

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Gardu Induk 150 kV

Gardu induk adalah instalasi listrik yang berfungsi menyalurkan, mengubah, dan mengatur energi listrik dari jaringan transmisi ke jaringan distribusi. Di Indonesia, tegangan operasi umum gardu induk adalah 150 kV, yang berperan sebagai penghubung antara sistem transmisi dan distribusi menengah (20 kV).

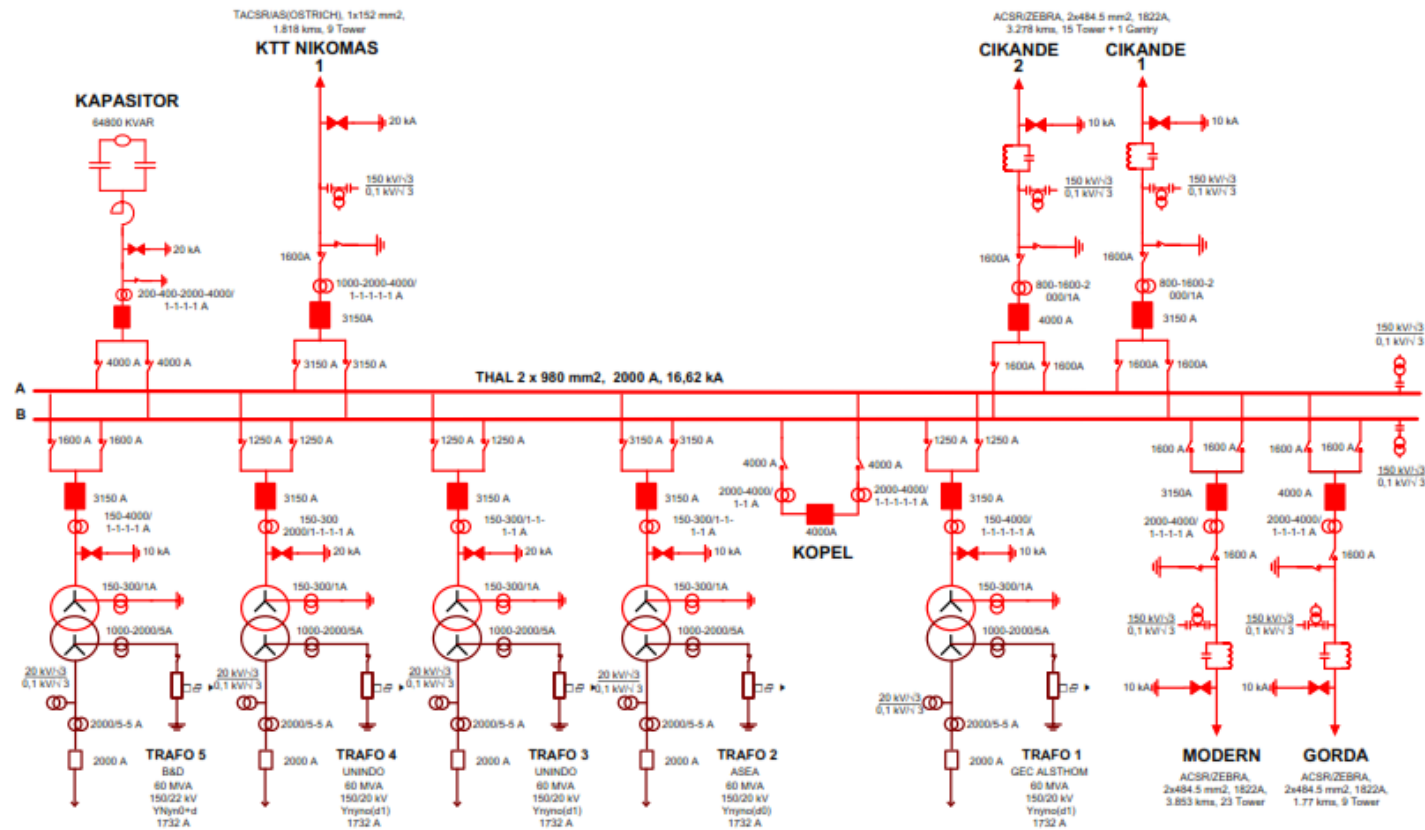
Secara umum, fungsi utama gardu induk 150 kV meliputi:

1. Transformasi tegangan dari 150 kV menjadi 20 kV.
2. Penghubung sistem transmisi, agar suplai listrik tetap stabil dan andal.
3. Perlindungan dan pengukuran, melalui peralatan seperti CT, PT, relay, dan sistem proteksi otomatis.
4. Pengendalian sistem, yang kini banyak menggunakan teknologi SCADA untuk pemantauan jarak jauh.

Komponen utama gardu induk antara lain transformator tenaga, circuit breaker, isolator, arrester, busbar, sistem pentanahan, dan panel proteksi. Semua komponen tersebut bekerja bersama untuk menjaga keandalan dan keamanan operasi sistem tenaga listrik.

Di Indonesia, pengelolaan gardu induk 150 kV berada di bawah PT PLN (Persero) dan mengikuti standar nasional seperti PUIL 2011, SPLN, serta standar internasional IEC.

Salah satu contohnya adalah Gardu Induk 150 kV Pucam yang berada di Kawasan Industri Modern Cikande, Serang – Banten. Gardu ini berfungsi sebagai pusat penyalur daya listrik ke ratusan perusahaan industri di kawasan tersebut. Dengan kapasitas listrik kawasan mencapai lebih dari 500 MVA, keandalan operasional gardu induk menjadi faktor penting dalam menjamin kestabilan pasokan energi dan mencegah gangguan besar pada sistem industri.



