BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Berdasarkan hasil penelitian terdahulu yang berjudul "Analisis Pembebanan Terhadap Perkiraan Umur Transformator Distribusi 20 kV Penyulang Lowokwaru di PT. PLN(PERSERO) UP3 Malang" dapat disimpulkan bahwa umur trafo dapat dipengaruhi oleh pembebanan (load), ketika pembebanan terlampau tinggi dapat menyebabkan perubahan temperatur hot spot. Hal ini dapat dibuktikan dengan meningkatnya pembebanan dapat mempengaruhi besarnya suhu lilitan, karena suhu lilitan berbanding lurus dengan pembebanan trafo. Semakin besar beban yang dipikul transformator semakin besar pula susut umurnya, demikian juga sebaliknya semakin kecil beban yang dipikul transformator maka semakin kecil pula susut umurnya. Hal ini berkaitan dengan kenaikan suhu pada inti transformator dan belitan kawat. [3]

Transformator adalah peralatan listrik yang mahal, maka harus dijaga dan dipelihara agar memiliki umur penggunaan yang panjang. Umur transformator dapat berkurang akibat beberapa hal. Salah satu penyebab berkurangnya umur penggunaan transformator adalah pembebanan, pembebanan mengakibatkan peningkatan temperatur pada transformator. Panas yang timbul mengakibatkan terjadinya penguraian dari bahan-bahan mempercepat transformator proses yang dapat penuaan suatu transformator.[4]

Aging pada transformator adalah proses penuaan material isolasi, karena terjadinya panas terlalu tinggi akan merubah sifat komponen bagian trafo. Hal ini merupakan faktor utama yang membatasi kemampuan mempertahankan perkiraan umur trafo distribusi Setiap kenaikan sekitar 6°C dari batas yang diizinkan akan mengakibatkan berkurangnya umur. Oleh karena itu, kenaikan suhu ini harus dibatasi. [5]

2.2 Transformator Daya

2.2.1 Pengertian Transformator Daya

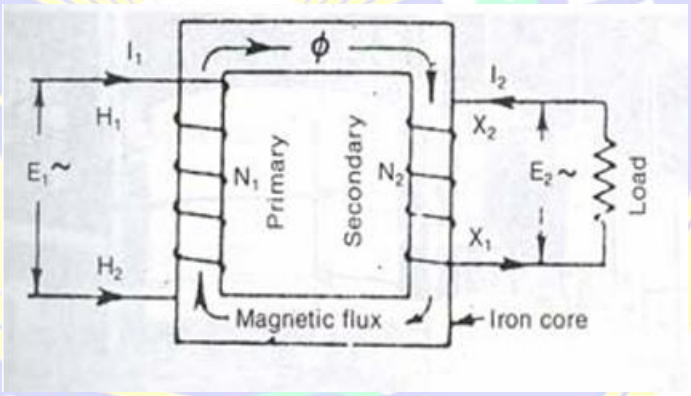
Transormator adalah suatu peralatan listrik statis yang berfungsi untuk mentransfer daya listrik dari satu rangkaian ke rangkaian lain melalui mekanisme induksi elektromagnetik tanpa adanya hubungan konduktif secara langsung.

Perubahn fluks magnet yang dihasilkan oleh arus bolak balik pada lilitan primer akan menginduksi tegangan pada lilitan sekunder sesuai dengan prinsip hukum faraday.

Dalam sistem tenaga listrik, transformator digunakan untuk mengubah tingkat tegangan baik menaikkan (step up) maupun menurunkan tegangan (step down) agar proses penyaluran energi listrik dapat berlangsung dengan efisien dan keandalan yang tinggi. Sebagai komponen esensial dalam jaringan tenaga listrik industri maupun utilitas, transformator memiliki peran kritis dalam menjaga stabilitas sistem, kualitas tegangan, serta kontinuitas suplay daya.[6]

1.2.2 Prinsip Kerja Transformator

Apabila kumparan primer dihubungkan dengan tegangan (sumber), maka akan mengalir arus bolak balik I1 pada kumparan tersebut. Oleh karena kumparan menpunyai inti, arus I1 menimbulkan fluks magnet yang berubah-ubah pada intinya. Akibat adanya fluks magnet yang berubah ubah, pada kumparan primer akan timbul GGL induksi e_P.[7]



Gambar 2.1 Prinsip dasar dari transformator

Besarnya GGL induksi pada kumparan primer adalah:

$$e_{P=-N_P \frac{d\emptyset}{dt}} \quad \text{.....(2.1)}$$

Fluks magnet yang menginduksikan GGL induksi e_P juga dialami oleh kumparan sekunder karena merupakan fluks bersama (mutual fluks). Dengan demikian fluks tersebut menginduksikan GGL induksi e_S pada kumparan sekunder.

Besarnya GGL induksi pada kumparan sekunder adalah:

$$e_{S=-N_S\frac{d\phi}{dt}} \quad \text{..... (2.2)}$$

GGL induksi kumparan primer maksimum adalah (e_P)maks=$N_P\omega\emptyset_m$ dan besarnya tegangan efektif (ep) dapat dihitung dengan persamaan,

e_P=$\frac{E_P\ maks}{\sqrt{2}}$

e_P=$\frac{N_P\omega\emptyset_m}{\sqrt{2}}$

e_P=$\frac{2\pi f N_P\ \emptyset_m\sqrt{2}}{2}$

e_P=3,14.1,41 f $N_P\ \emptyset_m$

e_P =4,44 f $N_P\ \emptyset_m$ ..... (2.3)

Dengan cara yang sama, maka akan didapatkan :

e_s =4,44 f $N_P\ \emptyset_m$ ..... (2.4)

1.2.3 Komponen Utama Trafo

Transformator terdiri dari beberapa bagian utama yaitu inti besi, kumparan transformator, minyak transformator, bushing, tanki konservator, tap changer, pendingin dan bebrapa relai proteksi. [7]

