tegangan menengah (TM). Saluran distribusi primer terdiri dari saluran udara (SUTM) dan kabel bawah tanah (SKTM). Sebelum masuk ke distribusi sekunder, trafo *step-down* akan menurunkan tegangan menjadi tegangan pakai. Distribusi sekunder adalah saluran dari trafo *step-down* distribusi ke kWh pelanggan. Tegangan pada distribusi sekunder diklasifikasikan sebagai tegangan rendah (TR) yaitu 380/220 Volt.

Sistem distribusi memiliki peran penting dalam sistem tenaga listrik. Hal ini disebabkan karena jaringan distribusi adalah bagian akhir dari sistem tenaga listrik yang memiliki fungsi menyalurkan energi ke konsumen. Sistem ini menjadi penghubung penyedia tenaga listrik dengan pelanggan, sehingga kualitas dan kontinuitas penyaluran sangat bergantung pada keandalan jaringan distribusi.

2.2.2. Gardu Distribusi

Secara umum, gardu induk distribusi tenaga listrik adalah instalasi listrik yang terdiri dari Peralatan Penyambung Tegangan Menengah (PHB-TM), Transformator Distribusi (TD), dan Peralatan Penyambung Tegangan Rendah (PHB-TR). Fungsi utama gardu induk distribusi adalah mendistribusikan dan menyediakan energi listrik untuk memenuhi kebutuhan pelanggan pada jaringan tegangan menengah (TM) 20 kV dan jaringan tegangan rendah (TR) 220/380 V.[3]



Gambar 2.2. Gardu Distribusi

Gardu Distribusi dibedakan menjadi beberapa jenis menurut konstruksi fisik, fungsi, dan kapasitasnya untuk memenuhi kebutuhan pelanggan. Berikut adalah jenis – jenis gardu distribusi:

a. Gardu Beton

Gardu beton adalah jenis gardu yang seluruh komponen utama instalasinya seperti transformator dan peralatan proteksi/*switching* tersusun di dalam suatu struktur sipil yang telah dirancang, dibangun, dan dioperasikan dengan metode konstruksi menggunakan pelindung beton/campuran semen.



Gambar 2.3. Gardu Beton

<https://share.google/images/jME03MIEFnauQ3Gc>

b. Gardu Metal/Kios

Gardu Metal/Kios merupakan gardu dengan bangunan struktur prefabrikasi yang terbuat dari bahan baja, fiberglass, atau gabungan keduanya, yang dapat dirakit di tempat yang telah ditentukan untuk pembangunan gardu distribusi. Ada beberapa jenis konstruksi yang tersedia, yaitu Kios Kompak, Kios Modular, dan Kios Bertingkat. Pada gardu ini termasuk jenis gardu pasang dalam, yaitu semua komponen instalasi utamanya terpasang di dalam bangunan gardu.



Gambar 2.4. Gardu Metal/Kios

<https://share.google/images/7Gb47M8DQfZGy7gQj>

c. Gardu Cantol

Gardu induk distribusi tipe cantol adalah jenis gardu induk luar ruangan, di mana semua komponen utamanya terpasang di area terbuka tanpa struktur pelindung khusus. Gardu induk jenis ini umumnya menggunakan transformator dengan kapasitas hingga 100 kVA, baik untuk sistem tiga fasa maupun satu fasa. Transformator yang digunakan adalah CSP (*Completely Self Protected Transformer*), yang dilengkapi dengan peralatan switching dan sistem proteksi yang terintegrasi di dalam tangki.

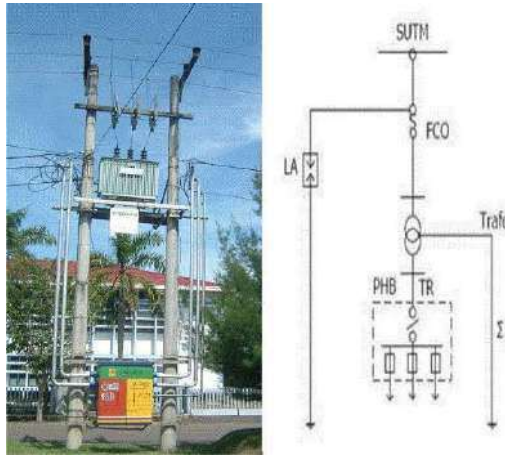


Gambar 2.5. Gardu Cantol

<https://share.google/images/6iCXmNR61RbEjd8zS>

d. Gardu Portal

Gardu portal merupakan tipe gardu distribusi pasang luar. Konstruksinya terdiri dari dua tiang atau lebih, dilengkapi dengan transformator yang diletakkan di atas platform, serta lemari panel atau PHB-TR di bagian bawah, pada ketinggian yang ditentukan untuk memudahkan proses pemeliharaan. Secara umum, konfigurasi Gardu Tiang yang terhubung dengan SUTM adalah tipe T section, dengan alat proteksi *Fuse Cut-Out* (FCO) yang berfungsi untuk melindungi dari hubungan singkat pada transformator, serta elemen pelebur (pengaman lebur tipe *expulsion*) dan *Lightning Arrester* (LA) untuk mencegah lonjakan tegangan pada transformator akibat petir.