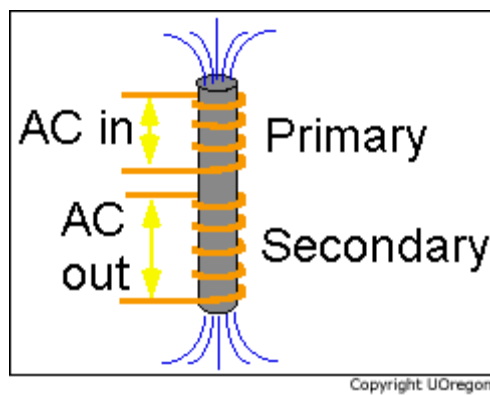
Alamat : Komplek Modern Industri Cikande
Kavling 1A, Kec. Kibin, Kab. Serang
Banten 42185
Koordinat : Lintang -6.1793531°
Bujur 106.330739°
No Telp : 08561566415

DIGAMBAR	DIPERIKSA	DITUTUP	TANGGAL
LOLA DATA	ARIF ZAENAL	JOKO MUSLIM	Maret 2024

Gambar 2.1 Single Line Diagram GI Pucam

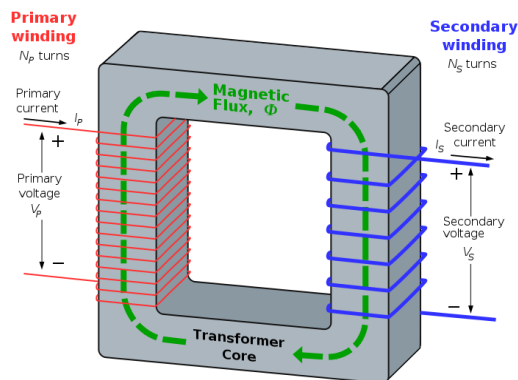
2.1.2 Transformator

Transformator merupakan peralatan listrik yang berfungsi untuk menyalurkan daya/tenaga dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya. Transformator menggunakan prinsip hukum induksi faraday dan hukum lorentz dalam menyalurkan daya, dimana arus bolak balik yang mengalir mengelilingi suatu inti besi maka inti besi itu akan berubah menjadi magnet. Dan apabila magnet tersebut dikelilingi oleh suatu belitan maka pada kedua ujung belitan tersebut akan terjadi beda potensial [6].



Gambar 2.2 Arus bolak balik mengelilingi inti besi

Arus yang mengalir pada belitan primer akan menginduksi inti besi transformator sehingga didalam inti besi akan mengalir flux magnet dan flux magnet ini akan menginduksi belitan sekunder sehingga pada ujung belitan sekunder akan terdapat beda potensial [7].



Gambar 2.3 Fluks pada Transformator[6].

2.1.3 Jenis Transformator

Berdasarkan fungsinya transformator tenaga dapat dibedakan menjadi:

1. Trafo pembangkit
2. Trafo gardu induk / penyaluran
3. Trafo distribusi

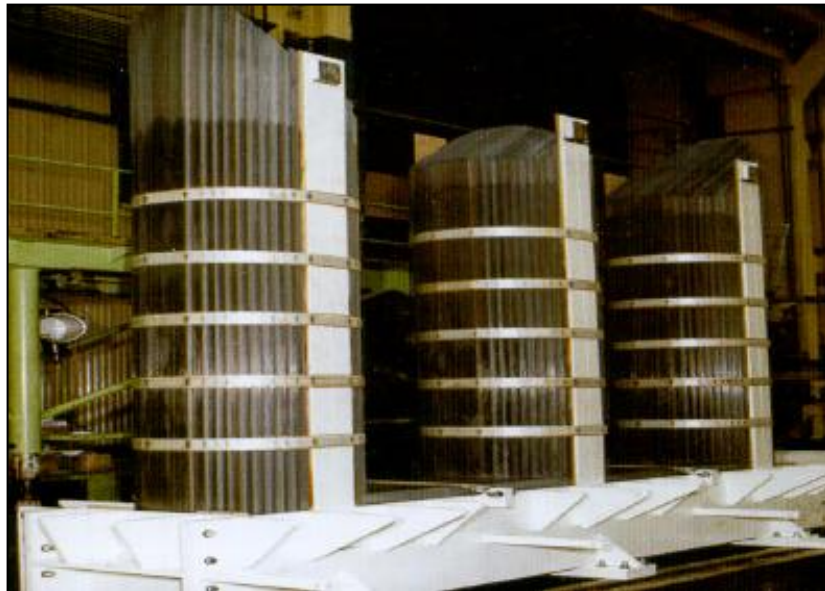
Transformator tenaga untuk fungsi penyaluran dapat dibedakan menjadi:

1. Trafo besar
2. Trafo sedang
3. Trafo kecil

2.1.4 Bagian Transformator

1. Electromagnetic Circuit Inti Besi

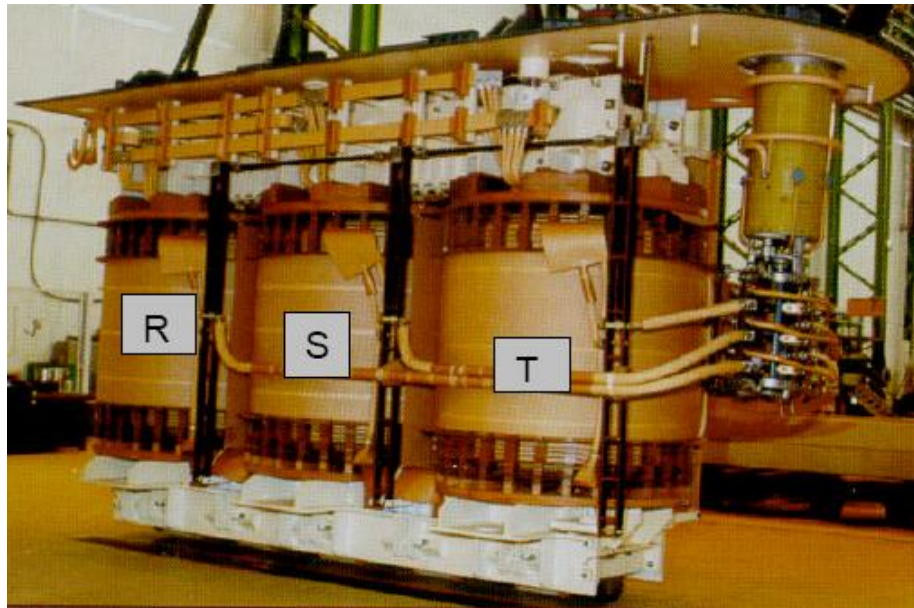
Inti besi digunakan sebagai media jalannya flux yang timbul akibat induksi arus bolak balik pada kumparan yang mengelilingi inti besi sehingga dapat menginduksi kembali ke kumparan yang lain. Dibentuk dari lempengan – lempengan besi tipis berisolasi yang di susun sedemikian rupa.[8].



Gambar 2.3 Inti Besi Transformator[6].

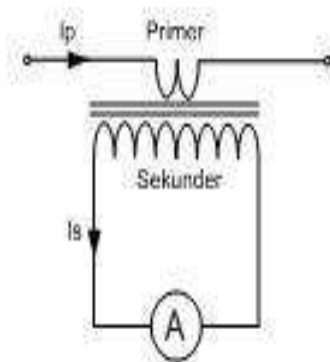
2. Current carrying circuit (Winding)

Belitan terdiri dari batang tembaga berisolasi yang mengelilingi inti besi, dimana saat arus bolak balik mengalir pada belitan tembaga tersebut, inti besi akan terinduksi dan menimbulkan flux magnetik.

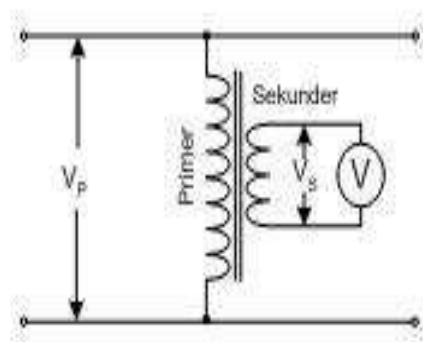


Gambar 2.4 Belitan trafo

Kumparan Transformator Arus



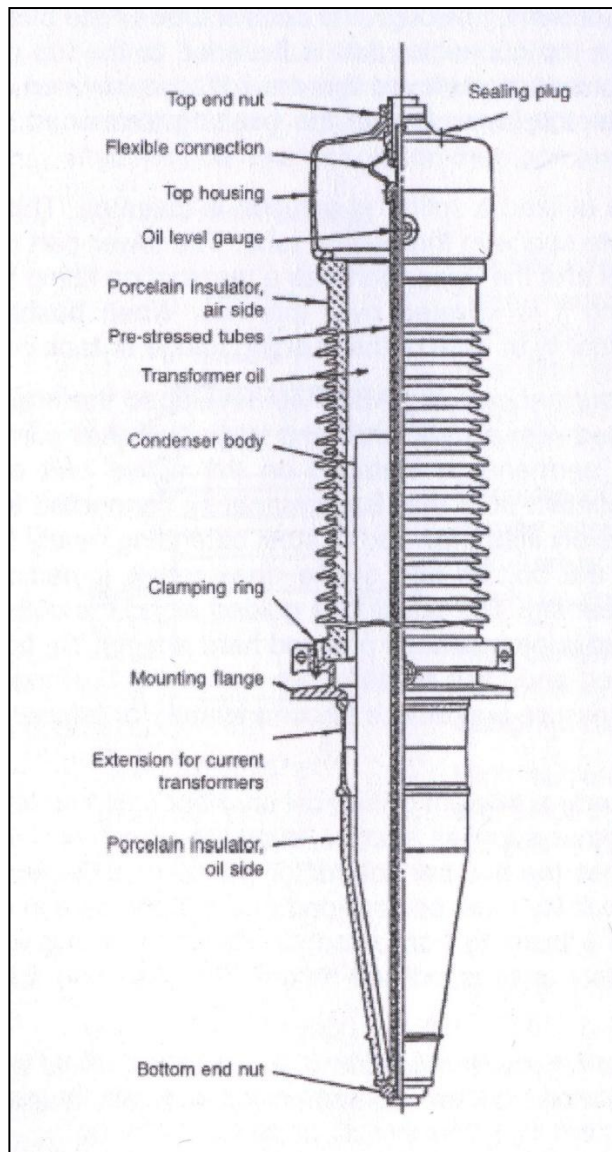
Kumparan Transformator Tegangan



Gambar. 2.5 Kumparan Transformator Arus & Transformator Tegangan[6].