- Inti besi (core)

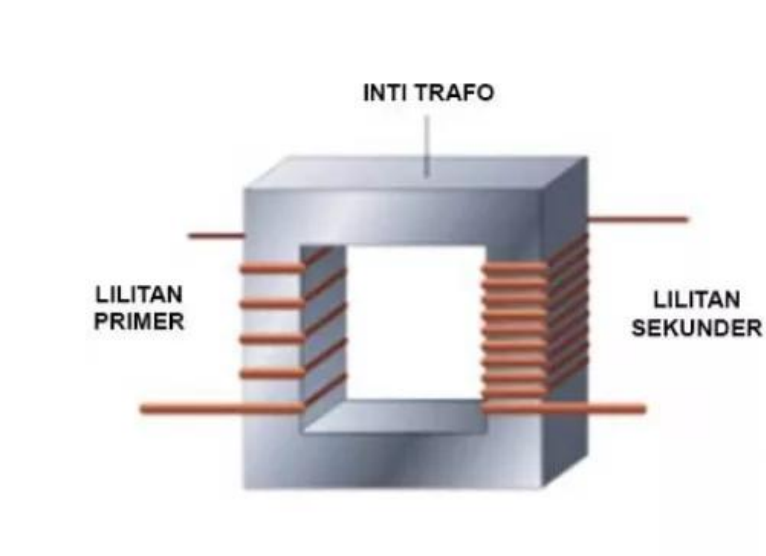
  Inti besi digunakan sebagai media memutar flux yang timbul akibat induksi arus bolak balik pada kumparan yang mengelilingi inti besi sehingga dapat menginduksi kembali ke kumparan yang lain. Dibentuk dari lempengan-lempengan besi tipis berisolasi,untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditibulkan oleh rddy current.



Gambar 2.2 Contoh inti besi (core) transformator

- Kumparan transformator

  Beberapa lilitan kawat berisolasi yang membentuk suatu kumparan atau gulungan. Kumparan tersebut terdiri dari kumparan primer dan kumparan skunder 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 2.3 Contoh kumparan transformator

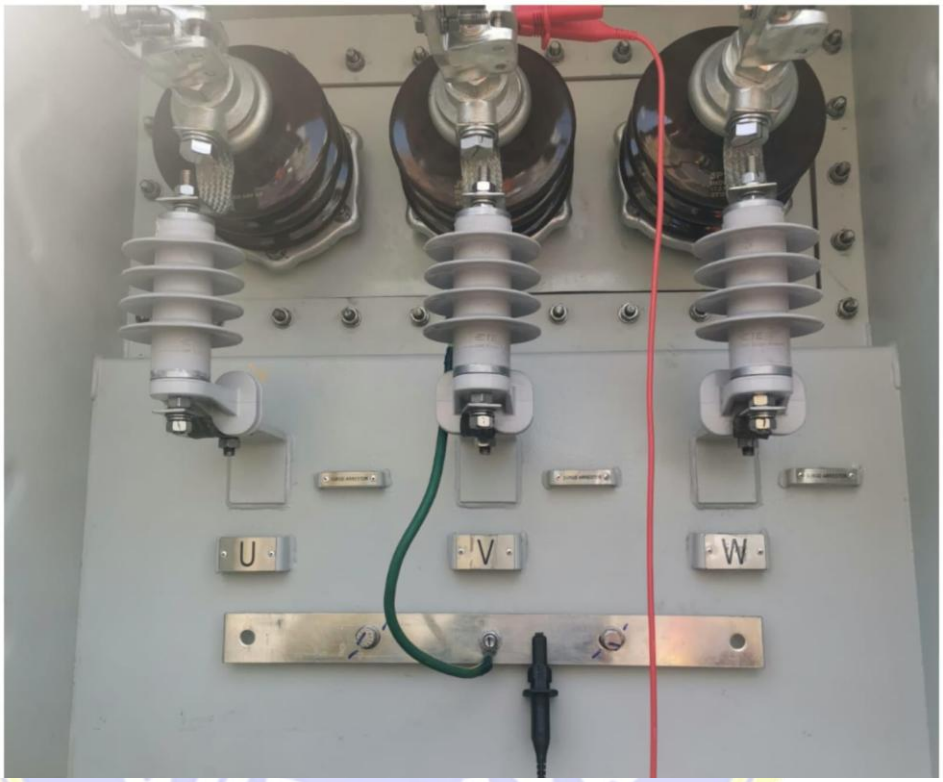
- Minyak transformator

  Minyak transformator merupakan salah satu bahan isolasi cair yang digunakan 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 degan kedua kemampuan ini maka minyak diharapkan akan mamu melindungi transformatordari gangguan.

- Bushing

  Sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator merupakan alat penghubung antara kumparan transformator dengan jaringan luar, bushing sekaligusr berfungsi sebagai penyeka/isolator antara konduktor tersebut dengan tangki transformator.



