



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Traction Power Supply Substation (TPSS)

Traction Power Supply Substation (TPSS) atau Gardu traksi adalah sebuah gardu listrik yang berfungsi mengubah tenaga listrik yang dipasok oleh industri tenaga listrik agar sesuai dengan tegangan, tipe arus, dan frekuensi yang digunakan di suatu jalur kereta api, trem, atau bus listrik.

Gardu traksi dapat digunakan untuk mengubah arus bolak-balik tiga fasa dengan frekuensi 50 Hz atau 60 Hz menjadi arus listrik satu fasa dengan frekuensi lebih rendah, sebagaimana digunakan oleh banyak jalur kereta api. Gardu traksi juga dapat digunakan untuk menyearahkan arus bolak-balik menjadi arus searah untuk digunakan oleh jalur kereta api yang menggunakan listrik arus searah sebagai sumber tenaganya.

Gardu traksi biasanya terdesentralisasi (beberapa gardu langsung memasok ke listrik aliran atas atau rel ketiga, sehingga tidak perlu menggunakan jaringan distribusi arus listrik traksi) atau tersentralisasi (satu gardu memasok ke jaringan tenaga traksi, dan biasanya juga memasok ke listrik aliran atas atau rel ketiga).

Gardu traksi dalam sistem elektrifikasi DC merupakan sumber daya listrik untuk mengoperasikan kereta api listrik atau LRT melalui saluran penyulang (feeder) dengan memperoleh pasokan listrik dari saluran transmisi PLN 20 kV yang diubah menjadi tegangan operasi 750 Volt DC. Untuk sistem DC, peralatan inti gardu traksi adalah transformator dan rectifier (penyearah) yang digunakan untuk mengubah pasokan utilitas menjadi DC, rectifier (penyearah) 6, 12 atau 24 pulsa. Di gardu traksi DC terdapat pemutus sirkuit untuk memastikan sistem terlindungi dengan memadai dan perangkat switching memungkinkan operasi dan pemeliharaan sistem.

Untuk sistem AC, peralatan inti gardu traksi adalah transformator yang terhubung ke catu daya tiga fasa untuk mengubahnya menjadi tegangan fasa



tunggal yang cocok untuk sistem elektrifikasi rel yang digunakan. Terdapat pemutus sirkuit untuk memastikan sistem terlindungi dengan memadai dan perangkat switching memungkinkan operasi dan pemeliharaan sistem.

Umumnya gardu traksi akan dikendalikan oleh sistem SCADA dan kemungkinan akan memberikan daya untuk sistem tambahan seperti persinyalan dan sisi lintasan lainnya. Gardu traksi memiliki kendala operasional dan stabilitas yang lebih keras dari pada gardu distribusi daya normal. Termasuk sering terkena hubung singkat, lonjakan transien, depresi tegangan, dan kenaikan tegangan. Penggunaan drive traksi yang dikendalikan thyristor menghasilkan harmonisa yang signifikan yang memengaruhi sistem pasokan.

2.2 Transformator

Transformator atau sering disebut dengan istilah Trafo adalah suatu alat listrik yang dapat mengubah taraf suatu tegangan AC ke taraf yang lain. Maksud dari perubahan taraf tersebut diantaranya seperti untuk menurunkan Tegangan AC dari 220VAC ke 12 VAC ataupun menaikkan Tegangan dari 110VAC ke 220 VAC. Transformator atau Trafo ini bekerja mengikuti prinsip Induksi Elektromagnet dan hanya dapat bekerja pada tegangan yang berarus bolak balik (AC).Trafo memegang peranan yang sangat penting untuk pendistribusian tenaga listrik. Trafo menaikkan listrik yang berasal dari pembangkit listrik oleh PLN hingga ratusan kilo Volt untuk di distribusikan dan kemudian Trafo lainnya menurunkan tegangan listrik tersebut ke tegangan yang diperlukan untuk setiap rumah tangga maupun perkantoran yang pada umumnya menggunakan Tegangan AC 220Volt.



