



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Gardu Induk

2.1.1 Pengertian Umum

Gardu Induk merupakan sub sistem dari sistem penyaluran (transmisi) tenaga listrik, atau merupakan satu kesatuan dari sistem penyaluran (transmisi). Penyaluran merupakan sub sistem dari sistem tenaga listrik. Berarti, gardu induk merupakan sub-sub sistem dari sistem tenaga listrik. Sebagai sub sistem dari sistem penyaluran, gardu induk mempunyai peranan penting, dalam pengoperasiannya tidak dapat dipisahkan dari sistem penyaluran (transmisi) secara keseluruhan. Gardu induk yang dibangun merupakan gardu induk konvensional dimana sebagian besar komponennya ditempatkan di luar gedung, kecuali komponen kontrol, sistem proteksi dan sistem kendali serta komponen bantu lainnya, ada di dalam gedung seperti terlihat pada Gambar 2.1¹

Gardu Induk biasanya disingkat dengan GI adalah suatu instalasi yang terdiri dari rel daya, peralatan hubung bagi, transformator daya bersama perlengkapan-perengkapannya (misal peralatan ukur, pengaman dll.), yang merupakan bagian dari suatu sistem tenaga listrik. Gardu Induk merupakan bagian vital dari sistem tenaga listrik, tanpa adanya Gardu Induk maka tenaga listrik tidak dapat disalurkan. Sehingga pembangunan suatu gardu induk diperlukan perhitungan yang tepat sesuai dengan kebutuhan. Selain itu Gardu Induk yang didesain harus aman dan dapat diandalkan. Gardu Induk berperan sangat penting karena merupakan penghubung pelayanan tenaga listrik ke konsumen.

Gardu Induk menurut pemasangan peralatan terbagi atas 2 jenis yaitu :

- Gardu Induk Konvensional
- Gas Insulated Substation (GIS)

¹ Pemeliharaan Kubikel 20 kV Gardu Induk (B.1.1.2.60.3)



Gambar 2.1 Gardu Induk 150 KV

2.1.2 Fungsi Gardu Induk

Fungsi gardu induk diantaranya adalah:

- Sebagai pusat penerimaan dan penyaluran tenaga/daya listrik sesuai dengan kebutuhan pada tegangan yang berbeda (menurunkan atau menaikkan tegangan sistem)
- Daya listrik dapat berasal dari pembangkit atau dari gardu induk lain.
- Sebagai pengukuran, pengawasan operasi serta pengaturan pengamanan sistem tenaga listrik (memutus atau menyambungkan jaringan listrik).
- Sebagai pengaturan daya ke gardu-gardu induk lain melalui tegangan tinggi dan gardu-gardu distribusi melalui feeder-feeder tegangan menengah (melayani beban listrik disekitar Gardu Induk).

2.1.3 Lokasi dan Pertimbangan Pembangunan Gardu Induk Keramasan

Pembangunan gardu induk Keramasan di Jl. Abi kusno cokrosuyoso No. 24 dengan kapasitas 30 MVA, 150 KV/20 KV oleh PT PLN (Persero) di bawah koordinasi Unit Induk Penyaluran dan pusat pengatur beban Sumatera (UIP3BS).



Gambar 2.2 Gardu Induk Keramasan

Pertimbangan pembangunan gardu induk Keramasan adalah:

- Kebutuhan (permintaan) beban yang semakin meningkat, mendekati bahkan melebihi kemampuan Gardu Induk yang ada.
- Jika kondisi Gardu Induk *eksisting* masih memungkinkan, biasanya cukup dilakukan *up-rating* atau menaikkan kapasitas Gardu Induk yang ada, misalnya dengan melakukan penggantian dan penambahan transformator daya.
- Adanya perluasan daerah/ wilayah atau adanya daerah/ wilayah baru, yang pasti membutuhkan ketersediaan/ pasokan daya listrik cukup besar.
- Adanya pembangunan infra struktur bagi kawasan industri (industrial estate).
- Proyeksi kebutuhan daya listrik untuk jangka waktu tertentu, sehingga perlu disiapkan gardu induk baru atau perluasan gardu induk.

Adanya pengembangan sistem tenaga listrik secara terpadu, misalnya pembangunan pembangkit listrik - pembangkit listrik baru, sehingga dilakukan perluasan sistem penyaluran (transmisi), tentunya dibarengi dengan pembangunan Gardu Indukbaru atau perluasan.



2.1.4 Peralatan pada Gardu Induk

2.1.4.1 Transformator Daya²

Berfungsi mentransformasikan daya listrik, dengan merubah besaran tegangannya, sedangkan frekuensinya tetap. *Transformator* daya juga berfungsi untuk pengaturan tegangan. *Transformator* daya dilengkapi dengan trafo pentanahan yang berfungsi untuk mendapatkan titik neutral dari trafo daya. Peralatan ini disebut Neutral Current Transformer (NCT). Perlengkapan lainnya adalah pentanahan trafo, yang disebut Neutral Grounding Resistance (NGR).