Gambar 2.4 Bushing Tranformator

- Tangki konservator

  Tangki konservator berfungsi untuk menampung minyak cadangan dan uap/udara akibat pernapasan trafo karena arus beban. Diantara tangki dan trafo dipasangkan relai bucholzt yang akan menyerap gas produksi akibat kerusakan minyak. Untuk mennjaga agar minyak tidak terkontaminasi dengan air, ujung masuk saluran udaramelalui salura pelepasan/venting dilengkapi media

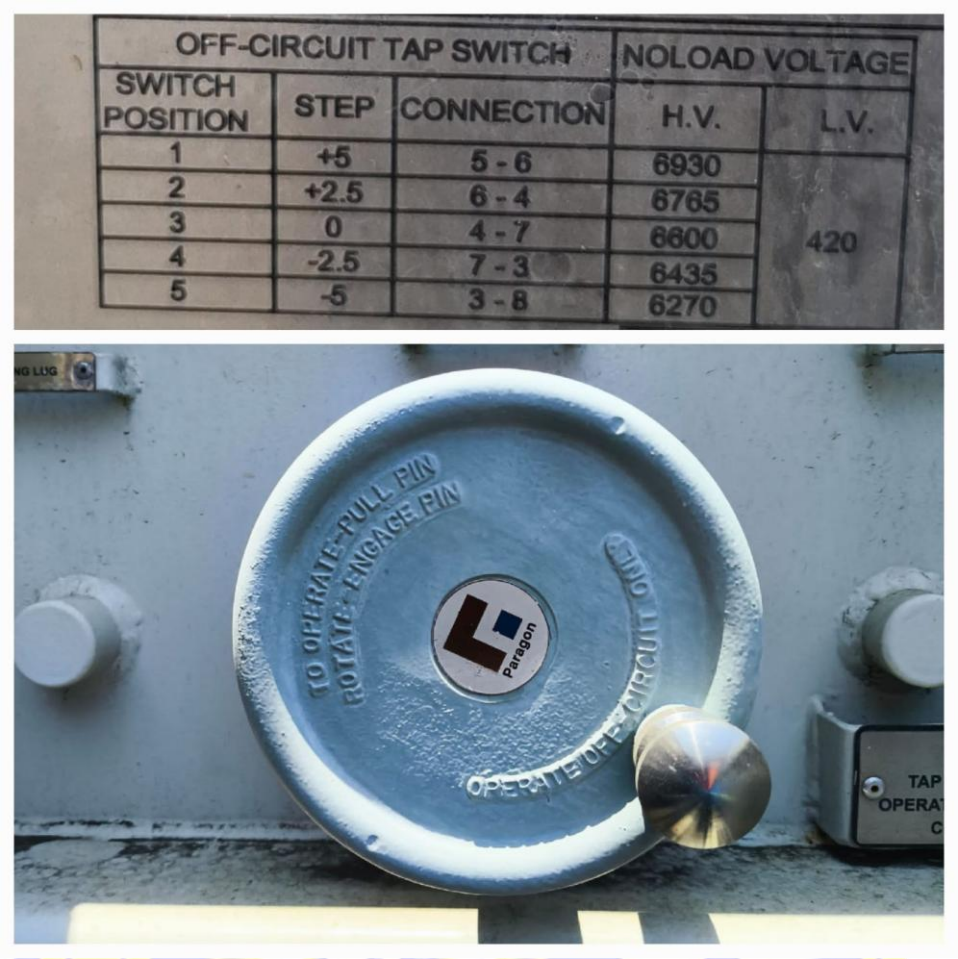
penyerap uap air pada udara, sering diseut dengan silica gel dan dia tidak keluar mencemari udara sekitarnya.



Gambar 2.5 Tangki konservator

- Tap Changer

  Berfungdi untuk menjaga tegangan keluran yang diinginkan dengan input tegangan yang berubah-ubah. Kualitas operasi tegangan 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 pengoperasiannya, tap changer terdiri dari dua tipe yaitu on-load yang bekerja secara otomatis jika merasakan tegangan kurang atau lebih dan off-load yang dapat dipindah tapnya hanya jika trafo tidak berbeban/bertegangan.



Gambar 2.6 tap changer off-load

1.2.4 Sistem Proteksi Transfromator

2.2.4.1 Proteksi

Transformator merupakan salah satu peralatan paling vital dalam sistem tenaga listrik, sehingga diperlukan sistem proteksi yang andal untuk mencegah kerusakan akibat gangguan internal maupun eksternal. Sistem proteksi pada transformator berfungsi untuk mendeteksi kondisi abnormal dan melakukan tindakan pemutusan (trip) sebelum terjadi kerusakan yang lebih parah, serta menjaga kontinuitas pelayanan tenaga listrik. Tujuan utamanya adalah Mendeteksi gangguan secepat mungkin, mencegah kerusakan permanen pada trafo, menjaga keandalan sistem tenaga dan menjamin keselamatan peralatan

dan manusia. Ada beberapa kriteria yang perlu diketahui pada pemasangan suatu sistem proteksi dalam suatu rangkaian sistem tenaga listrik yaitu :

a) Sensitifitas (kepekaan)

   Sensifitas adalah kepekaan rele proteksi terhadap segala macam gangguan dengan tepat yakni gangguan yang terjadi di daerah perlindungannya. Sensitifitas suatu sistem proteksi ditentukan oleh nilai terkecil dari besaran penggerak saat peralatan proteksi mulai beroperasi. Nilai terkecil besaran penggerak berhubungan dengan nilai minimum arus gangguan dalam daerah yang dilindunginya.

b) Selektifitas dan diskriminatif

   Selektif berarti suatu sistem proteksi harus dapat memilih bagian sistem yang harus diisolir apabila rele proteksi mendeteksi gangguan. Bagian yang dipisahkan dari sistem yang sehat sebisanya adalah bagian yang terganggu saja. Diskriminatif berarti suatu sistem proteksi harus mampu membedakan antara kondisi normal dan kondisi abnormal. Ataupun membedakan apakah kondisi abnormal tersebut terjadi di dalam atau di luar daerah proteksinya.

c) Kecepatan

   Sistem proteksi perlu memiliki tingkat kecepatan sebagaimana ditentukan sehingga meningkatkan mutu pelayanan, keamanan manusia, peralatan dan stabilitas operasi.

d) Keandalan

   Suatu sistem proteksi dapat dikatakan andal jika selalu berfungsi sebagaimana yang diharapkan. Sistem proteksi disebut tidak andal bila gagal bekerja pada saat dibutuhkan dan bekerja pada saat proteksi itu tidak seharusnya bekerja.

