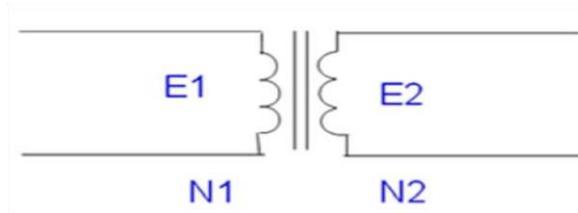


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Trafo Tegangan

Trafo tegangan adalah peralatan yang mentransformasi tegangan sistem yang lebih tinggi ke suatu tegangan sistem yang lebih rendah untuk kebutuhan peralatan indikator, alat ukur/meter dan relai. Transformator Tegangan dihubungkan langsung dengan rangkaian utama tanpa pemisah.¹



Gambar 2.1 Prinsip Kerja Trafo Tegangan Bagan 1

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \dots\dots\dots (2.1)^2$$

Dimana:

a = perbandingan /rasio transformasi

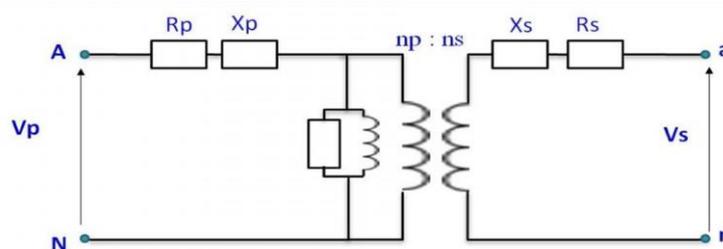
$N_1 > N_2$

N_1 = Jumlah belitan primer

N_2 = Jumlah belitan sekunder

E_1 = Tegangan primer

E_2 = Tegangan sekunder



Gambar 2.2 Rangkaian Ekuivalen Trafo Tegangan

¹ A. Arismunandar dan DR. S. Kuwahara. 1997. *Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik Jilid 3: Gardu Induk*. Jakarta : Pradnya Paramita.

² PT. PLN (Persero). 2014. *Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tegangan*. Jakarta : PT. PLN (Persero).

Dimana:

I_m = arus eksitasi/magnetisasi

I_e = arus karena rugi besi

Trafo tegangan memiliki prinsip kerja yang sama dengan trafo tenaga tetapi rancangan Trafo tegangan berbeda yaitu:

- a) Kapasitasnya kecil (10 – 150 VA), karena digunakan hanya pada alat-alat ukur, relai dan peralatan indikasi yang konsumsi dayanya kecil.
- b) Memiliki tingkat ketelitian yang tinggi.
- c) Salah satu ujung terminal tegangan tingginya selalu ditanahkan.

2.2 Fungsi Trafo Tegangan

Fungsi dari trafo tegangan yaitu:

- a) Mentransformasikan besaran tegangan sistem dari yang tinggi ke besaran tegangan listrik yang lebih rendah sehingga dapat digunakan untuk peralatan proteksi dan pengukuran yang lebih aman, akurat dan teliti.
- b) Mengisolasi bagian primer yang tegangannya sangat tinggi dengan bagian sekunder yang tegangannya rendah untuk digunakan sebagai sistem proteksi dan pengukuran peralatan dibagian primer.
- c) Sebagai standarisasi besaran tegangan sekunder (100, $100/\sqrt{3}$, $110/\sqrt{3}$ dan 110 volt) untuk keperluan peralatan sisi sekunder.
- d) Memiliki 2 kelas, yaitu kelas proteksi (3P, 6P) dan kelas pengukuran (0,1; 0,2; 0,5;1;3).