Gambar 2.3 Trafo Daya

2.1.4.2 Neutral Grounding Resistance (NGR)³

Komponen yang dipasang antara titik neutral trafo dengan pentanahan. Berfungsi untuk memperkecil arus gangguan yang terjadi. Diperlukan proteksi

² Sigi syah wibowo, Analisa sistem tenaga (Jakarta: UPT. Percetakan dan Penerbit Polinema, 2018), hal.31

³ Shoaib Khan, Sheeba Khan dan Ghariani Ahmed, Industrial Power System (Idia, CRC Press, 2018) hal.86



yang praktis dan biasanya tidak terlalu mahal, karena karakteristik *relay* dipengaruhi oleh sistem pentanahan *neutral*.



Gambar 2.4 Neutral Grounding Resistance (NGR)

2.1.4.3 Circuit Breaker (CB)⁴



Gambar 2.5 Circuit Breaker

⁴ Ir.Bonggas L.Tobing, *Peralatan Tegangan Tinggi* (Jakarta, Gramedia Pustaka Utama, 2003) hal.13



Adalah peralatan pemutus, yang berfungsi untuk memutus rangkaian listrik dalam keadaan berbeban (berarus). CB dapat dioperasikan pada saat jaringan dalam kondisi normal maupun pada saat terjadi gangguan. Karena pada saat bekerja, CB mengeluarkan (menyebabkan timbulnya) busur api, maka pada CB dilengkapi dengan pemadam busur api.

Pemadam busur api berupa⁵ :

1. Minyak (OCB)
2. Udara (ACB)
3. Gas (GCB)

2.1.4.4 Disconnecting Switch (DS)

Adalah peralatan pemisah, yang berfungsi untuk memisahkan rangkaian listrik dalam keadaan tidak berbeban. Di dalam gardu induk, DS terpasang di :

- *Transformer Bay* (TR Bay).
- *Transmission Line Bay* (TL Bay).
- *Busbar*.
- *Bus Couple*.

Karena DS hanya dapat dioperasikan pada kondisi jaringan tidak berbeban, maka yang harus dioperasikan terlebih dahulu adalah CB. Setelah rangkaian diputus oleh CB, baru DS dioperasikan.

⁵ Ibid hal.31

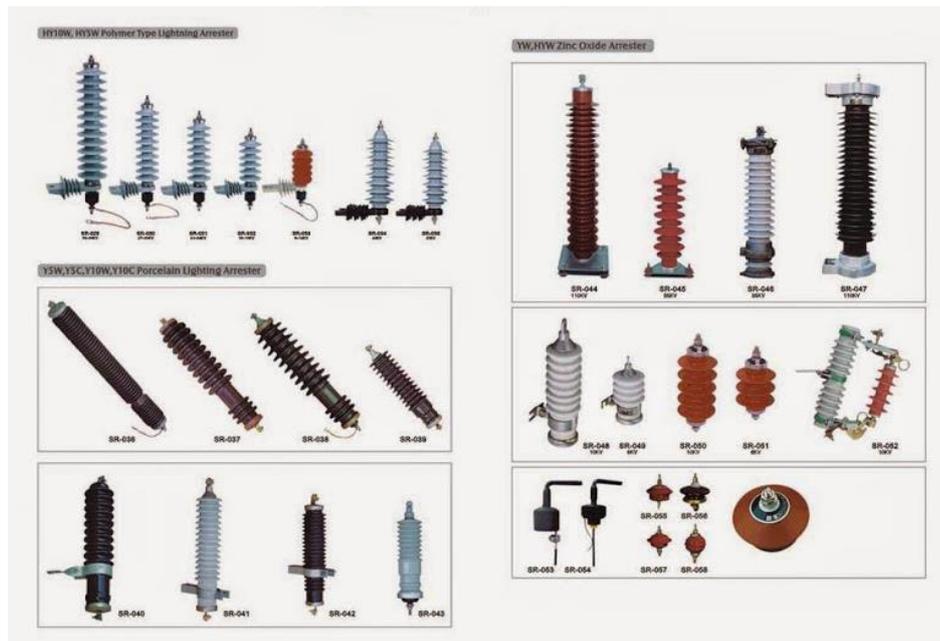


Gambar 2.6 Disconnecting Switch

2.1.4.5 Lightning Arrester (LA)⁶

Berfungsi untuk melindungi (pengaman) peralatan listrik di gardu induk dari tegangan lebih akibat terjadinya sambaran petir (lightning surge) pada kawat transmisi, maupun disebabkan oleh surya hubung (switching surge). Dalam keadaan normal (tidak terjadi gangguan), LA bersifat isolatif atau tidak bisa menyalurkan arus listrik. Dalam keadaan terjadi gangguan yang menyebabkan LA bekerja, maka LA bersifat konduktif atau menyalurkan arus listrik ke bumi.