Gambar 2.6. Gardu Portal dan SLD

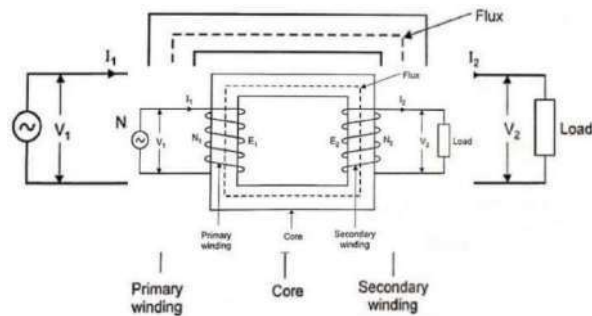
<https://share.google/images/6no1hHDpfiAtPO9WC>

Pada Gardu Distribusi terdapat beberapa komponen instalasi yang terpasang, komponen gardu distribusi dibagi menjadi 2, yaitu :

1. Komponen Utama (Bagian Atas Gardu)
 - *Lightning Arrester* (LA)
 - *Fused Cut Out* (FCO atau CO)
 - Wiring Gardu atau Pengawatan Gardu
 - Tiang
 - Trafo Distribusi
 - Rangka Gardu
 - Pipa Jurusan
2. Komponen Utama (Bagian Atas Gardu)
 - Saklar Utama
 - Rel Tembaga atau Rel Jurusan
 - NH-Fuse jurusan
 - Kabel Jurusan (NYY atau NYFGBY)
 - Kabel penghubung dari Trafo ke PHB-TR)

2.2.3. Transformator

Transformator adalah perangkat listrik statis yang memiliki kemampuan untuk mengubah tegangan arus bolak-balik menggunakan prinsip induksi elektromagnetik. Alat ini terdiri dari kumparan primer dan sekunder yang dililit pada inti besi dengan permeabilitas tinggi. Saat arus bolak-balik mengalir melalui kumparan primer, terjadi fluks magnet yang menginduksi tegangan pada kumparan sekunder sesuai dengan rasio jumlah lilitan yang ada. [4]



Gambar 2.7. Prinsip Kerja Transformator

<https://share.google/images/fcyMVIH83vJ1jIom7>

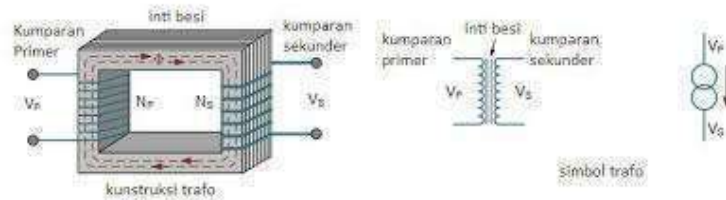
Transformator banyak dimanfaatkan dalam sistem kelistrikan untuk mendistribusikan energi dari sumber pembangkit ke konsumen. Berdasarkan fungsinya di jaringan listrik, transformator diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori seperti transformator daya, distribusi, dan proteksi.

Dalam sistem distribusi, transformator bertugas menyesuaikan tegangan menengah ke tegangan rendah untuk memenuhi kebutuhan beban di rumah tangga, industri, dan sektor komersial. Secara struktural, transformator bisa menggunakan sistem pendinginan kering atau berbasis minyak, sekaligus dilengkapi dengan perlindungan mekanis dan isolasi listrik yang sesuai dengan standar keselamatan yang berlaku. Transformator menjadi elemen vital dalam memastikan kelangsungan penyaluran daya dan stabilitas tegangan dalam jaringan listrik.

Transformator terdiri dari beberapa komponen utama yang bekerja untuk memastikan kinerja optimal. Berikut adalah bagian-bagian transformator beserta fungsinya:

1. Inti Besi

Inti Besi memiliki fungsi untuk memudahkan aliran fluksi yang dihasilkan oleh arus listrik yang mengalir melalui kumparan. Inti besi terbuat dari lembaran-lembaran besi tipis yang memiliki isolasi, untuk mengurangi panas yang muncul (sebagau rugi-rugi besi) akibat Eddy Current.[5]



Gambar 2.8. Inti Besi

<https://share.google/images/9PsxIeW4kDwWeJtxc>

2. Kumparan

Kumparan Transformator terdiri dari serangkaian lilitan kawat berisolasi yang membentuk kumparan. Kumparan transformator mencakup kumparan primer dan kumparan sekunder yang diisolasi dari inti besi serta antar kumparan dengan menggunakan isolasi yang *solid* seperti karton, pertinak, dan lain-lain. Kumparan ini berfungsi untuk mengubah tegangan dan arus.