2.3 Jenis Trafo Tegangan

Trafo tegangan dibagi menjadi dua jenis yaitu:

- a) Trafo tegangan magnetik (Magnetik Voltage Transformer / VT)
Disebut juga Trafo tegangan induktif. Terdiri dari belitan primer dan sekunder pada inti besi yang prinsip kerjanya belitan primer menginduksikan tegangan kebelitan sekundernya.
- b) Trafo tegangan kapasitif (Capasitive Voltage Transformer / CVT)

Trafo tegangan ini terdiri dari dua bagian yaitu Capacitive Voltage Divider (CVD) dan inductive Intermediate Voltage Transformer (IVT). CVD merupakan rangkaian seri 2 (dua) kapasitor atau lebih yang berfungsi sebagai pembagi tegangan dari tegangan tinggi ke tegangan rendah pada primer, selanjutnya tegangan pada satu kapasitor ditransformasikan oleh IVT menjadi tegangan sekunder.

2.4 Bagian Trafo Tegangan

2.4.1 Trafo Tegangan Magnetik

a) Kertas / Isolasi Minyak

Berfungsi mengisolasi bagian yang bertegangan (belitan primer) dengan bagian bertegangan lainnya (belitan sekunder) dan juga dengan bagian badan (body).

Terdiri dari minyak trafo dan kertas isolasi

b) Rangkaian Electromagnetic

Berfungsi mentransformasikan besaran tegangan yang terdeteksi disisi primer ke besaran pengukuran yang lebih kecil.

c) Expansion Chamber

Merupakan peralatan yang digunakan untuk mengkompensasi level ketinggian minyak akibat perubahan volume sebagai pengaruh temperatur. Jenis yang umum digunakan adalah *metallic bellow*.

d) Terminal Primer

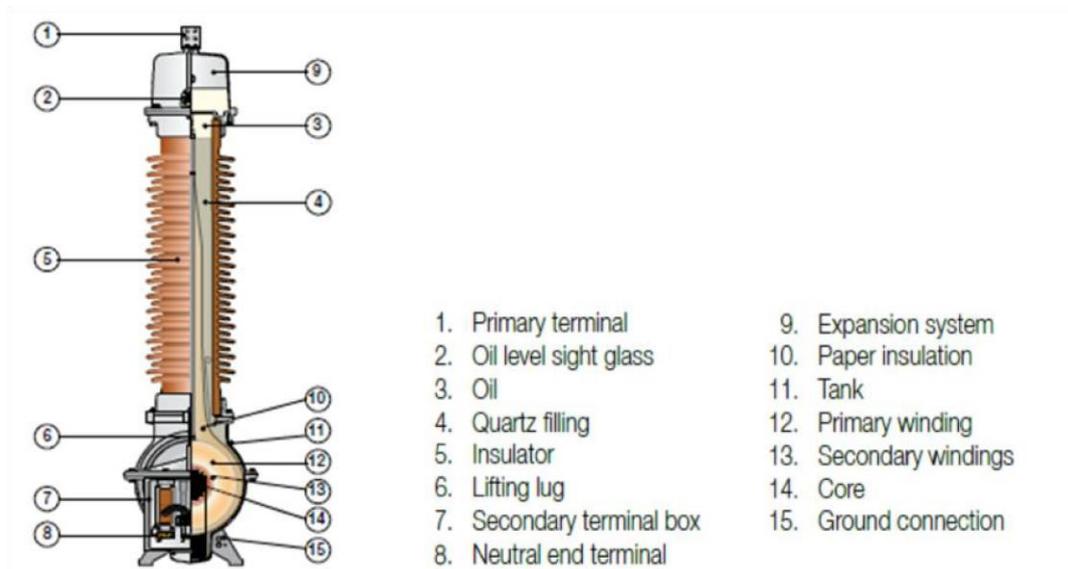
Adalah terminal yang terhubung pada sisi tegangan tinggi (fasa) dan satu lagi terhubung pada sistim pentanahan (*grounding*)

e) Struktur Mekanikal

Struktur mekanikal adalah peralatan yang menyokong berdirinya trafo tegangan.