e) Ekonomis

   Suatu perencanaan teknik yang baik tidak terlepas tentunya dari pertimbangan nilai ekonomisnya. Suatu rele proteksi yang digunakan hendaknya ekonomis mungkin dengan tidak mengesampingkan fungsi dan keandalannya

2.2.4.2 Tipe Proteksi

Ada dua kategori proteksi yang dikenal yaitu proteksi utama (main protection) dan proteksi pembantu (back up protection). Proteksi utama dalah pertahanan utama dan akan membebaskan gangguan pada bagian yang akan diproteksi secepat mungkin. Mengingat keandalan 100 % tidak hanya dari perlindungan tetapi juga dari trafo arus, trafo tegangan dan pemutus rangkaian yang tidak dapat dijamin, untuk itu diperlukan perlindungan pembantu (auxiliary protection) pada alat proteksi tersebut. Proteksi pembantu bekerja bila rele utama gagal dan tidak hanya melindungi daerah berikutnya dengan perlambatan waktu yang lebih lama dari pada relay utamanya.

1.2.4.3 Gangguan Pada Transformator

Gangguan pada transformator adalah segala bentuk kerusakan atau kondisi abnormal yang menyebabkan transformator tidak dapat beroperasi secara normal, baik karena masalah listrik, termal, mekanis, minyak, maupun lingkungan. Gangguan pada transformator dibedakan menjadi dua yaitu gangguan dalam (internal faults) dan gangguan luar (eksternal faults).

a. Gangguan dalam

Gangguan dalam (internal faults) adalah gangguan yang disebabkan karena adanya gangguan yang terjadi di dalam transformator, gangguan itu antara lain :

- Terjadi busur api yang kecil dan pemanasan lokal yang dapat disebabkan oleh cara penyambungan konduktor yang tidak baik, kontak-kontak listrik yang tidak baik dan kerusakan isolasi antara inti baut.
- Gangguan pada sistem pendingin Sebagaimana diketahui, banyak transformator daya mempergunakan minyak transformator sebagai isolasi yang sekaligus merupakan bahan pendingin. Suatu kenyataan adalah bahwa terjadinya suatu gangguan atau kerusakan di dalam transformator, maka dalam minyak itu akan terbentuk sejumlah gas.
- Gangguan hubung singkat. Pada umumnya gangguan ini dapat dideteksi karena akan selalu timbul arus maupun tegangan yang tidak

normal/tidak seimbang. Jenis gangguan ini antara lain, hubung singkat antar belitan, yaitu hubung singkat antara kumparan dengan tanah, hubung singkat dua fasadan k.erusakan pada isolator transformator.

b. Gangguan luar

Jenis gangguan luar (external faults) ini dapat dibedakan atas dua macam, yaitu :

- Hubung singkat luar

  Hubung singkat jenis ini terjadi di luar transformator daya, misalnya: hubung singkat di bus, hubung singkat di feeder dan gangguan hubung singkat di sistem yang merupakan sumber bagi transformator daya tersebut. Gangguan ini dapat dideteksi karena timbulnya arus yang sangat besar, mencapai beberapa ratus kali arus nominalnya.

- Beban lebih (overload)

  Transformator daya dapat beroperasi secara terus menerus pada beban nominalnya. Apabila beban yang dilayani lebih besar 100 %, transformator daya akan mendapat pemanasan lebih. Kondisi ini memungkinkan tidak segera menimbulkan kerusakan pada transformator daya, tetapi apabila berlangsung secara terus-menerus akan mengakibatkan umur isolasi bertambah pendek.

- Arus Lebih

  Keadaan beban lebih berbeda dengan keadaan arus lebih. Pada beban lebih, besar arushanya kira-kira 10 % di atas nominal dan dapat diputuskan setelah berlangsung beberapa puluh menit. Sedangkan pada arus lebih, besar arus mencapai beberapa kali arus nominal dan harus secepat mungkin diputuskan.

1.2.4.4 Jenis Pengaman Transformator

Pengaman transformator adalah perangkat atau sistem yang digunakan untuk mendeteksi dan mengamankan transformator dari gangguan listrik, termal,

mekanis, maupun kegagalan operasional. Tujuan utama pengaman ini adalah mencegah kerusakan lebih lanjut, menjaga kontinuitas sistem, dan menjamin keandalan operasi transformator [8]. Berikut adalah jenis jenis pengaman transformator :

a. Relai Bucholz

Relai bucholz dipasang pada pipa dari maintank ke konservator ataupun dari OLTC ke konservator tergantung design trafonya apakah dikedua pipa tersebut dipasang relai bucholz. Relai bucholz berfungsi untuk mendeteksi dan mengamankan gangguan di dalam transformator yang menimbulkan gas. Selama transformator beroperasi normal, relai akan terisi penuh dengan minyak. Pelampung akan berada pada posisi awal. Bila terjadi gangguan yang kecil didalam tangki transformator, misalnya hubung singkat dalam kumparan, maka akan menimbulkan gas. Gas yang terbentuk akan berkumpul dalam relai pada saat perjalanan menuju tangki konservator, sehingga level minyak dalam relai turun dan akan mengerjakan kontak alarm (kontak pelampung atas). Bila level minyak transformator turun secara perlahan-lahan akibat dari suatu kebocoran, maka pelampung atas akan memberikan sinyal alarm dan bila penurunan minyak tersebut terus berlanjut, maka pelampung bawah akan memberikan sinyal trip. Bila terjadi busur api yang besar, kerusakan minyak akan terjadi dengan cepat dan timbul surja tekanan pada minyak yang bergerak melalui pipa menuju ke relai Bucholz. Pada dasarnya relai bucholz termasuk dalam kategori relai termis. Relai ini digunakan untuk mendeteksi dan mengamankan transformator terhadap gangguan didalam transformator yang menimbulkan gas. Gas yang timbul ini diakibatkan oleh hubung singkat pada kumparan, busur listrik antar laminasi dan busur listrik akibat kontak yang kurang baik.

b. Relai Suhu

- Relay HV/LV Winding Temperature bekerja apabila suhu kumparan trafo melebihi setting dari pada relai HV/LV Winding, besarnya kenaikan suhu adalah sebanding dengan faktor pembebanan dan suhu udara luar trafo. Urutan kerja relai suhu kumparan/ winding ini dibagi 2 tahap yaitu :

mengerjakan alarm (winding temperature alarm) dan mengerjakan perintah trip ke PMT (winding temperature trip).