2.3 Fungsi Transformator

Dalam penggunaannya transformator memiliki beberapa fungsi sebagai berikut.

a. Distribusi dan Transmisi Listrik

Seperti yang kita ketahui bahwa jarak antara pembangkit listrik dengan beban listrik yang digunakan oleh pelanggan relatif terlalu jauh. Sehingga akan terjadinya drop tegangan. Untuk itu kita harus menaikkan tegangan sebelum distribusi dan transmisi listrik jarak jauh agar drop tegangan tidak terlalu besar serta lebih murah karena kabel yang digunakan lebih kecil (semakin besar tegangan besar maka arus semakin kecil sesuai dengan Hukum kekekalan energi). Seperti yang kita ketahui bahwa jarak antara pembangkit listrik dengan beban listrik yang digunakan oleh pelanggan relatif terlalu jauh. Sehingga akan terjadinya drop tegangan.

b. Rangkaian Kontrol

Pada peralatan elektronik seperti komputer, charger dan berbagai macam peralatan lainnya, transformator sering kali digunakan untuk menurunkan tegangan agar dapat digunakan pada tegangan kontrol (5 Volt, 12 Volt, dsb). Begitu juga rangkaian kontrol motor pada pabrik, Trafo dipakai untuk meng*energize* dan meng*dienergize* kontaktor yang dipakai untuk menghidupkan dan mematikan motor induksi.

c. Rangkaian Pengatur Frekuensi

Dalam dunia radio frekuensi, transformator juga sering kali digunakan untuk mengatur besaran frekuensi yang dihasilkan. Hanya saja bentuk dan dimensinya jauh lebih kecil di bandingkan trafo yang sering kali digunakan pada rangkaian kontrol apalagi transformator atau trafo transmisi listrik.



2.4 Prinsip Kerja Transformator

Prinsip kerja dari trafo melibatkan bagian-bagian utama pada trafo, yaitu: kumparan primer, kumparan sekunder dan inti trafo. Kumparan tersebut mengelilingi inti besi dalam bentuk lilitan. Apabila kumparan pada sisi primer trafo dihubungkan dengan suatu sumber tegangan bolak-balik sinusoidal (V_p), maka akan mengalir arus bolak-balik yang juga sinusoidal (I_p) 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:

$$V_S = -N_S \frac{d\Phi}{dt} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana :

V_S = tegangan induksi pada sisi sekunder (volt)

N_S = jumlah belitan pada sisi sekunder

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

Dari persamaan tersebut diketahui bahwa tegangan induksi yang terbangkitkan pada kumparan trafo berbanding lurus dengan jumlah lilitan kumparan pada inti trafo. 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:

$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{I_S}{I_P} = \frac{N_P}{N_S} = \sqrt{\frac{L_P}{L_S}} = a \dots\dots\dots (2.2)$$



2.5 Jenis – Jenis Transformator

Transformator sendiri merupakan sebuah komponen yang berfungsi untuk mentransfer energi listrik dari satu rangkaian menuju rangkaian lain secara induksi elektromagnetik. Secara umum, trafo ini diproduksi dengan komponen yang sama akan tetapi memiliki spesifikasi berbeda berdasarkan penggunaan, arus, tegangan, tingkat impedansi dan sebagainya. Pada setiap jenis trafo memiliki perbedaan ukuran, nilai dan bentuk antara satu dengan yang lainnya, namun dengan prinsip kerja yang hampir sama. Berikut ini adalah beberapa jenis Trafo berdasarkan masing – masing pengklasifikasiannya.

2.5.1. Transformator berdasarkan level tegangan

Ada 2 jenis transformator yang berdasarkan level tegangan yakni traso step up dan trafo step down.

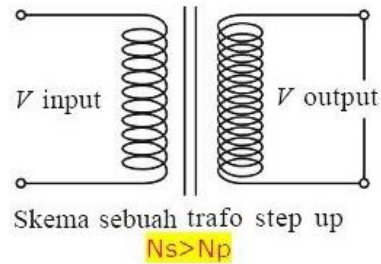
1. Transformator Step Up

Transformeter Step Up adalah jenis transformeter yang memiliki fungsi untuk menaikkan suatu tegangan.

Ciri-ciri Transformaor Step Up :

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

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



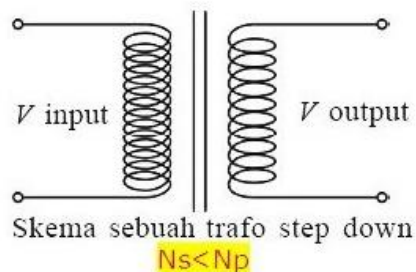
Gambar 2. 1 Transformator Step Up

2. Transformator Step Down

Kebalikan dari trafo step up, transformator Step Down berguna untuk menurunkan tegangan. Ciri – ciri Transformator Step Down :

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



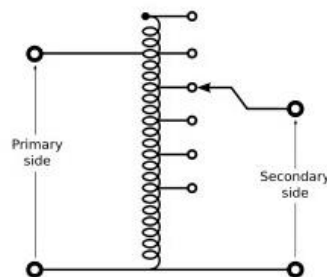
Gambar 2. 2 Transformator Step Down



3. Auto Transformator

Berbeda dengan kedua jenis trafo di atas, Auto Transformator hanya memiliki satu kumparan saja. Satu kumparan ini menjadi kumparan primer sekaligus kumparan sekunder yang disatukan dalam satu rangkaian yang terhubung secara fisik dan magnetis. Selain itu trafo jenis ini tidak memiliki ujung lilitan yang tetap, auto transformator menyediakan lebih banyak pilihan karena ujung lilitan dapat diambil (disadap) dari tengah-tengah lilitan sebagai jalan keluarnya tegangan sekunder.