Terdiri dari:

1. Pondasi
2. Struktur penopang VT
3. Isolator (keramik/polyester)



Gambar 2.3 Bagian-Bagian VT

2.4.2 Trafo Tegangan Jenis Kapasitif

Secara umum bagian trafo tegangan jenis kapasitif dapat jelaskan sebagai berikut:

1. Dielectric

Komponen ini terdiri atas dua bagian yaitu:

a) Minyak Isolasi

Berfungsi untuk mengisolasi bagian-bagian yang bertegangan dan sebagai media *dielectric* untuk memperoleh nilai kapasitansi dari 2 (dua) kapasitor atau lebih sebagai pembagi tegangan yang terhubung seri.

b) Kertas-plastik film (*paper-polypropylene film*)

Berfungsi sebagai media *dielectric* untuk memperoleh nilai kapasitansi dari 2 (dua) kapasitor atau lebih sebagai pembagi tegangan yang terhubung seri bersama-sama minyak isolasi.

2. Pembagi Tegangan (*Capacitive Voltage Divider*)

C_1 , C_2 (*capacitor element*) adalah kapasitor pembagi tegangan (*Capacitive Voltage Divider*) yang berfungsi sebagai pembagi tegangan tinggi untuk diubah oleh trafo tegangan menjadi

tegangan pengukuran yang lebih rendah. Kapasitansi C_2 lebih besar dari C_1 dan terhubung seri.

Sebagai contoh untuk CVT 150/√3 kV / 100/√3 V, kapasitansi masukan (*input capacity*) 8.300 pF yang terdiri dari $C_1 = 8994$ pF, dan $C_2 = 149.132$ pF.

a) *Ferroresonance suppression/damping circuit*

Ferroresonance suppression/damping circuit adalah induktor penyesuai tegangan (*medium voltage choke*) yang berfungsi untuk mengatur/menyesuaikan supaya tidak terjadi pergeseran fasa antara tegangan masukan (v_i) dengan tegangan keluaran (v_o) pada frekuensi dasar. Pada merk tertentu komponen *ferroresonance* ditandai dengan simbol L0.

b) Trafo Tegangan (*Intermediate Voltage Transformer / IVT*)

Berfungsi untuk mentransformasikan besaran tegangan listrik dari tegangan menengah yang keluar dari kapasitor pembagi ke tegangan rendah yang akan digunakan pada rangkaian proteksi dan pengukuran.

c) *Expansion Chamber*

Merupakan peralatan yang digunakan untuk mengkompensasi level ketinggian minyak akibat perubahan volume sebagai pengaruh temperatur. Jenis yang umum digunakan adalah *metallic/rubber bellow* dan *gas cushion*.

d) Terminal Primer

HVT adalah terminal tegangan tinggi (*high voltage terminal*) yaitu bagian yang dihubungkan dengan tegangan transmisi baik untuk tegangan bus maupun tegangan penghantar terminal tegangan tinggi/primer.

e) Terminal Sekunder

Adalah terminal yang terhubung pada sisi tegangan rendah, untuk keperluan peralatan ukur dan relai. Pada merk

tertentu terminal ini ditandai dengan simbol 1a dan 2a. . Pada *box* terminal sekunder terdapat juga komponen lain yang terdiri dari:

- a) **PG** (*protective gap*) adalah gap pengaman,
- b) **H.F** (*high frequency*) adalah terminal frekuensi tinggi yang berkisar sampai puluhan kilohertz, sebagai pelengkap pada salah satu konduktor penghantar dalam memberikan sinyal komunikasi melalui PLC.
- c) **L3** adalah reaktor pentanahan yang berfungsi untuk meneruskan frekuensi 50 Hz,
- d) **SA** (*surge arrester*) atau arester surja adalah pelindung terhadap gelombang surja petir.
- e) **S** adalah sakelar pentanahan (*earthing switch*), yang biasanya dipergunakan pada kegiatan pemeliharaan