Gambar 2.9. Kumparan

<https://share.google/images/84poWJVuh1fEdjAZM>

3. Bushing

Bushing pada transformator adalah elemen isolasi yang berperan sebagai media penghantarantara konduktor bertegangan di dalam transformator dengan sistem kelistrikan luar tanpa menciptakan hubungan singkat ke body transformator

ataupun ke tanah. Bushing biasanya terbuat dari material isolator seperti porselen atau resin epoxy, di mana terdapat konduktor yang menghubungkan dengan kumparan transformator. Komponen ini dirancang untuk menahan tegangan tinggi dan menjamin bahwa transisi arus dari lilitan transformator ke jaringan listrik tetap aman. Selain itu, desain dan kapasitas isolasinya disesuaikan dengan standar operasional untuk mencegah terjadinya loncatan listrik, kebocoran arus, atau kegagalan isolasi saat transformator beroperasi.



Gambar 2.10. *Bushing* Transformator

<https://share.google/images/ZVCnWuoIL2OzhEisM>

4. Minyak Transformator

Dalam sistem transformator daya, terutama transformator berkapasitas besar, kumparan dan inti transformator umumnya terendam dalam minyak transformator. Minyak ini berperan penting sebagai isolator listrik sekaligus media perpindahan panas. Minyak transformator menjaga keandalan isolasi dan membantu pendinginan komponen internal transformator. Agar dapat berfungsi optimal, minyak transformator harus memenuhi beberapa persyaratan teknis, antara lain:

- a. Kekuatan dielektrik yang tinggi untuk mencegah kegagalan isolasi.
- b. Konduksi panas yang baik dan berat jenis yang rendah, memungkinkan partikel halus mengendap dengan cepat dan tidak mengganggu sistem pendingin.

- c. Viskositas rendah untuk memastikan sirkulasi minyak yang efektif, sehingga menghasilkan proses pendinginan yang lebih efisien.
- d. Titik nyala yang tinggi dan volatilitas yang rendah untuk mengurangi risiko kebakaran dan kehilangan volume minyak.
- e. Stabilitas kimia yang baik untuk mencegah degradasi minyak dan kerusakan komponen transformator..



Gambar 2.11. Minyak Transformator

5. Tangki Transformator

Tangki transformator memiliki fungsi untuk menampung minyak transformator dan melindungi bagian-bagian transformer yang terendam dalam minyak. Ukuran tangki disesuaikan dengan ukuran inti dan kumparan yang ada.



Gambar 2.12. Tangki Transformator

<https://share.google/images/KJ4jFNriEV9VCr5Zj>

6. Konservator

Konservator di dalam transformator berfungsi sebagai wadah tambahan yang di letakkan di atas badan trafo dan terhubung langsung dengan tangki utama yang mengandung minyak isolasi. Komponen tersebut memiliki peran sebagai ruang

untuk ekspansi minyak ketika terjadi fluktuasi suhu saat pengoperasian. Ketika suhu naik, kapasitas minyak trafo akan meningkat dan sebagian dari minyak tersebut akan berpindah masuk ke dalam konservator, sedangkan ketika suhu turun, minyak akan mengalir kembali ke tangki utama. Konservator ini menjamin kestabilan tekanan di dalam trafo sehingga isolasi minyak tetap terlindungi dari paparan udara luar.



Gambar 2.13. Konservator

<https://share.google/images/0bbOx5e92KHbjQuRx>

Sistem ini biasanya dilengkapi dengan silica gel breather yang berfungsi untuk menyaring kelembaban agar tidak mencemari minyak trafo.



Gambar 2.14, Silica Gel

<https://share.google/images/ihPUqLZPNdp82uBtU>

7. Sistem Pendingin Transformator

Pendingin transformator berfungsi menjaga suhu operasi agar tetap stabil sehingga isolasi, kumparan, dan inti besi tidak mengalami kerusakan akibat panas berlebih. Pada saat transformator bekerja, rugi-rugi inti (*core loss*) dan rugi-rugi tembaga (*copper loss*) menghasilkan panas yang harus dibuang secara kontinu. Sistem pendingin dirancang untuk mengalirkan panas dari dalam tangki menuju lingkungan melalui fluida pendingin maupun permukaan konduktif. Secara umum, transformator menggunakan dua jenis pendinginan utama, yaitu sistem kering dan sistem minyak. Transformator kering (*dry type*) biasanya menggunakan sirkulasi udara alami (AN) atau udara paksa dengan kipas (AF), dan diterapkan pada kapasitas daya yang lebih kecil atau instalasi dalam ruangan. Sedangkan untuk sistem minyak menggunakan minyak transformator (ONAN, ONAF, OFAF, OFWF).

Secara teknis, pemilihan sistem pendingin disesuaikan dengan kapasitas daya trafo, lokasi penempatan, batas kenaikan suhu yang diizinkan, dan efisiensi termal yang diinginkan.