Perbedaan akan posisi sadapan ini menentukan rasio pada kumparan primer dan sekunder. Sehingga transformator jenis ini memberikan berbagai macam tegangan yang dapat dipilih yaitu step up maupun step down.



Gambar 2. 3 Auto Transformator

2.5.2. Transformator berdasarkan bahan inti

Prinsip kerja transformator dalam mentransfer energi listrik yaitu dengan cara menghantarkan medan elektromagnetik melalui inti trafo. Penggunaan inti trafo dengan bahan yang berbeda menyebabkan perbedaan medan magnet yang dihasilkan oleh proses induksi. Berdasarkan bahan intinya, transformator dapat dibedakan menjadi :

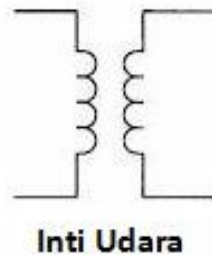
1. Transformator Inti Udara (Air Core Transformer)



Pada trafo jenis ini, gulungan primer dan gulungan sekunder dililitkan pada inti yang berbahan non-magnetik yang umumnya berbentuk tabung berongga. Bahan non-magnetik tersebut bisa berupa kertas atau karton. Jadi proses induksi medan magnet primer dan sekunder hanya melalui medium udara saja.

Trafo ini sering digunakan pada beberapa perangkat elektronik portable seperti radio frekuensi. Tak hanya itu saja, trafo jenis ini juga bisa menjadi pilihan untuk membuat wireless charger, karena kumparan primer pada sumber listrik dan kumparan sekunder pada perangkat yang dicharger.

Kelebihan dari trafo ini yaitu memiliki bobot ringan. Sementara untuk kekurangannya adalah induksi listrik yang dihasilkan lebih lemah dibandingkan dengan trafo berinti besi atau ferrite.



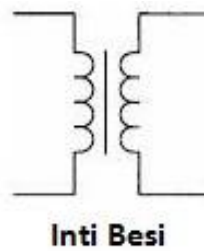
Gambar 2. 4 Transformator Inti Udara

2. Transformator Inti Besi (Iron Core Transformer)

Pada trafo jenis ini, gulungan primer dan gulungan sekunder dililitkan pada inti lempengan besi tipis yang sudah dilaminasi. Plat-plat besi yang digunakan sebagai inti mempunyai bentuk serta ukuran yang bervariasi, diantaranya seperti E, I, U, L dan lain lain. Plat-plat besi tersebut tipis namun disusun berlapis-lapis, sehingga trafo jenis ini memiliki bobot yang lumayan berat.



Trafo ini memiliki tingkat efisiensi yang lebih tinggi, bila dibandingkan dengan trafo yang berinti udara. Hal tersebut disebabkan bahan besi mengandung sifat magnetik dan konduktif, sehingga mempermudah jalannya fluks magnet yang ditimbulkan dengan arus listrik kumparan dan mengurangi suhu panas yang ada.

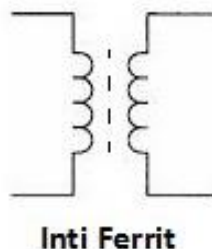


Gambar 2. 5 Transformator Inti Besi

3. Transformator Inti Ferrite

Transformator yang menggunakan bahan ferrite sebagai intinya memiliki daya tembus magnet yang terbilang tinggi. Trafo jenis ini lebih sering digunakan pada peralatan elektronik dibanding dengan elektrik. Trafo ferrite juga mempunyai bentuk dan ukuran yang bervariasi. Sementara untuk intinya secara umum berbentuk seperti huruf E.

Untuk penggunaannya, lebih baik trafo ini digunakan pada trafo yang menangani listrik berfrekuensi tinggi seperti pada Switch Mode Power Supply (SMPS), rectifier transformator dan sebagainya.