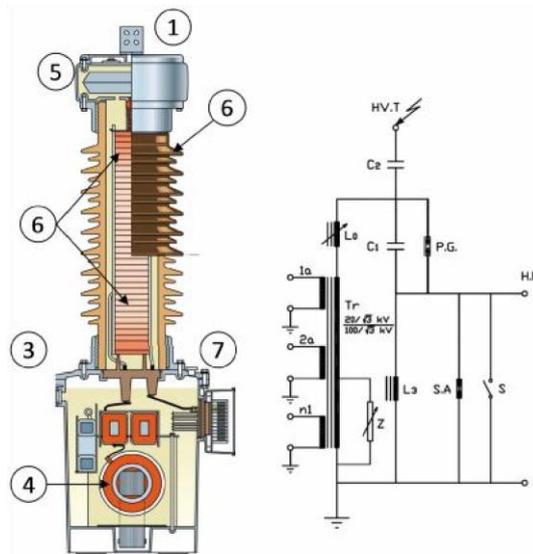
3. Struktur Mekanikal

Struktur mekanikal adalah peralatan yang menyokong berdirinya trafo tegangan yang terdiri dari:

- a) Pondasi
- b) Struktur penopang CVT
- c) Isolator penyangga (porselen/polyester). tempat kedudukan kapasitor dan berfungsi sebagai isolasi pada bagian-bagian tegangan tinggi.

4. Sistem Pentanahan

Sistem pentanahan adalah peralatan yang berfungsi mengalirkan arus lebih akibat tegangan surja atau sambaran petir ke tanah.

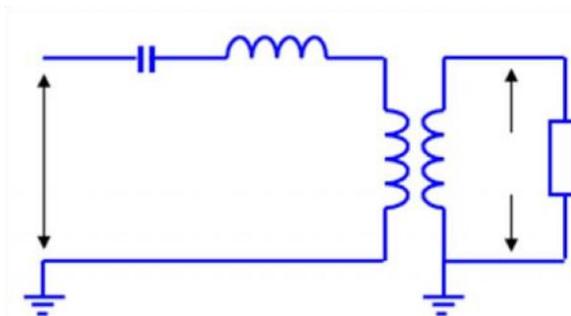


Gambar 2.4 Konstruksi Trafo Tegangan Kapasitif

2.4.3 Prinsip Kerja CCVT

Coupling Capacitive Voltage Transformer (CCVT) digunakan untuk instrumentasi, khususnya pada peralatan-peralatan meter dan proteksi. Pada umumnya kinerja CCVT sangat baik pada kondisi *steady state*.

Prinsip kerja CCVT adalah menurunkan besaran tegangan primer menjadi besaran tegangan sekunder melalui kapasitor (C_1 & C_2) yang berfungsi sebagai pembagi tegangan (*voltage divider*) dan trafo tegangan sebagai penurun tegangan. Keluaran tegangan sekunder dirancang seakurat mungkin sama dengan perbandingan rasio tegangan masukan disisi primer dalam segala kondisi operasi.



Gambar 2.5 Rangkaian Ekuivalen CVT



dimana:

- V_i = tegangan tinggi ekivalen (*input*),
- V_p = tegangan tinggi sisi primer CVT,
- V_o = tegangan keluaran (*output*),
- C_1 = adalah kapasitor tegangan tinggi,
- C_2 = adalah kapasitor tegangan menengah,
- L_c = induktansi *choke*, dan
- Z_b = impedansi beban.

Tegangan keluaran CVT:

$$V_o = \frac{N_2}{N_1} V_i \text{ (volt) } \dots\dots\dots (2.2)$$

Pada keadaan tunak (*steady state*) kondisi ini dapat dipenuhi sesuai dengan desain dan penyetelan CCVT, namun akurasi CCVT akan menurun pada keadaan peralihan (*transient*) mengikuti komponen induktif, kapasitif dan nonliniernya, seperti:

- a) pada gejala peralihan *switching operations* pemutus tenaga (PMT) atau pemisah (PMS).
- b) terjadinya sambaran petir langsung atau tidak langsung pada saluran transmisi tegangan tinggi (SUTT/SUTET) yang terhubung ke busbar gardu induk, yang diikuti ataupun tidak diikuti kerusakan isolasi; atau kerjanya *arrester*.

Oleh karena itu, dalam menentukan rancangan instalasi meter dan proteksi, harus mempertimbangan beberapa karakteristik kerja CCVT dan kesalahan (*error*) akibat arus eksitasi dan pembebanan (*burden*) CCVT tersebut.