- Relai HV/LV Oil temperature bekerja apabila suhu minyak trafo melebihi setting dari pada relai HV/LV oil. Besarnya kenaikan suhu adalah sebanding dengan faktor pembebanan dan suhu udara luar trafo. Urutan kerja relai suhu minyak/ oil ini dibagi 2 tahap yaitu : mengerjakan alarm (oil temperatur alarm) dan mengerjakan perintah trip ke PMT (oil temperature trip).

c. Relai Hubung Tanah

Relai gangguan tanah terbatas atau Restricted Earth Fault (REF) untuk mengamankan transformator bila ada gangguan satu fasa ketanah didekat titik netral transformator yang tidak dirasakan oleh rele diferensial.

d. Relai Arus Lebih

Relai arus lebih bekerja berdasarkan adanya kenaikan arus yang melebihi suatu nilai pengaman yang telah ditentukan dan dalam jangka waktu yang telah ditetapkan. Relai arus lebih akan pick up jika besar arus melebihi nilai setting. Pada proteksi transformator daya, relai arus lebih digunakan sebagai tambahan bagi relai differensial untuk memberikan tanggapan terhadap gangguan luar. Relai ini digunakan untuk mengamankan peralatan terhadap gangguan hubung singkat antar fasa, hubung singkat satu fasa ke tanah dan beberapa hal dapat digunakan sebagai pengaman beban lebih.

e. Relai Tekanan Lebih

Relai tekanan lebih berfungsi hampir sama seperti relai buchollz yaitu mengamankan transformator dari gangguan internal. Bedanya relai ini hanya bekerja apabila terjadi kenaikan tekanan gas tiba-tiba yang disebabkan oleh hubung singkat. Relai tekanan lebih ada dua jenis yaitu tipe membran dan tipe pressure relife valve. Tipe membran mempunyai desain plat tipis yag didesain sedemikian rupa yang akan pecah bila menerima tekanan melebihi disainnya. Membran ini hanya sekali pakai sehingga bila pecah harus diganti baru. Sedangkan pressure relife valve adalah Suatu katup yang ditekan oleh sebuah pegas yang didesain sedemikian rupa sehingga apabila terjadi

tekanan didalam transformator melebihi tekanan pegas maka akan membuka dan membuang tekanan keluar bersama-sama sebagian minyak. Katup akan menutup kembali apabila tekanan didalam transformator turun atau lebih kecil dari tekanan pegas.

1.2.4.5 Tujuan pemasangan Relai proteksi Trafo Tenaga

Maksud dan tujuan pemasangan relai proteksi pada transformator daya adalah untuk mengamankan peralatan/system sehingga kerugian akibat gangguan dapat dihindariatau dikurangi menjadi sekecil mungkin dengan cara :

1. Mencegah kerusakan transformator akibat adanya gangguan/ ketidak normalan yang terjadi pada transformator atau gangguan pada bay transformator.
2. Mendeteksi adanya gangguan atau keadaan abnormal lainnya yang dapat membahayakan peralatan atau sistem.
3. Melepaskan (memisahkan) bagian sistem yang terganggu atau yang mengalami keadaan abnormal lainnya secepat mungkin sehingga kerusakan instalasi yang terganggu atau yang dilalui arus gangguan dapat dihindari atau dibatasi seminimum mungkin dan bagian sistem lainnya tetap dapat beroperasi.
4. Memberikan pengamanan cadangan bagi instalasi lainnya.
5. Memberikan pelayanan keandalan dan mutu listrik yang terbaik kepada konsumen.
6. Mengamankan manusia terhadap bahaya yang ditimbulkan oleh listrik.

1.2.5 Fungsi Transformator Daya

Fungsi utama transformator adalah untuk mengubah tegangan dengan menaikkan atau menurunkan tegangan. Menaikkan tegangan atau disebut step-up adalah menaikkan tegangan dari generator ke tingkat lebih tinggi untuk transmisi jarak jauh agar kerugian daya berkurang. Menurunkan tegangan atau step down adalah menurunkan tegangan dari tingkat transmisi menjadi tegangan menengah di gardu hubung, kemudian menjadi tegangan rendah di gardu distribusi untuk

konsumen.transformator daya juga berfungsi untuk menyalurkan daya atau memindahkan energi listrik dari satu rangkaian ke rangkaian lain dengan frekuensi yang sama, baik dari tegangan tinggi atau tegangan menengah atau sebaliknya dan juga untuk mengurangi kerugian daya.