Gambar 2. 6 Transformator Inti Ferrite

2.5.3. Transformator berdasarkan penggunaan

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



Gambar 2. 7 Jenis-jenis Transformator Berdasarkan Penggunaan

1. Transformator Daya

Trafo daya berukuran sangat besar dan sering difungsikan untuk mengirim energi listrik menuju ke gardu listrik. Jadi bisa dibilang trafo ini sebagai penghubung antara generator dengan jaringan distribusi utama listrik.

Prinsip kerja dari trafo daya adalah mengubah tegangan rendah berarus tinggi menjadi tegangan tinggi berarus rendah. Tujuannya adalah untuk meminimalisir kehilangan daya pada sistem distribusi daya listrik, sehingga lebih efisien. Sebagian trafo daya mengandung minyak di dalamnya yang berfungsi sebagai pendingin.

2. Transformator Distribusi

Trafo distribusi bekerja pada tahap akhir di dalam sistem distribusi energi listrik. Trafo jenis ini memiliki fungsi untuk mengubah tegangan tinggi menjadi tegangan rendah yaitu sebesar 220 untuk bisa dialirkan ke rumah-rumah penduduk. Trafo distribusi ada yang satu phase atau tiga phase.



Inti dari trafo ini terbuat dari bahan palt baja. Umumnya trafo distribusi bekerja pada tegangan di bawah 200 kVA. Trafo jenis distribusi ini dapat dikelompokkan lagi berdasarkan jenis isolasi, diantaranya adalah jenis kering dan basah.

3. Transformator Pengukuran

Trafo pengukuran juga sering disebut dengan trafo instrumen. Trafo pengukuran berfungsi untuk mengukur peralatan pada sistem daya listrik. Prinsip kerja trafo ini yaitu listrik yang melalui kumparan primer diinsuksikan ke kumparan sekunder untuk diubah ke tegangan dan arus yang lebih kecil agar bisa dihitung.

Perbandingan antara kumparan primer dan kumparan sekunder dapat diatur sehingga bisa meminimalisir kesalahan meskipun hasil yang ditampilkan bukan hasil yang sesungguhnya. Hasil yang ditampilkan haruslah dihitung dengan rumus tertentu sesuai dengan jumlah lilitan antara kumparan primer dan kumparan sekunder.

4. Transformator Proteksi

Transformator proteksi digunakan untuk melindungi komponen listrik. Perbedaan utama antara transformator proteksi dengan transformator pengukuran adalah akurasinya. Dimana transformator proteksi harus lebih akurat jika dibandingkan dengan transformator pengukuran.

2.6 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).

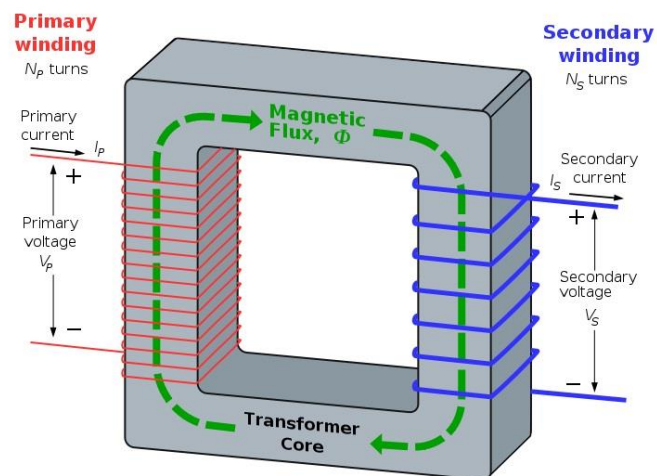


2.6.1. Inti besi

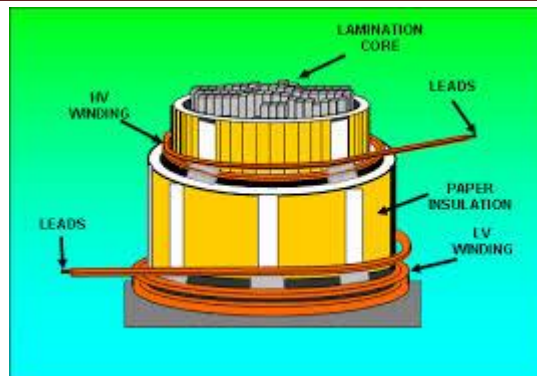
Inti besi berfungsi untuk mempermudah jalan fluksi, magnetik yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Dibuat dari lempengan- lempengan besi tipis yang berisolasi, untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh Eddy Current.

2.6.2. 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. 8 Konstruksi belitan transformator



Gambar 2. 9 Gambaran fisik belitan transformator tenaga



Gambar 2. 10 Komponen-komponen internal transformator

2.6.3. 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.