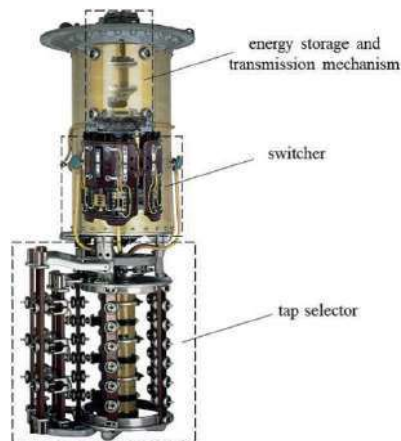
Gambar 2.15. Sistem Pendingin Kering

<https://share.google/images/Ewuxs4kWEyB6AjEsm>

8. Tap Changer Transformator

Pengubah tap atau tap changer adalah komponen pada transformator yang digunakan untuk mengatur perbandingan lilitan antara sisi primer dan sekunder guna menyesuaikan tegangan keluaran. Tap changer dipasang pada belitan

tegangan tinggi karena perubahan jumlah lilitan pada sisi ini tidak menyebabkan arus yang besar. Secara umum, tap changer terbagi menjadi dua jenis, yaitu *On Load Tap Changer* (OLTC) dan *Off Circuit Tap Changer* (OCTC). OLTC memungkinkan perubahan posisi tap dilakukan saat transformator masih beroperasi tanpa memutus aliran beban, sedangkan OCTC hanya dapat diubah ketika transformator dalam kondisi tidak bertegangan. Secara konstruksi, tap changer bekerja dengan mengalihkan sambungan lilitan ke titik tertentu pada belitan trafo untuk mendapatkan tegangan sesuai kebutuhan sistem. Keberadaan tap changer memungkinkan pengaturan tegangan secara fleksibel untuk menjaga kestabilan sistem distribusi atau transmisi listrik, terutama saat terjadi variasi beban atau penurunan tegangan pada jaringan.



Gambar 2.16. *Tap Changer* Transformator

<https://share.google/images/0gwLL510C9nmKT93S>

2.2.4. Jenis – Jenis Transformator

Dalam sistem kelistrikan, transformator diklasifikasikan ke dalam berbagai jenis sesuai dengan kebutuhan spesifiknya. Kebutuhan ini mencakup aplikasi dalam pembangkitan daya, transmisi daya, dan distribusi daya. Transformator dapat dikategorikan berdasarkan level tegangan, material inti atau media yang digunakan, konfigurasi lilitan, dan penggunaannya.

a. Jenis – Jenis Transformator Berdasarkan Level Tegangan

Transformator yang diklasifikasikan berdasarkan level tegangan adalah yang paling umum dan sering digunakan. Klasifikasi ini pada dasarnya ditentukan oleh rasio jumlah lilitan pada kumparan primer terhadap kumparan sekunder. Transformator dibagi menjadi dua jenis berdasarkan level tegangan: *step-up* dan *step-down*.

– Trafo *Step Up*

Transformator *step-up* adalah jenis transformator yang dirancang untuk meningkatkan tegangan arus bolak-balik (AC) dari level rendah ke level yang lebih tinggi. Tegangan keluaran yang lebih tinggi pada sisi primer daripada sisi sekundernya dengan menambahkan lebih banyak lilitan pada kumparan sekunder daripada pada kumparan primer. Dalam sistem pembangkitan daya, transformator ini berfungsi sebagai penghubung antara generator dan jaringan listrik..

– Transformator *Step Down*

Trafo *step-down* atau trafo penurun tegangan, berfungsi untuk menurunkan tegangan AC dari level tinggi ke level yang lebih rendah. Pada jenis ini, jumlah lilitan pada kumparan primer lebih banyak daripada kumparan sekunder. Dalam jaringan distribusi, trafo *step-down* biasanya digunakan untuk mengubah tegangan tinggi pada saluran listrik menjadi tegangan rendah yang aman untuk peralatan rumah tangga.

b. Jenis – Jenis Transformator Berdasarkan Inti (*Core*) Transformator

– Transformator Inti Udara

Pada trafo inti udara, kumparan primer dan sekunder dililitkan di sekitar inti yang terbuat dari bahan non-magnetik, biasanya berbentuk tabung berongga seperti kertas atau karton. Fluks magnet yang menghubungkan kedua kumparan ini terjadi melalui udara. Tingkat kopling, atau induktansi bersama, lebih rendah daripada trafo inti besi. Rugi-rugi akibat histeresis dan arus eddy yang biasanya terjadi pada inti besi dapat diminimalkan atau bahkan dihilangkan pada jenis ini. Trafo inti udara sering digunakan dalam rangkaian frekuensi tinggi.