2.3 Spesifikasi Transformator

2.3.1 Data Spesifikasi Trafo

Kapasitas : 2500kVA

Tegangan primer : 6600V

Tegangan sekunder : 420V

Frekuensi : 50Hz

Tipe pendingin : ONAN

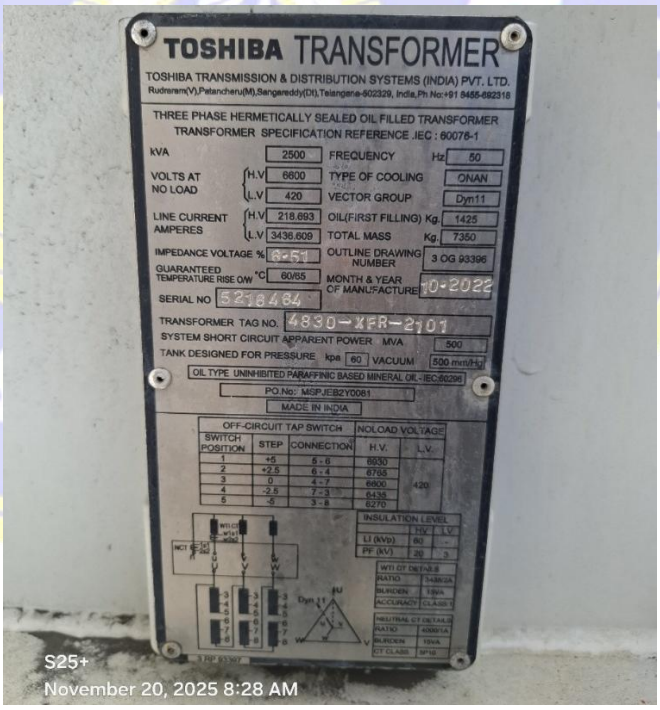
Vector Group : Dyn11

Impedance : 6.51

Oil (first filling) : 1425kg

Total massa : 7350kg

Merk : Toshiba



Gambar 2.7 Nampe plate trafo

2.4 Pendingin Transformator

Pada inti besi dan kumparan-kumparan akan timbul panas akibat rugi-rugi besi dan rugi-rugi tembaga. Bila panas tersebut mengakibatkan kenaikan suhu yang berlebihan, akan merusak isolasi (di dalam transformator). Maka untuk mengurangi kenaikan suhu transformator yang berlebihan maka perlu dilengkapi dengan alat/ sistem pendingin untuk menyalurkan panas keluar transformator. Media yang dipakai pada sistem pendingin dapat berupa Udara/gas, minyak, air dan lain sebagainya. Sedangkan pengalirannya (sirkulasi) dapat dengan cara alamiah (natural) dan tekanan/paksaan. Pada cara alamiah (natural), pengaliran media sebagai akibat adanya perbedaan suhu media dan untuk mempercepat perpindahan panas dari media tersebut ke udara luar diperlukan bidang perpindahan panas yang lebih luas antara media (minyak-udara/gas), dengan cara melengkapi transformator dengan sirip-sirip (Radiator). Bila diinginkan penyaluran panas yang lebih cepat lagi, cara natural/alamiah tersebut dapat dilengkapi dengan peralatan untuk mempercepat sirkulasi media pendingin dengan pompa-pompa sirkulasi minyak, udara dan air. Cara ini disebut pendingin paksa (Forced). Berikut adalah beberapa media pendinginan transfromator :

1. ONAN (Oil Natural Air Natural)

   Sistem pendinginan ONAN (Oil Natural Air Natural) adalah metode pendinginan transfomator yang menggunakan minyak trafo sebagai media penghantar panas dari lilitan dan inti sistem radiator, sedangkan pendinginan eksternal dilakukan oleh udara sekitar yang mengalir secara alami melalui sirip radiator. Pergerakan minyak dan udara dalam sistem ONAN terjadi tanpa bantuan perangkat mekanis seperti pompa atau kipas, melainkan mengandalkan perbedaan densitas akibat perubahan temperatur

   Kode ONAN merupakan singkatan dari :

   O (Oil) : media pendingin internal berupa minyak transformator

   N (Natural Oil Circulation) : sirkulasi minyak berlangsung secara alami

   A (Air) : Udara sebagai media pendingin bagian luar trafo

   N (Natural Air Circulation) : Udara mengalir secara alami di sekitar radiator

1 ONAF (Oil Natural Air Foced)

ONAF merupakan sistem pendinginan transformator yang menggunakan minyak transformator sebagai media perpindahan panas internal, dengan sirkulasi minyak yang terjadi secara alami (natural convection). Pendinginan eksternal dilakukan menggunakan udara yang dipaksa mengalir melalui permukaan radiator dengan bantuan kipas (fan), sehingga pelepasan panas berlangsung lebih cepat dibandingkan sistem ONAN.

Kode ONAF merupakan singkatan dari :

O (Oil) : Pendingin internal menggunakan minyak transformator.

N (Natural Oil Circulation) : Minyak bersirkulasi secara alami tanpa pompa.

A (Air) : Pendingin eksternal menggunakan udara.

F (Forced Air Circulation) : Udara dialirkan secara paksa menggunakan kipas.

2 OFAF (Oil Forced Air Forced)

OFAF merupakan singkatan dari Oil Forced Air Forced, yaitu metode pendinginan transformator yang menggunakan minyak transformator sebagai media perpindahan panas internal dengan sirkulasi paksa menggunakan pompa minyak. Pendinginan eksternal dilakukan oleh udara yang dihembuskan secara paksa menggunakan kipas (fan) yang dipasang pada radiator.

Kode OFAF dapat diuraikan sebagai berikut:

O (Oil) : Media pendingin internal berupa minyak transformator.

F (Forced Oil Circulation) : Minyak disirkulasikan secara paksa dengan pompa minyak.

A (Air) : Media pendingin eksternal berupa udara.

F (Forced Air Circulation) : Udara dialirkan secara paksa menggunakan kipas.