3. Bushing

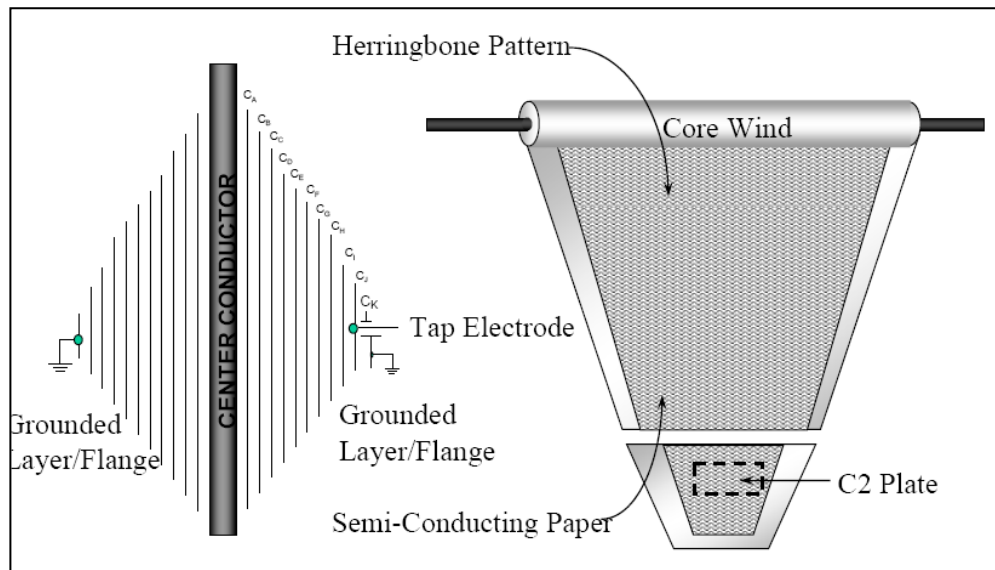
Bushing merupakan sarana penghubung antara belitan dengan jaringan luar. Bushing terdiri dari sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator. Isolator tersebut berfungsi sebagai penyekat antara konduktor bushing dengan body main tank transformator.



Gambar 2.6 Bagian – bagian dari bushing

Secara garis besar bushing dapat dibagi menjadi empat bagian utama yaitu isolasi,

konduktor, klem koneksi, dan asesoris. Isolasi pada bushing terdiri dari dua jenis yaitu oil impregnated paper dan resin impregnated paper. Pada tipe oil impregnated paper isolasi yang digunakan adalah kertas isolasi dan minyak isolasi sedangkan pada tipe resin impregnated paper isolasi yang digunakan adalah kertas isolasi dan resin.



Gambar 2.7 kertas isolasi pada bushing (*oil impregnated paper bushing*)

Terdapat jenis-jenis konduktor pada bushing yaitu hollow conductor dimana terdapat besi pengikat atau penegang ditengah lubang konduktor utama, konduktor pejal dan flexible lead.

Klem koneksi merupakan sarana pengikat antara stud bushing dengan konduktor penghantar diluar bushing.

Asesoris bushing terdiri dari indikasi minyak, seal atau gasket dan tap pengujian. Seal atau gasket pada bushing terletak dibagian bawah mounting flange.

4. Pendingin

Suhu pada transformator yang sedang beroperasi akan dipengaruhi oleh kualitas tegangan jaringan, losses pada trafo itu sendiri dan suhu lingkungan. Suhu operasi yang tinggi akan mengakibatkan rusaknya isolasi kertas pada transformator. Oleh karena itu pendinginan yang efektif sangat diperlukan.

Minyak isolasi transformator selain merupakan media isolasi juga berfungsi sebagai pendingin. Pada saat minyak bersirkulasi, panas yang berasal dari belitan akan dibawa oleh minyak sesuai jalur sirkulasinya dan akan didinginkan pada sirip – sirip radiator. Adapun proses pendinginan ini dapat dibantu oleh adanya kipas dan pompa sirkulasi guna meningkatkan efisiensi pendinginan.

Tabel 2. 1 Macam macam pendingin pada transformator

No.	Macam Sistem Pendingin *)	Media			
		Dalam Transformator		Diluar Transformator	
		Sirkulasi alamiah	Sirkulasi Paksa	Sirkulasi Alamiah	Sirkulasi Paksa
1.	AN	-	-	Udara	-
2.	AF	-	-	-	Udara
3.	ONAN	Minyak	-	Udara	-
4.	ONAF	Minyak	-	-	Udara
5.	OFAN	-	Minyak	Udara	-
6.	OFAF	-	Minyak	-	Udara
7.	OFWF	-	Minyak	-	Air
8.	ONAN/ONAF	Kombinasi 3 dan 4			
9.	ONAN/OFAN	Kombinasi 3 dan 5			
10.	ONAN/OFAF	Kombinasi 3 dan 6			
11.	ONAN/OFWF	Kombinasi 3 dan 7			

5. Oil preservation & expansion (Konservator)

Saat terjadi kenaikan suhu operasi pada transformator, minyak isolasi akan memuai sehingga volumenya bertambah. Sebaliknya saat terjadi penurunan suhu operasi, maka minyak akan menyusut dan volume minyak akan turun. Konservator digunakan untuk menampung minyak

pada saat transformator mengalami kenaikan suhu.