2.6.4. 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. 11 Bushing Transformator

2.6.5. Tangki konservator

Tangki konservator berfungsi untuk menampung minyak cadangan dan uap/udara akibat pemanasan trafo karena arus beban. Diantara tangki dan trafo dipasangkan relai bucholz yang akan meyerap 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 silica gel dan dia tidak keluar mencemari udara disekitarnya.



Gambar 2. 12 Tangki Konvensator

2.6.6. 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.⁸



Gambar 2. 13 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 yang dialirkan)	OFN
Pendinginan Buatan (Udara)	Oil-immersed Forced-Oil Corculation with Air- Blast Colling (Pendinginan dengan direndam kedalam minyak yang dialirkan dengan semburan udara)	OFB
	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 Circulation with (Pendingin dengan kedalam minyak yang dialirkan dan juga dibantu dengan pendinginan air)	Forced-oil Water Colling	OFW
--	---	-----------------------------	-----

2.6.7. 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.

2.6.8. Alat pernapasan (dehydrating breather)

Alat pernapasan (Dehydrating Breather) Sebagai tempat penampungan pemuaian 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 gell, yang secara khusus dirancang untuk maksud tersebut diatas.

2.7 Daya Aktif, Daya Semu, dan Daya Reaktif

2.7.1. 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).

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cos \theta \dots\dots\dots(2.3)$$

$$P_1 = P_2 \rightarrow V_1 \times I_1 = V_2 \times I_2 \dots\dots\dots(2.4)$$

2.7.2. 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 .

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \dots\dots\dots(2.5)$$

2.7.3. 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).

$$Q = \sqrt{3} \cdot S \sin \theta = \sqrt{3} \cdot VI \sin \theta \dots\dots\dots (2.6)$$

2.8 Rugi-rugi Transformator

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



2.8.1. Rugi variabel

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

$$P_{cu} = I_1^2 R_1 \dots \dots \dots (2.7)$$

$$P_{cu} = I_2^2 R_2 \dots \dots \dots (2.8)$$

Dengan demikian rugi tembaga total:

$$P_{cu} = P_{cu1} + P_{cu2} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \dots \dots \dots (2.9)$$

Jumlah total rugi-rugi pada transformator adalah:

$$P_{\text{rugi total}} = \text{Rugi tembaga} + \text{Rugi inti} \dots \dots \dots (2.10)$$

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

$$P_{t2} = \left(\frac{S_2}{S_1} \right) \times P_{t1} \dots \dots \dots (2.11)$$

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 pengenal

2.8.2. 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).



2.9 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:

$$\text{Persen efisiensi} = \frac{\text{Daya keluaran}}{\text{Daya masukan}} \times 100\%$$

$$\text{Persen efisiensi} = \frac{\text{Daya masukan} - \text{rugi total}}{\text{Daya masukan}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.12)$$

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

Rugi – rugi total terdiri dari rugi inti (no load loss) yang konstan dan rugi tembaga (load loss) yang bervariasi. Rugi inti konstan karena tegangan suplai adalah tegangan rating konstan dan rugi tembaga bervariasi bergantung pada kondisi pembebanan. Jika beban nol, rugi tembaga nol namun rugi besi terjadi dan konstan dalam kondisi tanpa beban, keluarannya nol dan masukan sesuai dengan rugi besi dan karenanya efisiensi transformator adalah nol.

Dengan asumsi tegangan sekunder (V_s) tetap konstan selama kondisi pembebanan tertentu, dengan peningkatan beban, arus sekunder (I_s) meningkat dan karenanya untuk faktor daya beban, keluaran (output) meningkat dan rugi tembaga juga meningkat, kehilangan besi tetap konstan sesuai dengan kondisi tanpa beban, efisiensi meningkat. Ketika pembebanan sedemikian rupa sehingga rugi inti sama dengan rugi tembaga maka efisiensinya maksimal. Jika adanya penambahan beban lebih lanjut sehingga rugi tembaga lebih besar dari rugi inti dan kenaikan output tidak sebesar kenaikan rugi tembaga, akibatnya efisiensi menurun.



Politeknik Negeri Sriwijaya

Efisiensi maksimum transformator untuk beban tertentu terjadi ketika rugi tembaga = rugi inti. Untuk menentukan besarnya beban yang dioperasikan pada saat efisiensi maksimum, berlaku :

$$W_{ef maks} = \sqrt{\frac{\text{Rugi-rugi besi}}{\text{Rugi-rugi tembaga beban penuh}}} \times \text{Beban penuh} \dots\dots\dots (2.13)$$