3 OFWD (Oil Forced Water Directed)

Sistem pendinginan OFWD adalah metode pendinginan aktif yang menggabungkan sirkulasi minyak secara paksa dengan pendinginan menggunakan air yang dialirkan melalui water-cooled heat exchanger. Pada sistem ini, minyak panas yang berasal dari inti dan lilitan transformator disirkulasikan oleh pompa menuju oil-to-water heat exchanger. Di dalam penukar panas tersebut, air mengalir secara terarah (directed water flow) untuk menyerap panas dari minyak sebelum minyak kembali ke tangki utama transformator. Metode ini memberikan efisiensi pendinginan sangat

tinggi, melebihi sistem OFAF, sehingga difungsikan pada trafo kapasitas besar seperti pada pembangkit listrik, kilang industri, dan sistem interkoneksi tegangan ekstra tinggi.

Kode OFDW dapat diuraikan sebagai berikut :

O (Oil) : Minyak transformator sebagai media pendingin internal.

F (Forced Oil Circulation) : Minyak disirkulasikan secara paksa menggunakan oil pump.

W (Water) : Air sebagai media pendinginan eksternal.

D (Directed Water Flow) : Aliran air diarahkan (directed) melalui heat exchanger atau water cooler.

2.5 Data beban Transformator

Berikut adalah bebererapa data beban transformator, data berikut merupakan data yang tidak semuanya running dalam satu waktu, melainkan ada beberapa beban yang running bergantian.

Tabel 2.1 Data beban transformator

Load Summary Design Continous Running				
No	Beban	Kapasitas (kW)	Jumlah	Total Kapasitas (kW)
1	Outdoor Lighting	11.46	1	11.46
2	Plant Air Dryer	32.3	4	129.2
3	Compressor Control Panel	5.3	4	21.2
4	Sump Pump	1.3	1	1.3
5	Caustic Soda Pump	0.37	1	0.37
6	Diesel Controller 1	7.35	2	14.7
7	Motor Pump JCW	315	5	1575
8	Indoor Lighting	8.35	1	8.35
9	Motor Chute	0.55	1	0.55
10	Motor Conveyor	18.5	3	55.5
11	Sump Pump	11	1	11
12	Emergency Sump Pump	7.5	1	7.5
13	Reclaimer	51.7	1	51.7
14	Tripper Car Cable Reel	1.5	2	3
15	Tripper Car Travelling	2.2	2	4.4
16	Motor Brake	0.3	2	0.6
17	Diesel Controller 2	7.35	2	14.7
18	Motor Pump JCW	280	4	1120

Total	3030.53

Dari tabel 2.1 diatas untuk menghitung kapasitas (A) menggunakan rumus sebagai berikut :

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} * V * cos\pi}$$

Dimana : I = Arus (ampere)

P = Daya (watt atau kilowatt)

V = Tegangan (volt)

2.6 Standar IEEE C57.91-2011

IEEE C57.91-2011 adalah panduan komprehensif yang digunakan untuk menentukan cara melakukan *loading* atau pembebanan terhadap transformator tenaga yang berisi minyak mineral (mineral-oil-immersed transformer). Standar ini menjelaskan batasan operasi, pengaruh suhu terhadap penuaan isolasi, metode perhitungan kenaikan temperatur, evaluasi *hot-spot*, hingga cara menentukan umur pakai transformator berdasarkan profil beban harian atau beban dinamis. Pedoman ini menjadi rujukan utama dalam penentuan kemampuan transformator untuk menahan beban lebih (*overloading*) baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang.

2.6.1 Persamaan Penuaan

Bukti eksperimental menunjukkan bahwa hubungan antara kerusakan isolasi dengan waktu dan suhu mengikuti adaptasi dari teori laju reaksi Arrhenius yang memiliki bentuk sebagai berikut:

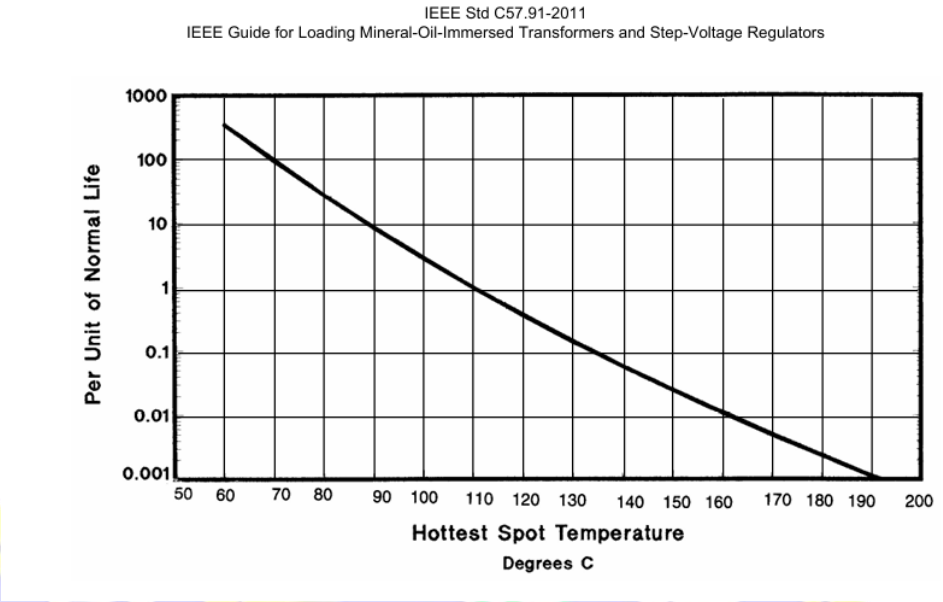
Per Unit Life = $A_e{}^{[\frac{B}{\Theta H+273}]}$ ..... (2.5)

Dimana : ΘH : adalah suhu titik terpanas pada lilitan, °C

A : konstanta

B : konstanta

e : basis logaritma natural



Gambar 2.8 Grafik Transformator Insulation Life

Grafik diatas dari IEEE C57.91-2011 ini menunjukkan bagaimana temperature titik terpanas (hottest spot temperature) pada trafo berpengaruh langsung terhadap umur normal isolasi. Dimana sumbu X menampilkan rentang suhu dari 50°C hingga 200°C, sedangkan sumbu Y menunjukkan umur relatif isolasi dalam satuan per unit normal life. Kurva yang menurun tajam menegaskan bahwa kenaikan suhu dapat mempercepat proses penuaan isolasi secara cepat.