Kesalahan (*error*) pembacaan pada meter dan proteksi dapat juga disebabkan terjadinya osilasi feroresonansi (*ferroresonance*) yang diakibatkan:

- a) apabila sirkit kapasitansi beresonansi dengan induktansi nonlinier inti besi (*iron core*). Gejala-gejala ini juga terjadi pada kondisi operasi pemberian

tegangan (*energize*) pada saluran tanpa beban yang diikuti fenomena tegangan lebih (*overvoltage*), sehingga dapat menyebabkan kerusakan peralatan atau penurunan tahanan.

- b) Pelepasan beban (*rejection of load*) sebelum hilangnya gangguan hubung singkat temporer juga menyebabkan kondisi kritis terjadinya osilasi feroresonansi.
- c) Bahaya tegangan lebih tidak terjadi selama periode gangguan hubung singkat, karena terjadi penurunan tegangan pada saat hubung singkat, namun sebaliknya pada saat hilangnya gangguan, tegangan sistem dapat naik dan menimbulkan gejala feroresonansi.

2.5 Kesalahan Trafo Tegangan

Trafo tegangan biasanya dibebani oleh rangkaian impedansi yang terdiri dari relai-relai proteksi, peralatan meter dan kawat (penghubung dari terminasi PT ke instrumen proteksi maupun meter). Kesalahan pengukuran PT (ϵ) berdasarkan IEC-186 adalah sebagai berikut:

Kesalahan PT didefinisikan sebagai:

$$E = \frac{K_T \cdot V_S - V_P}{V_P} \times 100\% \dots \dots \dots (2.3)$$

dimana:

K_T = perbandingan rasio pengenalan,

V_P = tegangan primer aktual (*Volt*), dan

V_S = tegangan sekunder aktual (*Volt*).

Jika kesalahan trafo tegangan (ϵ) positif maka tegangan sekunder lebih besar dari nilai tegangan nominal pengenalnya. Jumlah lilitan yang lebih kecil pada pembebanan rendah dan negatif pada pembebanan besar. Selain kesalahan rasio juga terdapat kesalahan akibat pergeseran fasa. Kesalahan ini bernilai positif jika tegangan sekunder mendahului tegangan primer.

Untuk pemakaian proteksi, akurasi pengukuran tegangan menjadi penting selama kondisi gangguan. Berdasarkan IEC 60044-5, klas standar akurasi dan pergeseran

fasa CVT untuk fungsi pengukuran dan proteksi seperti pada Tabel 1 dan Tabel 2 berikut.

Tabel 2.1 Batasan Kesalahan Tegangan dan Penyimpangan Fasa untuk CVT Pengukuran

Accuracy class	Percentage voltage (ratio) error ϵ_u \pm	Phase displacement ϕ_u \pm	
		Minutes	Centiradians
0,2	0,2	10	0,3
0,5	0,5	20	0,6
1,0	1,0	40	1,2
3,0	3,0	Not specified	Not specified

NOTE 1 The input burden (input impedance) of a compensated bridge is very low (= 0) (very high).

NOTE 2 The power factor of the rated burden must be in accordance with 9.8.2.

NOTE 3 For CVT's having two or more secondary windings (see 9.8): if one of the windings is loaded only occasionally for short periods or only used as a residual voltage winding, its effect upon other windings may be neglected.

Tabel 2.2 Batasan Kesalahan Tegangan dan Penyimpangan Fasa untuk CVT Proteksi

Percentage of rated voltage Protection classes	Percent voltage (ratio) error at percentage of rated voltage ϵ_u \pm				Phase displacement at percentage of rated voltage, ϕ_u \pm							
					Minutes				Centiradians			
	2	5	100	X	2	5	100	X	2	5	100	X
3P	6,0	3,0	3,0	3,0	240	120	120	120	7,0	3,5	3,5	3,5
6P	12,0	6,0	6,0	6,0	480	240	240	240	14,0	7,0	7,0	7,0

Note X = $F_V \times 100$ (rated voltage factor multiplied by 100).