- Transformator Inti Besi

Trafo inti besi memiliki kumparan primer dan sekunder yang dililitkan di sekitar inti yang terdiri dari lembaran besi tipis berlapis. Jenis ini menawarkan efisiensi yang lebih tinggi daripada trafo inti udara, berkat sifat magnetik dan konduktif besi, yang memfasilitasi aliran fluks magnetik dari arus listrik melalui kumparan dan mengurangi panas yang dihasilkan. Trafo inti besi umumnya digunakan untuk aplikasi frekuensi rendah.

- c. Jenis – Jenis Transformator Berdasarkan Pengaturan Lilitannya

- Trafo Otomatis (*Auto Transformer*)

Auto Transformer, juga dikenal sebagai autotransformator, adalah jenis transformator listrik yang hanya menggunakan satu kumparan, di mana kumparan primer dan sekunder terintegrasi menjadi satu rangkaian yang terhubung secara fisik dan magnetik. Susunan lilitan ini sangat berbeda dari transformator konvensional, yang biasanya memiliki dua kumparan terpisah untuk kumparan primer dan sekunder. Autotransformator sering digunakan untuk menaikkan atau menurunkan tegangan dalam rentang seperti 100V–110V–120V, 220V–230V–240V, atau bahkan dari 110V ke 220V.

- d. Jenis – Jenis Transformator Berdasarkan Penggunaannya

Trafo bisa dimanfaatkan untuk berbagai kebutuhan. Jenis trafo berdasarkan penggunaannya ini dapat dibagi menjadi trafo daya, trafo distribusi, trafo pengukuran, dan trafo perlindungan.

- Trafo Daya

Trafo daya adalah trafo berukuran besar yang dirancang khusus untuk mentransfer daya listrik bertegangan tinggi, hingga 33 kV. Trafo ini biasanya dipasang di pembangkit listrik atau gardu induk transmisi dan dilengkapi dengan insulasi tingkat tinggi untuk memastikan keselamatan operasional.

- Trafo Distribusi

Trafo distribusi berperan dalam menyalurkan energi listrik dari sumber listrik ke area perumahan atau industri. Umumnya, trafo ini mendistribusikan listrik pada tegangan rendah di bawah 33 kV, dengan

rentang keluaran 220V hingga 440V untuk keperluan rumah tangga dan industri.

- Trafo Pengukuran

Trafo pengukuran, juga dikenal sebagai trafo instrumen atau trafo pengukuran, digunakan untuk mengukur parameter listrik seperti tegangan, arus, dan daya. Jenis-jenis ini biasanya dibagi menjadi trafo tegangan (trafo potensial) dan trafo arus (trafo arus), beserta varian lainnya tergantung pada kebutuhan pengukuran.

- Trafo Proteksi

Trafo proteksi dirancang untuk melindungi komponen listrik dari kerusakan akibat gangguan. Perbedaan utamanya dari transformator pengukuran terletak pada tingkat akurasi, sedangkan transformator perlindungan memerlukan presisi yang lebih tinggi untuk mendeteksi dan merespons ancaman dengan cepat dan akurat.

2.2.5. Kualitas Daya Listrik (*Power Quality*)

Listrik berkualitas tinggi adalah listrik yang memiliki tegangan serta frekuensi stabil sesuai dengan nilai standar yang ditentukan. Dalam batas yang telah ditetapkan, frekuensinya konstan dan sangat mendekati nilai nominal (persentase) [6]. Salah satu permasalahan yang sering terjadi dalam kualitas daya adalah adanya daya yang memiliki penyimpangan tegangan, arus, dan frekuensi yang akan dapat mengakibatkan kerusakan pada peralatan. Proses transmisi listrik dari pembangkit listrik ke konsumen dilakukan dengan mematuhi parameter listrik yang diperbolehkan, seperti arus, tegangan, frekuensi, dan bentuk gelombang.

Perubahan atau penyimpangan yang tidak sesuai dari parameter tersebut bisa berdampak negatif pada kualitas catu daya yang berpotensi menyebabkan operasi yang kurang efisien dan bahkan dapat merusak perangkat (Von Meier Alexander, 2006). Kualitas daya listrik sangat dipengaruhi oleh berbagai jenis beban non-linear, beban yang tidak seimbang, serta distorsi harmonik yang melebihi batas yang ditetapkan. Catu daya yang buruk dapat meningkatkan rugi-rugi pada beban dan dapat menurunkan kapasitas dari generator.