2.6.2 Percent loss of life

Persentase kehilangan masa pakai isolasi dalam periode waktu adalah jam masa pakai setara yang dikonsumsi dibagi dengan definisi total masa pakai isolasi normal (jam) dan dikalikan dengan 100. Biasanya total periode waktu yang digunakan adalah 24 jam. Persamaannya diberikan sebagai berikut:

$$\%\text{Loss of life} = \frac{F_{EQA}\ X\ t\ X\ 100}{Normal\ Insulation\ Life} \quad \text{.....(2.6)}$$

Dimana :

F_{EQA} : merupakan faktor penuaan setara untuk periode waktu total

Sesuai dengan 5.11.3 dari IEEE Std C57.12.00-2010, masa pakai isolasi normal minimum yang dibutuhkan adalah 180.000 jam.

2.6.3 Suhu lingkungan dan pengaruhnya terhadap pemuatan

Suhu lingkungan (ambient temperature) adalah temperatur udara di sekitar transformator saat beroperasi. Nilai ini sangat berpengaruh terhadap kinerja termal transformator, kemampuan pembebanan, dan umur isolasinya. Transformator dirancang dengan asumsi suhu lingkungan standar 30°C (rata-rata harian), ini adalah suhu lingkungan standar yang digunakan dalam panduan ini.

Suhu titik terpanas diasumsikan terdiri dari tiga komponen yang diberikan oleh persamaan berikut:

$$\Theta H = \Theta A + \Delta\Theta KE + \Delta\Theta H \quad (2.7)$$

Dimana :

ΘH : suhu titik terpanas pada lilitan, °C
ΘA : suhu lingkungan rata-rata selama siklus beban yang akan dipelajari °C
ΔΘKE : kenaikan oli bagian atas di atas suhu lingkungan, °C
ΔΘH : kenaikan titik terpanas yang berliku-liku di atas suhu minyak bagian atas, °C

Perhitungan suhu mengasumsikan suhu lingkungan konstan. Pengaruh suhu lingkungan yang berubah-ubah dapat dipertimbangkan secara konservatif sebagai berikut:

a) Untuk suhu lingkungan yang meningkat selama siklus beban, suhu lingkungan sesaat harus digunakan saat mempertimbangkan siklus beban.
b) Untuk menurunkan suhu lingkungan, suhu lingkungan maksimum selama siklus sebelumnya yang panjang sekitar 12 jam harus digunakan.

2.7 Regresi Eksponensial

Regresi eksponensial adalah metode analisis statistik yang digunakan untuk memodelkan hubungan antara variabel bebas (X) dan variabel terikat (Y) ketika pertumbuhan nilai Y mengikuti pola pertumbuhan atau penurunan secara eksponensial. Model ini dinyatakan dalam bentuk persamaan $Y = ae^{bX}$ dimana a merupakan konstanta awal, sedangkan b menunjukkan laju pertumbuhan atau penurunan. Berbedab dengan regresi linear yang mrnghasilkan hubungan garis lurus, regresi eksponensial menghasilkan kurva yang menunjukkan perubahan nilai secara tidak konstan.

Dalam analisis susut umur pakai transformator, regresi eksponensial dapat digunakan untuk mengidentifikasi hubungan antara temperatur operasi atau faktor beban terhadap susut umur transformator. Penggunaan metode ini didasarkan pada teori bahwa laju penuaan isolasi meningkat secara eksponensial terhadap kenaikan temperatur,

sebagaimana dijelaskan dalam standar IEEE C57.91-2011 melalui persamaan *agging accelefration factor* (FAA). Oleh karena itu, regresi eksponensial dapat dimanfaatkan untuk menganalisis trend dan memprediksi susut umur transformatir selama data penelitian menunjukkan pola hubungan eksponensial dan memiliki tingkat kecocokan yang memadai.

Menentukan langkah-langkah regresi eksponensial :

Menentukan model regresi

Persamaan awal : $Y = ae^{bX}$

e = 2,7183

X = Load rasio trafo $dan\ Y$=LOL

xi = Load rasio trafo $ke\ i\ dan\ Yi$ = LOL $ke\ i$

Berdasar TA total i = 12 $yaitu\ Jan$uari – $Desember$

Karena persamaan tersebut tidak linear, dilakukan transformasi logaritma natural (ln):

$$\ln Y = \ln(a.e^{bX})$$
$$\ln Y = \ln a + bX$$

Misalkan

P = A + Bq

P = $\ln Y$, A = $\ln a$, $q = X$, $B = b$

Maka rumus A dan B ;

$$b = \frac{n\sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \longrightarrow \text{B} = \frac{n\sum q_i p_i - \sum q_i \sum p_i}{n\sum q_i - (\sum q_i)^2}$$

$$a = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i - \frac{b}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i = \frac{\sum y_i(\sum x_i^2) - \sum x_i \sum x_i y_i}{n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$\longrightarrow \quad A = \frac{\sum p_i(\sum q_i^2) - \sum q_i \sum q_i p_i}{n\sum q_i^2 - (\sum q_i)^2}$$

Nilai a dan b ;

$a = e^A$ dan b = B

Koifisien relasi ;

$$r = \sqrt{\frac{Dt^2 - D^2}{Dt^2}}$$

$$Dt^2 = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2$$

$$D^2 = \sum_{i=1}^{n} (y_i - ae^{bx})^2$$

Tafsiran koefisien relasi :
0,2 – 0,4 lemah , 0,4 – 0,7 cukup , 0,7 – 1 sangat kuat.