2.6 Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

FMEA adalah suatu metode untuk menganalisa penyebab kegalan pada suatu peralatan. Pada buku pedoman pemeliharaan ini FMEA digunakan sebagai dasar utama untuk menentukan komponen yang akan diperiksa dan dipelihara. FMEA PT/CVT yang terdiri dari Subsistem, *functional failure*, dan *failure mode* FMEA atau Failure Modes and Effects Analysis dibuat dengan cara:

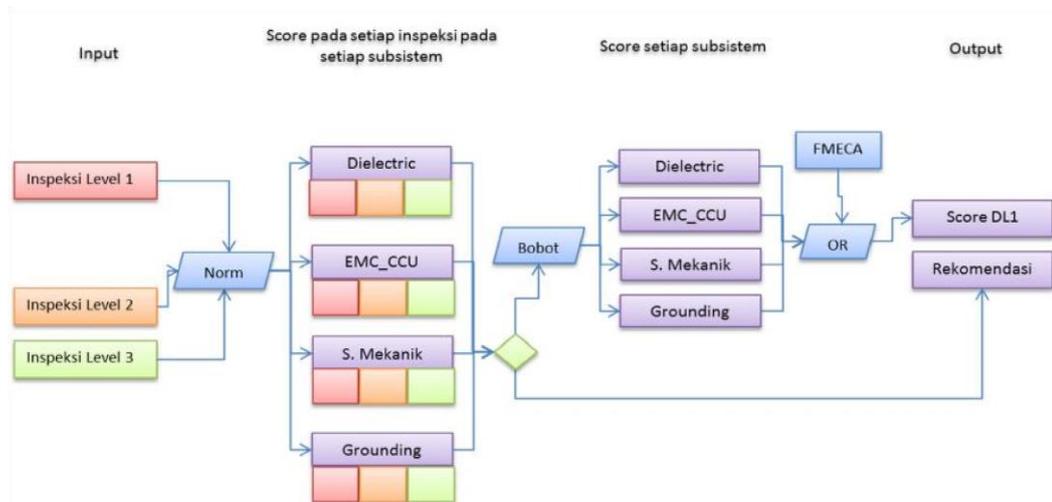
- a) Mendefinisikan sistem (peralatan) dan fungsinya
- b) Sistem atau peralatan adalah kumpulan komponen yang secara bersama-sama bekerja membentuk satu atau lebih fungsi
- c) Menentukan sub sistem dan fungsi tiap subsistem
- d) Sub sistem adalah peralatan dan/atau komponen yang bersama-sama membentuk satu fungsi. Dari fungsinya subsistem berupa unit yang berdiri sendiri dalam suatu sistem
- e) Menentukan *functional failure* tiap subsistem
- f) *Functional failure* adalah ketidakmampuan suatu asset untuk dapat bekerja sesuai fungsinya sesuai standar unjuk kerja yang dapat diterima pemakai
- g) Menentukan *failure mode* tiap subsistem
- h) *Failure mode* adalah setiap kejadian yang mengakibatkan *functional failure*

2.7 Pedoman Pemeliharaan

2.7.1 Konsep Asesmen

Secara umum kondisi CVT ditentukan oleh kondisi dari setiap subsistemnya. Informasi tentang setiap subsistem diperoleh melalui Inspeksi Level 1, Inspeksi Level 2 dan Inspeksi Level 3. Kontribusi dari masing-masing faktor penentu ditentukan oleh hasil FMECA.

Fungsi asesmen kondisi adalah untuk memberikan indikasi penurunan kondisi CVT. *Score* kondisi pada setiap *item* inspeksi diperoleh dengan membandingkan hasil inspeksi terhadap *norm* untuk setiap *item* pengujian. Selanjutnya, kondisi setiap subsistem CVT diperoleh dengan mengalikan *score* kondisi setiap hasil pengujian terhadap *weighting factor* setiap pengujian.