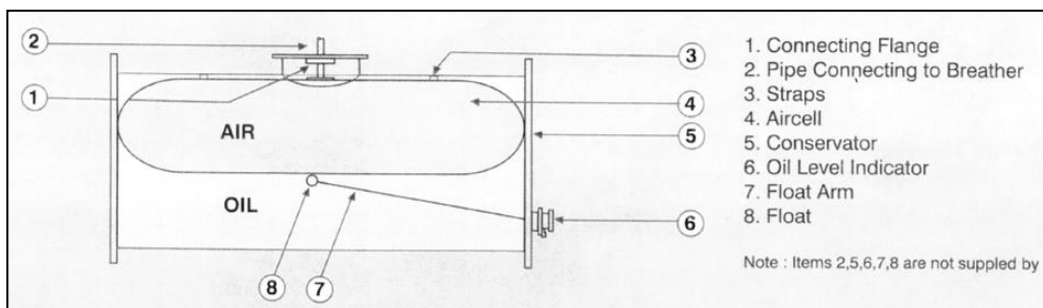


Gambar 2.8 Konservator



Gambar 2.9 Silica gel

Untuk menghindari agar minyak trafo tidak berhubungan langsung dengan udara luar, maka saat ini konservator dirancang dengan menggunakan brether bag/rubber bag, yaitu sejenis balon karet yang dipasang didalam tangki konservator.



Gambar 3 Konstruksi konservator dengan rubber bag

6. Dielectric (Minyak isolasi transformator & Isolasi kertas)

Minyak Isolasi trafo

Minyak isolasi pada transformator berfungsi sebagai media isolasi, pendingin dan pelindung belitan dari oksidasi. Minyak isolasi trafo merupakan minyak mineral yang secara umum terbagi menjadi tiga jenis, yaitu parafinik, napthanik dan aromatic.



Gambar 6.1 Minyak Isolasi Transformator

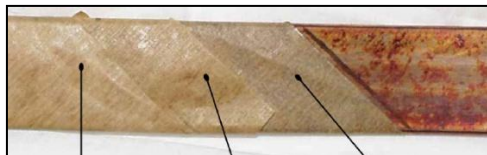
Didalam standar IEC 60422 telah dicantumkan parameter-parameter minyak isolasi dengan batasan-batasan minimum untuk minyak isolasi yang baru dimasukan kedalam peralatan sebelum energize.

Tabel 2. 2 Batasan nilai parameter minyak isolasi yang baru dimasukan kedalam peralatan sebelum dilakukan proses energize

Property	Highest voltage for equipment kV		
	<72,5	72,5 to 170	>170
Appearance	Clear, free from sediment and suspended matter		
Colour (on scale given in ISO 2049)	Max. 2,0	Max. 2,0	Max. 2,0
Breakdown voltage (kV)	>55	>60	>60
Water content (mg/kg)*	20 ^b	<10	<10
Acidity (mg KOH/g)	Max. 0,03	Max. 0,03	Max. 0,03
Dielectric dissipation factor at 90°C and 40 Hz to 60 Hz ^c	Max. 0,015	Max. 0,015	Max. 0,010
Resistivity at 90 °C (GΩm)	Min. 60	Min. 60	Min. 60
Oxidation stability	As specified in IEC 60296		
Interfacial tension (mN/m)	Min. 35	Min. 35	Min. 35
Total PCB content (mg/kg)	Not detectable (< 2 total)		
Particles	-	-	See Table B.1 ^d

Kertas isolasi trafo

Isolasi kertas berfungsi sebagai isolasi, pemberi jarak, dan memiliki kemampuan mekanis.



Gambar 6.2 Tembaga yang dilapisi kertas isolasi

7. Tap Changer

Kestabilan tegangan dalam suatu jaringan merupakan salah satu hal yang dinilai sebagai kualitas tegangan. Transformator dituntut memiliki nilai tegangan output yang stabil sedangkan besarnya tegangan input tidak selalu sama. Dengan mengubah banyaknya belitan pada sisi primer diharapkan dapat merubah ratio antara belitan primer dan sekunder dan dengan demikian tegangan output/sekunder pun dapat disesuaikan dengan kebutuhan sistem berapapun tegangan input/primernya. Penyesuaian ratio belitan ini disebut Tap changer.

Proses perubahan ratio belitan ini dapat dilakukan pada saat trafo sedang berbeban (On load tap changer) atau saat trafo tidak berbeban (Off load tap changer).

Tap changer berfungsi mengatur rasio belitan dan dapat dioperasikan saat trafo berbeban (On Load Tap Changer/OLTC) maupun tidak berbeban (Off Load Tap Changer). Komponen utama tap changer terdiri dari selector switch, diverter switch, dan tahanan transisi, yang ditempatkan terpisah dari belitan utama karena aktivitasnya lebih dinamis.

Tap changer terdiri dari :

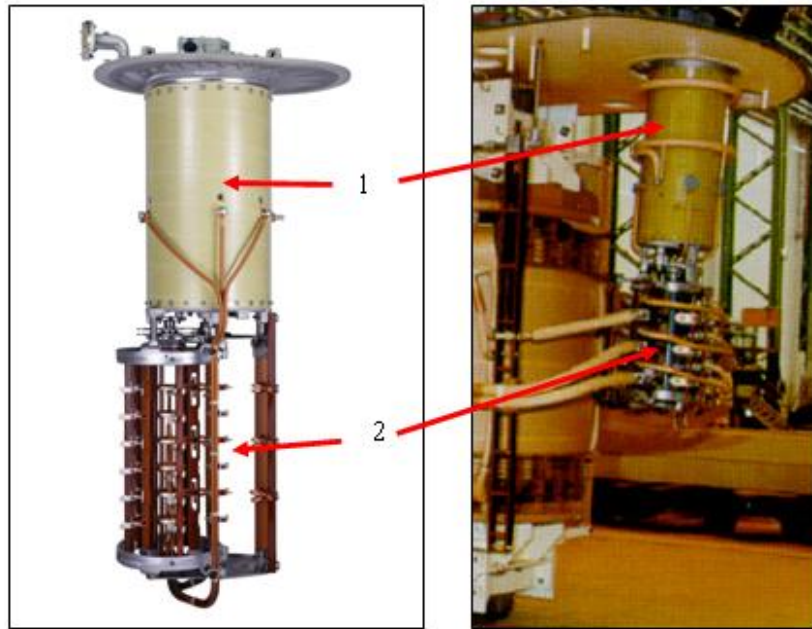
- a. Selector Switch
- b. Diverter Switch
- c. Tahanan transisi

Dikarenakan aktifitas tap changer lebih dinamis dibanding dengan belitan utama dan inti besi, maka kompartemen antara belitan utama dengan tap changer dipisah.