2.2.6. Pembebanan Transformator

Performa transformator terhadap tegangan tinggi (primer) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut [7]:

$$S = I \times V \quad (2.1)$$

Dimana :

S = Daya transformator

V = Tegangan pasa fasa

I = Arus fasa (Arus jurusan yang akan dihitung 0)

Berikut adalah rumus untuk dapat menghitung arus beban penuh (I_{FL}) :

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} \quad (2.2)$$

Dimana :

I_{FL} = arus beban penuh (A)

S = Daya transformator (kVA)

V = Tegangan sisi sekunder transformator (V)

Persentase pembebanan pada transformator dapat ditemukan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\%beban = \frac{I_{Rata-rata}}{I_{FL}} \quad (2.3)$$

Yang mana rumus untuk menghitung rata-rata arus beban ($I_{Rata-rata}$), yaitu :

$$I_{Rata-rat} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \quad (2.4)$$

Dimana :

$I_{\text{Rata-rata}}$ = rata-rata arus beban (A)

I_{FL} = arus beban penuh (A)

I_{R} = arus fasa R (A)

I_{S} = arus fasa S (A)

I_{T} = arus fasa T(A)

2.2.7. Ketidakseimbangan Transformator

Trafo dikatakan dalam keadaan seimbang maka keadaan trafo tersebut :

- Ketiga vektor arus/tegangan sama besar.
- Ketiga vektor saling membentuk sudut 120° satu sama lain.

Saat salah satu atau kedua syarat keadan seimbang di trafo tidak dipenuhi, terdapat tiga kemungkinan untuk keadaan tidak seimbang, yaitu sebagai berikut:

- Ketiga vektor memiliki besar yang sama, tetapi tidak membentuk sudut 120° di antara mereka.
- Ketiga vektor memiliki besar yang berbeda, meskipun membentuk sudut 120° di antara satu dengan lainnya.
- Ketiga vektor tidak memiliki besar yang sama dan juga tidak membuat sudut 120° di antara mereka.[8].

Saat ketiga fase berada dalam keadaan tidak seimbang, arus akan mengalir menuju kabel netral transformator. Dengan adanya arus pada kabel netral transformator, maka kerugian daya pada jaringan distribusi sekunder akan bertambah. Kerugian yang disebabkan oleh ketidakseimbangan beban ini akan memberikan dampak signifikan baik bagi konsumen maupun PLN. [8].

2.2.8. Rugi Daya (Power Losses)

Rugi daya, juga dikenal sebagai rugi daya, adalah energi yang hilang ketika energi listrik dialihkan dari sumber daya utama ke beban. Rugi pada pengkabelan dan trafo yang digunakan sering menyebabkan rugi daya yang signifikan selama proses transmisi dan pendistribusian daya. Dua jenis kehilangan daya sangat memengaruhi tegangan dan kualitas daya yang ditransmisikan ke pelanggan. [6]

a. Rugi- Rugi Saluran

Rugi-rugi saluran muncul akibat tahanan listrik pada konduktor yang dilalui arus. Ketika arus mengalir melalui penghantar, sebagian energi berubah menjadi panas sesuai dengan karakteristik material, panjang saluran, penampang kabel, serta besarnya arus beban. Selain akibat tahanan, rugi-rugi saluran juga dapat dipengaruhi oleh reaktansi induktif dan kapasitif, terutama pada jaringan tegangan menengah atau tinggi. Faktor eksternal seperti suhu lingkungan, sambungan yang kurang baik, dan kualitas isolasi kabel juga berperan dalam besarnya rugi-rugi energi sepanjang jaringan.

b. Rugi- Rugi Transformator

Saat transformator beroperasi, maka panas akan timbul pada transformator tersebut. Panas yang dihasilkan oleh transformator selama operasinya dikenal sebagai rugi-rugi transformator. Ada tiga jenis rugi-rugi utama pada transformator, yaitu:

– Rugi- rugi Tembaga (I^2R)

Rugi tembaga adalah rugi yang dihasilkan oleh hambatan konduktor/tembaga yang digunakan sebagai bahan pembuat kumparan. Rugi ini diakibatkan oleh adanya resistansi bahan.

– *Eddy Current*

Eddy current atau arus pusar adalah arus listrik yang timbul di dalam material penghantar, khususnya pada inti transformator atau peralatan elektromagnetik, akibat adanya perubahan fluks magnet yang mengalir melalui material tersebut. Arus ini membentuk lintasan melingkar (seperti pusaran) di dalam inti logam dan tidak ikut mengalir ke rangkaian luar.

Karena bergerak di dalam material penghantar, *eddy current* menghasilkan panas sehingga menyebabkan rugi-rugi daya. Semakin besar frekuensi dan semakin rendah resistivitas material inti, semakin besar pula rugi akibat arus eddy.

– Rugi- Rugi Histerisis

Rugi-rugi histerisis adalah energi yang hilang pada inti transformator atau material feromagnetik akibat proses pembalikan arah magnetisasi yang terjadi secara berulang ketika fluks magnet bolak-balik mengalir. Pada besi yang mendapat fluks bolak-balik, rugi histerisis per *cycle* berbanding dengan luas lup histerisis [9]

Setiap kali medan magnet berubah arah, molekul-molekul magnet dalam inti harus menyesuaikan orientasinya, dan proses ini tidak sepenuhnya elastis. Akibatnya, sebagian energi listrik berubah menjadi panas pada inti. Besarnya rugi histerisis dipengaruhi oleh frekuensi, densitas fluks magnet, dan jenis bahan inti. Semakin sering medan magnet berubah (frekuensi tinggi) dan semakin besar kerapatan fluks, maka rugi histerisis akan meningkat.