Gambar 2.6 Diagram Asesmen Kondisi CVT Secara Umum

Keterangan Gambar:

FMECA = Failure Mode Effect and Criticality Analysis

CCU = current carrying unit (komponen utamanya kumparan primer dan kumparan sekunder)

EMC = Electromagnetic Circuit (komponen utamanya inti besi)

WF1 = weighting factor masing-masing inspeksi untuk sub sistem tertentu

WF2 = weighting factor masing-masing sub sistem

DL1 = diagnosa level 1

2.7.2 In Service Inspection

In Service Inspection adalah kegiatan pengamatan visual pada bagian-bagian peralatan terhadap adanya anomali yang berpotensi menurunkan unjuk kerja peralatan atau merusak sebagian/keseluruhan peralatan.

1. Dielectric

- Memeriksa rembesan/kebocoran minyak
- Memeriksa level ketinggian minyak pada gelas penduga.
- Memeriksa isolator dari keretakan, flek, pecah dan kelainan yang lainnya

2. Electromagnetic Circuit

- Memeriksa level ketinggian minyak pada gelas penduga.

- b) Rembesan/kebocoran minyak trafo pada *seal* isolator.
- c) Memeriksa kondisi *Spark Gap*

3. Mechanical Structure

- Memeriksa pondasi dari keretakan atau tidak.
- Memeriksa rumah VT\CVT dari keretakan dan korosi.
- Memeriksa *steel structure* VT\CVT dari bengkok, longgar dan korosi.

4. Pentanahan VT

Inspeksi pentanahan VT dilakukan dengan memeriksa kawat dan terminal pentanahan terhubung ke mess *grounding* switchyard dengan kencang dan sempurna.

2.8 In Service Measurement

In Service Measurement adalah kegiatan pengukuran/pengujian yang dilakukan pada saat peralatan sedang dalam keadaan bertegangan/beroperasi.

2.8.1 Thermovision

Thermovision digunakan untuk melihat *hot spot* pada instalasi listrik, dengan *Infra red Thermovision* dapat dilihat *losses* yang terjadi di jaringan. Semakin tinggi suhu *hot spot* yang terjadi maka semakin besar *losses* yang terjadi. *Losses* dapat diakibatkan oleh sambungan yang kurang baik, pemeriksaan dengan *thermovision* pada CVT digunakan untuk melihat titik-titik sambungan pada CVT. Thermovisi dilakukan pada:

- a) Konduktor dan klem VT. Hal ini bertujuan untuk mengetahui perbedaan suhu antara konduktor dan klem VT
- b) Isolator dan *housing* VT. Hal ini bertujuan untuk mengetahui adanya kelainan/hotspot di dalam VT

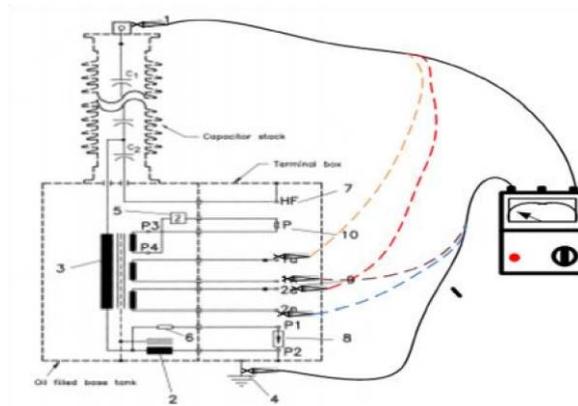
Thermovisi dilakukan setiap 1 bulan, kecuali untuk CVT 500 kV dilakukan setiap 2 minggu. Pada kondisi khusus, thermovisi juga harus dilakukan pada instalasi yang baru beroperasi, pasca dilakukan perbaikan/pemeliharaan, gangguan dan pada trafo tegangan yang berdasarkan hasil pengujian sudah mengalami pemburukan.

2.9 Shutdown Testing/Measurement

Shutdown Testing/Measurement adalah pekerjaan pengujian yang dilakukan pada saat peralatan dalam keadaan padam. Pekerjaan ini dilakukan pada saat pemeliharaan rutin maupun pada saat investigasi ketidaknormalan.