Selector switch merupakan rangkaian mekanis yang terdiri dari terminal terminal untuk menentukan posisi tap atau ratio belitan primer.

Diverter switch merupakan rangkaian mekanis yang dirancang untuk melakukan kontak atau melepaskan kontak dengan kecepatan yang tinggi.

Tahanan transisi merupakan tahanan sementara yang akan dilewati arus primer pada saat perubahan tap.



Gambar 7.1 OLTC pada transformator

Media pendingin atau pemadam proses switching pada diverter switch yang dikenal sampai saat ini terdiri dari dua jenis, yaitu media minyak dan media vaccum. Jenis pemadaman dengan media minyak akan menghasilkan energi arcing yang membuat minyak terurai menjadi gas C_2H_2 dan karbon sehingga perlu dilakukan penggantian minyak pada periode tertentu. Sedangkan dengan metoda pemadam vaccum proses pemadaman arcing pada waktu switching akan dilokalisir dan tidak merusak minyak.

Selector switch menentukan posisi tap, diverter switch berfungsi menghubungkan dan memutus arus dengan cepat, sedangkan tahanan transisi menahan arus sesaat selama perpindahan tap. Proses switching pada diverter switch menggunakan media minyak atau vakum. Sistem minyak menghasilkan gas akibat arcing sehingga memerlukan penggantian minyak berkala, sedangkan sistem vakum lebih bersih karena proses pemadaman busur api berlangsung tertutup dan tidak merusak minyak.

8. NGR (Neutral Grounding Resistant)

Salah satu metoda pentanahan adalah dengan menggunakan NGR. NGR adalah sebuah tahanan yang dipasang serial dengan neutral sekunder pada transformator sebelum terhubung ke ground/tanah. Tujuan dipasangnya NGR adalah untuk mengontrol besarnya arus gangguan yang mengalir dari sisi neutral ke tanah.

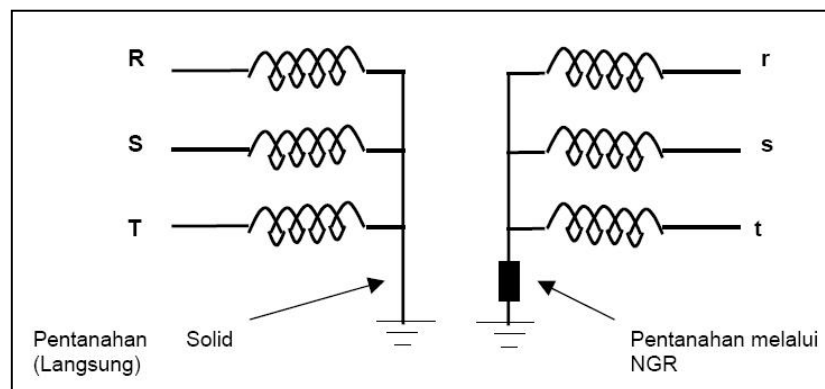
Ada dua jenis NGR, Liquid dan Solid

1. Liquid

berarti resistornya menggunakan larutan air murni yang ditampung didalam bejana dan ditambahkan garam (NaCl) untuk mendapatkan nilai resistansi yang diinginkan

2. Solid

Sedangkan NGR jenis padat terbuat dari Stainless Steel, FeCrAl, Cast Iron, Copper Nickel atau Nichrome yang diatur sesuai nilai tahanannya



Gambar 8.1 Neutral grounding resistance (NGR)

2.2. Penelitian yang Relevan

Pada penelitian ini penulis melakukan tinjauan literatur pada beberapa penelitian yang relevan untuk dijadikan referensi. Referensi dapat berasal dari jurna, artikel, skripsi, atau buku yang relevan. Beberapa referensi yang penulis dapatkan sebagai berikut :

1. Penelitian oleh **Muhamad Firdaus Robbani dkk. (2022)** berfokus pada penentuan kelayakan tahanan isolasi transformator 60 MVA di Gardu Induk 150 kV Tegal dengan menggunakan metode Indeks Polarisasi, Tan Delta, dan Breakdown Voltage. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai Tan Delta masih dalam batas aman, meskipun mulai terlihat tanda degradasi akibat penuaan. Namun, penelitian ini belum mengaitkan degradasi minyak isolasi dengan peningkatan nilai Tan Delta sebagai dasar pertimbangan penggantian trafo. [3].
2. Menurut Mahardika dkk. (2015) melakukan penelitian mengenai Filtrasi minyak isolasi transformator dengan menggunakan bentonit aktif untuk memperbaiki nilai Tan Delta, resistivitas, dan warna minyak setelah mengalami pembebanan. Hasilnya menunjukkan bahwa proses Filtrasi mampu menurunkan nilai Tan Delta dan meningkatkan kualitas minyak, tetapi penelitian ini lebih berfokus pada proses perbaikan minyak tanpa membahas keterkaitannya dengan kondisi keseluruhan transformator [12].
3. Menurut **Bagus Wisnu Prasetyo (2018)** meneliti pengujian Tan Delta pada transformator generator Unit #1 di PT Indonesia Power UJP Banten 3 Lontar. Penelitian tersebut menemukan bahwa nilai Tan Delta meningkat seiring dengan kenaikan suhu dan usia operasi, namun belum menyinggung kondisi minyak isolasi maupun tindak lanjut teknis dari hasil pengujian tersebut [13].
4. Menurut **Muhammad Erwin Gunawan dkk. (2021)** mengevaluasi kelayakan isolasi transformator 30 MVA menggunakan metode Indeks Polarisasi dan Tan Delta. Hasilnya menunjukkan adanya korelasi kuat antara peningkatan nilai Tan Delta dan penurunan Indeks Polarisasi sebagai indikasi degradasi isolasi. Meski demikian, penelitian ini tidak membahas kondisi minyak isolasi secara mendalam.[14].