– Rugi- Rugi Arus Netral Pada Transformator

Ketidakseimbangan beban antar fasa di sisi sekunder transformator (yaitu fasa R, S, dan T) dapat menyebabkan arus mengalir pada konduktor netral transformator. Arus yang mengalir melalui konduktor netral ini pada akhirnya menyebabkan rugi-rugi daya. (Dahlan,2013)

Berikut adalah rumus untuk menghitung rugi- rugi pada penghantar netral trafo :

$$P_N = I_N^2 \times R_N \quad (2.5)$$

Dimana :

P_N = Rugi netral penghantar trafo (Watt)

I_N = Arus netral trafo (A)

R_N = Tahanan netral penghantar trafo (Ohm)

Losses yang diakibatkan karena arus netral yang mengalir ke tanah (*ground*) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$P_G = I_G^2 \times R_G \quad (2.6)$$

Dimana :

P_G = *losses* akibat arus netral yang mengalir ke tanah/*ground* (Watt)

I_G = Arus netral yang mengalir ke tanah/*ground* (A)

R_G = Tahanan pembumian netral pada trafo (Ohm)

2.2.9. Efisiensi Transformator

Efisiensi transformator yaitu perbandingan antara daya *output* yang diterima beban dengan daya *input* dari sumber. Nilainya dinyatakan dalam persen dan dipengaruhi oleh rugi inti serta rugi tembaga. Karena transformator tidak memiliki bagian bergerak, efisiensinya umumnya tinggi, bisa mencapai di atas 95%. Efisiensi maksimum terjadi saat rugi inti dan rugi tembaga berada saat kondisi seimbang. Desain inti, kualitas belitan, sistem pendinginan, serta tingkat beban sangat menentukan besarnya efisiensi transformator.

Perhitungan efisiensi transformator yaitu perbandingan antara daya keluaran dengan daya masukan. Rumus perhitungan efisiensi trafo yaitu sebagai berikut :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.7)$$

$$P_{in} = P_{out} + \text{Rugi} - \text{rugi} \quad (2.8)$$

Jadi :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \text{Rugi} - \text{rugi}} \times 100\% \quad (2.9)$$

Dimana:

- η = efisiensi transformator
- P_{out} = daya *output* (Watt)
- P_{in} = daya *input* (Watt)

2.2.10. Overload Transformator

Overload adalah kondisi dimana beban trafo melebihi kapasitas trafo tersebut. *Overload* adalah masalah yang sering terjadi pada transformator distribusi dan dapat menyebabkan penurunan performa sistem kelistrikan secara signifikan. Jika dibiarkan dalam waktu yang lama maka akan terjadi akumulasi panas dan peningkatan suhu yang akan merusak isolasi pada trafo bahkan komponen lainnya sehingga dapat menyebabkan kerusakan isolasi atau sistem proteksi pada trafo bahkan dapat menyebabkan trafo tersebut padam. Panas yang disebabkan oleh kelebihan beban ini juga dapat memperpendek umur trafo. Untuk menjaga keandalan sistem distribusi listrik, sangat penting untuk memperhatikan pembebanan transformator agar efisiensi tetap optimal dan kerusakan dapat dihindari. Persentase *Health Index* pembebanan transformator dikatakan cukup baik apabila pembebanannya sebesar 60% - <80%.[10]

2.2.11. Metode Uprating Transformator

Metode peningkatan daya transformator (uprating) dirancang untuk mengatasi masalah kelebihan beban yang sering terjadi pada perangkat-perangkat tersebut. Dengan meningkatnya jumlah pelanggan listrik atau peningkatan beban daya, PLN dituntut untuk meningkatkan kinerja transformator guna memastikan kelancaran pasokan listrik kepada masyarakat dan menghindari gangguan serius yang dapat merusak komponen-komponen kelistrikan, seperti transformator itu sendiri, gardu induk, atau peralatan keselamatan lainnya. Di antara berbagai pendekatan, metode peningkatan daya (uprating) merupakan yang paling sederhana dan mudah diterapkan, tanpa memerlukan persyaratan khusus untuk menangani kelebihan beban transformator. Secara spesifik, peningkatan daya (uprating) melibatkan peningkatan kapasitas daya transformator, misalnya, dari 100 kVA menjadi 200 kVA.[11]

Proses peningkatan daya (uprating) ini biasanya dilakukan ketika terjadi lonjakan pasokan listrik ke konsumen. Peningkatan ini sejalan dengan lonjakan permintaan listrik yang terus berlanjut dari rumah tangga dan industri di sekitarnya. Hal ini dipicu oleh berbagai aktivitas pelanggan yang menggunakan listrik meningkat, sehingga mendorong perusahaan listrik untuk lebih mengoptimalkan penyaluran daya kepada masyarakat secara keseluruhan.