2.9.1 Tahanan Isolasi

Pengujian tahanan isolasi menggunakan alat ukur tahanan isolasi 5 kV untuk sisi primer dan 500 V untuk sisi sekunder. Berfungsi untuk mengetahui kualitas tahanan isolasi pada trafo tegangan tersebut. Pencatatan hasil pengukuran dilakukan pada saat 60 detik.

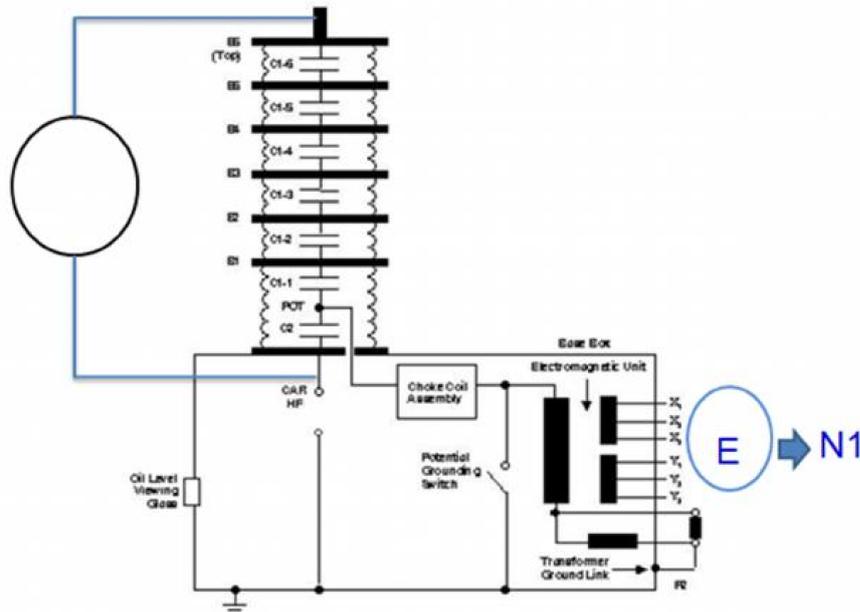


Gambar 2.7 Pengujian Tahanan Isolasi

2.9.2 Rasio

Pengukuran ratio bertujuan untuk membandingkan nilai ratio hasil pengukuran dengan nilai pada *nameplate*. Pengukuran dilakukan dengan menginjeksi tegangan AC 2 – 10KV pada sisi primer dan dibandingkan dengan output tegangan pada sisi sekunder.

Pengujian ini hanya dilakukan ketika pemasangan baru atau setelah relokasi.



Gambar 2.8 Pengukuran Ratio Trafo Tegangan

2.10 Evaluasi Hasil Pemeliharaan dan Rekomendasi

2.10.1 Shutdown Testing/Masurement

a) Tahanan Isolasi

Standard: VDE (*catalogue 228/4*) minimum besarnya tahanan isolasi kumparan trafo, pada suhu operasi dihitung “ 1 Kilo Volt = 1 MOhm.

$$\text{Rumus Kemampuan Isolasi} = R(\text{pengukuran}) / V(\text{inject}) \dots \dots \dots (2.4)$$

Tabel 2.3 Rekomendasi Hasil Tahanan Isolasi *Shutdown Testing/Masurement*

No	Hasil Uji	Keterangan	Rekomendasi
1.	> 1MOhm/1kV	Good	Normal
2.	< 1MOhm/1kV	Poor	Lakukan pengujian lebih lanjut

b) Ratio

Standard yang digunakan: IEC 60044-5 “*Instrument Transformer Part-5*” Edisi I tahun 2004.

Tabel 2.4 Rekomendasi Hasil Pengujian Ratio Shutdown Testing/Measurement

No	Hasil Uji	Keterangan	Rekomendasi
A	Fungsi pengukuran dan proteksi		
1	$< \textit{standard}$	<i>Acceptable</i>	Lakukan pengujian sesuai periode yang dijadwalkan
	$> \textit{standard}$	<i>Unacceptable</i>	a. Lakukan pengujian sekali lagi untuk memastikan akurasi hasil uji atau mengacu ke <i>manual book</i> . b. Lakukan penggantian bila hasil ukur tetap diluar batasan standar