5. Menurut **Lalak Tarbiyatun Nasyin Maleiva dkk. (2020)** menitikberatkan pada pemantauan kualitas minyak transformator dengan parameter tegangan tembus (Breakdown Voltage). Hasilnya menunjukkan bahwa minyak lama mengalami penurunan kemampuan dielektrik akibat kontaminasi dan penuaan, namun penelitian ini tidak mengukur parameter Tan Delta yang dapat memberikan gambaran menyeluruh kondisi isolasi [15].

Tabel 2. 3 Penelitian yang Relevan

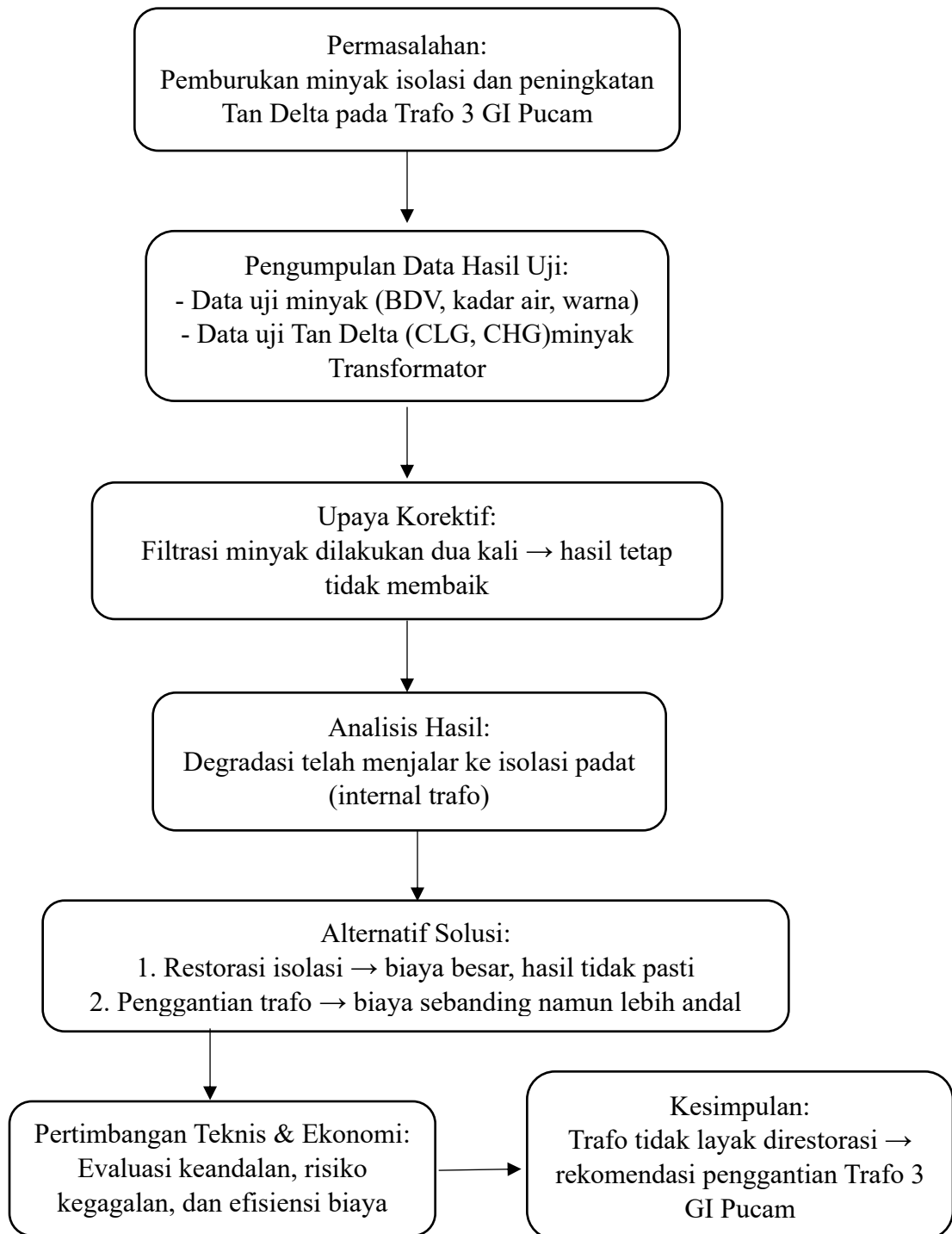
No	Judul dan Tahun	Masalah	Metodologi	Hasil	Riset Gap
1.	<i>“Penentuan Kelayakan Tahanan Isolasi Pada Transformator 60 MVA di Gardu Induk 150 kV Tegal Dengan Menggunakan Indeks Polarisasi, Tangen Delta, Dan Breakdown</i>	Menggunakan Polarization Index, Tan Delta, dan Breakdown Voltage untuk menilai kualitas isolasi trafo 60 MVA di gardu induk 150 kV Tegal.	Pengujian langsung di gardu induk, analisis data hasil uji PI, Tan Delta, dan BDV.	Hasilnya, nilai-Tan Delta trafo masih dalam kondisi baik kecuali ada sedikit penurunan di beberapa mode operasi. Penelitian ini sangat relevan karena menggunakan parameter yang sama (Tan Delta, breakdown, dan	Belum mengaitkan hasil degradasi isolasi dengan rekomendasi penggantian trafo seperti kasus GI Pucam.