2.2.12. ETAP

ETAP (*Electrical Transient Analyzer Program*) merupakan *software* analisis sistem tenaga listrik yang digunakan untuk perencanaan, pemodelan, simulasi, dan evaluasi jaringan tenaga listrik. Perangkat lunak ini mampu merepresentasikan sistem tenaga secara menyeluruh mulai dari pembangkitan, transmisi, distribusi, hingga beban akhir.

Di dalam ETAP tersedia berbagai modul analisis seperti aliran daya (*load flow*), hubung singkat (*short circuit*), koordinasi proteksi, analisis harmonisa, motor starting, stabilitas sistem, dan analisis transien. Setiap modul dirancang untuk mendukung pengujian teknis sesuai kebutuhan sistem kelistrikan di lapangan.

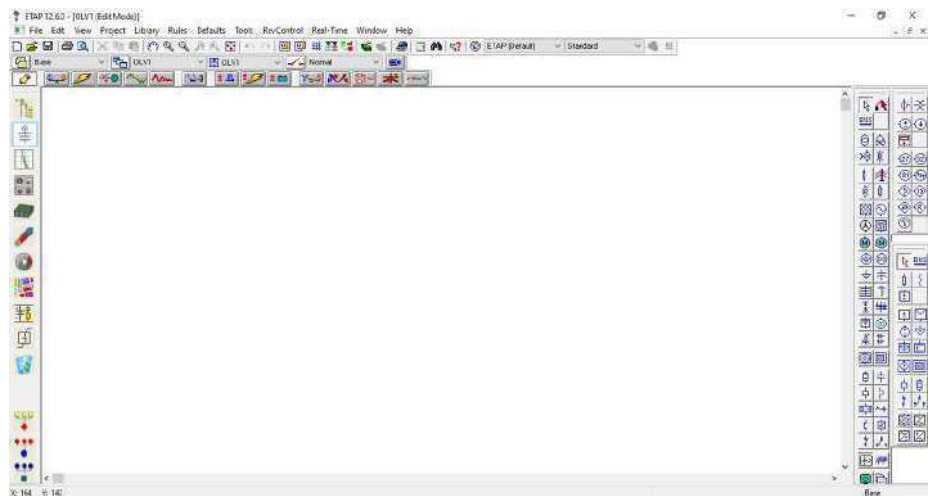
Secara teknis, ETAP bekerja menggunakan metode komputasi numerik untuk menyelesaikan persamaan kelistrikan berdasarkan standar internasional seperti IEC, IEEE, dan ANSI. Perangkat lunak ini juga dilengkapi basis data komponen listrik yang lengkap sehingga pengguna dapat membangun model sistem secara akurat.

Dalam analisis tenaga listrik, diagram saluran tunggal (*single line diagram*) digunakan sebagai representasi sederhana dari sistem 3 fasa. Diagram ini menggantikan tiga garis terpisah dengan satu konduktor sehingga memudahkan pembacaan dan analisis rangkaian. Komponen listrik seperti pemutus rangkaian, transformator, kapasitor, busbar, dan konduktor lainnya digambarkan menggunakan simbol standar. Dalam suatu sistem tenaga, salah satu aspek yang dianalisis adalah aliran daya dan hubung singkat. Untuk melakukan simulasi keduanya, dibutuhkan data generator, transformator, kawat penghantar, beban, dan bus.

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam bekerja dengan ETAP adalah :

- a. *One Line Diagram*, menunjukkan hubungan antara komponen/alat-alat listrik sehingga membentuk suatu sistem kelistrikan.
- b. *Library*, yaitu berisi seluruh alat yang akan digunakan pada sistem kelistrikan. Data elektris maupun mekanis dari alat-alat yang lengkap bisa memudahkan serta memperbaiki yang akan terjadi simulasi.
- c. *Study Case*, berisikan parameter yang berhubungan menggunakan metode studi yang akan dilakukan dengan format akibat analisa.

Gambar berikut menunjukkan tampilan antarmuka ETAP versi 12.6.0. Pada layar tersebut terdapat berbagai komponen seperti kabel, bus, transformator, circuit breaker (CB), beban, saluran transmisi, dan elemen lainnya. Melalui tampilan ini, pengguna dapat menyusun rangkaian untuk menguji kondisi trafo overload dengan memanfaatkan komponen yang tersedia. Setelah rangkaian selesai dibuat, dan nilai-nilai pada tiap komponen sudah diinput maka simulasi dapat dijalankan, dan hasilnya akan langsung ditampilkan secara otomatis di layar ETAP.



Gambar 2.17. *Worksheet* ETAP 12.6.0

<https://share.google/images/XBe1qZi0Og1mFUDgG>