	<i>Voltage —</i> Muhamad Firdaus Robbani et al.” (2022)			isolasi) dan pada gardu induk 150 kV, mirip dengan kasus GI Pucam	
2.	<i>“Filtrasi Faktor Rugi Dielektrik (Tan δ) dan Resistivitas serta Warna dari Minyak Isolasi Transformat or setelah Mengalami Pembebana n, Dengan Bentonit Aktif — Mahardika et al.” (2015)</i>	Pemburukan kualitas minyak akibat pembebanan dan kontaminasi yang menurunkan nilai dielektrik..	Eksperimen laboratorium dengan proses Filtrasi menggunakan bentonit aktif; pengujian Tan Delta, resistivitas, dan warna minyak sebelum dan sesudah Filtrasi.	Filtrasi berhasil menurunkan nilai Tan Delta dan meningkatkan resistivitas minyak isolasi.	Fokus hanya pada perbaikan minyak isolasi , belum mengkaji hubungan degradasi minyak terhadap performa trafo secara keseluruhan.
3.	<i>“Pengujian Tan Delta Generator Transformat</i>	Kenaikan nilai Tan Delta akibat pengaruh kelembapan dan	Pengujian lapangan nilai Tan Delta pada berbagai suhu	Pengujian lapangan nilai Tan Delta pada berbagai suhu	Tidak membahas kondisi minyak isolasi

	<i>or Unit #1 PT. Indonesia Power UJP Banten 3 Lontar — Bagus Wisnu Prasetyo” (2018)</i>	kontaminasi pada sistem isolasi trafo generator.	dan kondisi beban; analisis hubungan dengan kondisi isolasi.	dan kondisi beban; analisis hubungan dengan kondisi isolasi.	dan tindakan korektif atau penggantian trafo berdasarkan hasil Tan Delta.
4.	<i>“Evaluasi Kelayakan Tahanan Isolasi Transformat or 30 MVA Menggunak an Metode Indeks Polarisasi dan Tangen Delta — Muhammad Erwin Gunawan dkk.” (2021)</i>	Penurunan nilai isolasi pada trafo 30 MVA yang telah lama beroperasi.	Pengujian langsung pada trafo dengan metode PI dan Tan Delta; analisis hubungan antarparameter	Terjadi korelasi kuat antara kenaikan Tan Delta dan penurunan Indeks Polarisasi sebagai tanda degradasi isolasi.	Tidak membahas kualitas minyak isolasi , serta belum memberikan kriteria teknis kelayakan penggantian trafo.

5.	<i>“Transformer Oil Quality Monitoring Towards Degradation of Insulation Breakdown Voltage — Lalak Tarbiyatun Nasyin Maleiva dkk.”</i> (2020)	Penurunan kemampuan minyak isolasi terhadap tegangan tembus akibat penuaan dan kontaminasi.	Pengujian minyak baru dan bekas; pengukuran Breakdown Voltage untuk menentukan tingkat degradasi.	Minyak lama menunjukkan penurunan signifikan pada Breakdown Voltage dibanding minyak baru.	Tidak mengukur Tan Delta, sehingga belum menggambarkan kondisi total sistem isolasi trafo dan hubungannya dengan keputusan penggantian.
----	---	--	--	---	---

2.3 Kerangka Pemikiran



Gambar 2.4. Kerangka Pemikiran

Berdasarkan hasil pengujian lanjutan yang menunjukkan bahwa nilai Tan Delta tetap di atas 1% dan kualitas minyak isolasi masih buruk meskipun telah dilakukan filtrasi minyak sebanyak dua kali, maka dapat disimpulkan bahwa degradasi isolasi pada Trafo 3 GI Pucam telah bersifat permanen. Hal ini menunjukkan bahwa kerusakan tidak hanya terjadi pada minyak isolasi, tetapi telah menjalar ke isolasi padat (kertas dan bushing) di dalam transformator.

Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa proses penuaan dan kontaminasi internal telah mencapai tahap lanjut sehingga tindakan pemulihan melalui filtrasi tidak lagi efektif. Sementara itu, opsi restorasi isolasi internal (rewinding atau penggantian isolasi kertas) memerlukan biaya yang sangat besar dan kompleksitas tinggi, bahkan mendekati biaya penggantian trafo baru.

Dengan mempertimbangkan aspek teknis, keandalan sistem, risiko kegagalan, serta efisiensi biaya, maka tindakan paling rasional dan berkelanjutan adalah melakukan penggantian transformator (Trafo 3 GI Pucam) dengan unit baru yang memiliki performa dan isolasi optimal. Langkah ini akan lebih menjamin keandalan pasokan listrik di Kawasan Industri Modern Cikande, sekaligus mengurangi potensi gangguan sistem dan biaya perawatan berulang di masa mendatang..