⁶ U.A. Bakshi dan M.V. Bakshi, Power System II (Maharashtra, Technical Publications 2009) hal.21



Gambar 2.7 Lightning Arrester

2.1.4.6 Current Transformer (CT)⁷

Berfungsi merubah besaran arus dari arus yang besar ke arus yang kecil atau memperkecil besaran arus listrik pada sistem tenaga listrik, menjadi arus untuk sistem pengukuran dan proteksi. Mengisolasi rangkaian sekunder terhadap rangkaian primer, yaitu memisahkan instalasi pengukuran dan proteksi tegangan tinggi.

^{7 7} PT. PLN (Persero), Surat Keputusan Direksi PT. PLN (Persero), No. 0520-2.K/DIR/2014, Oktober 2014.



Gambar 2.8 Current transformer

2.1.4.7 Potential Transformer (PT)⁸

Berfungsi untuk merubah besaran tegangan dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau memperkecil besaran tegangan listrik pada sistem tenaga listrik, menjadi besaran tegangan untuk pengukuran dan proteksi.

Mengisolasi rangkaian sekunder terhadap rangkaian primer, dengan memisahkan instalasi pengukuran dan proteksi tegangan tinggi.



Gambar 2.9 Potensial Transformer

⁸ PT. PLN (Persero), Surat Keputusan Direksi PT. PLN (Persero), No. 0520-3.K/DIR/2014, Oktober 2014.



2.1.4.8 Trafo Pemakaian Sendiri (TPS)⁹

Berfungsi sebagai sumber tegangan AC 3 fasa 220/ 380 Volt. Digunakan untuk kebutuhan intern gardu induk, antara lain untuk :

- Penerangan di *switch yard*, gedung kontrol, halaman GI dan sekeliling GI.
- Alat pendingin (AC).
- *Rectifier*.
- Pompa air dan motor-motor listrik.
- Peralatan lain yang memerlukan listrik tegangan rendah.

2.1.4.9. Rel (Busbar)¹⁰



Gambar 2.10 Rel (Bus Bar)

Berfungsi sebagai titik pertemuan/ hubungan (connecting) antara *transformator* daya, SUTT, SKTT serta komponen listrik lainnya yang ada pada *switch yard*.

Komponen rel (busbar) antara lain :

- Konduktor (AAAC, HAL, THAL, BC, HDCC).
- Insulator String & Fitting (Insulator, Tension Clamp, Suspension Clamp, Socket Eye, Anchor Sackle, Spacer).

⁹ Djiteng Marsudi, *Pembangkitan Energi Listrik* (Jakarta, Erlangga, 2011) hal.30

¹⁰ *Ibid* hal.52



2.1.5 Relai OVR / UVR¹¹

Untuk keperluan pengoperasian sistem maka relai bay reaktor dan bay kapasitor juga dilengkapi dengan relai tegangan berupa *Under Voltage Relay* (UVR) dan *Over Voltage Relay* (OVR). UVR dipergunakan untuk melepaskan reaktor secara otomatis ketika tegangan system sudah dianggap rendah, sedangkan OVR dipergunakan untuk memasukkan reaktor secara otomatis ketika tegangan sistem dianggap tinggi. Sedangkan pada bay kapasitor OVR dipergunakan untuk melepaskan kapasitor secara otomatis ketika tegangan sudah dianggap tinggi, dan UVR dipergunakan untuk memasukkan kapasitor ketika tegangan sistem dianggap rendah.

Parameter UVR/OVR yang dipergunakan adalah:

1. Nilai tegangan kerja, merupakan setelan tegangan yang akan mengerjakan relai untuk melepas dan memasukkan reaktor/kapasitor secara otomatis.
2. Nilai tegangan reset / drop off, merupakan besaran tegangan yang menyebabkan rele reset setelah mengalami pick up.
3. Karakteristik waktu kerja, merupakan parameter pemilihan kurva waktu kerja.
4. Nilai waktu kerja, merupakan setelan waktu kerja relai berdasarkan karakteristik.

*Annunciator*¹² adalah peralatan bantu yang berfungsi memberikan tanda peringatan kepada operator GI fungsi proteksi mana yang bekerja. *Annunciator* mengambil input dari masing-masing relai proteksi. *Annunciator* dapat direset setelah operator mencatat dan menekan tombol “*acknowledge*” dan “*reset*”. *Annunciator* dilengkapi dengan alarm. Alarm berupa peringatan sirene suara

¹¹ Felix A. Farret dan M. Godoy simoes, *Integration of renewable sources of Energy* (New jersey: John Wiley & Sons, 2017) hal.486

¹² Yulistira S. dan A. Soedarsono, *Kamus Istilah Proyek* (Jakarta, Elex Media Komputido, 2001) hal.15

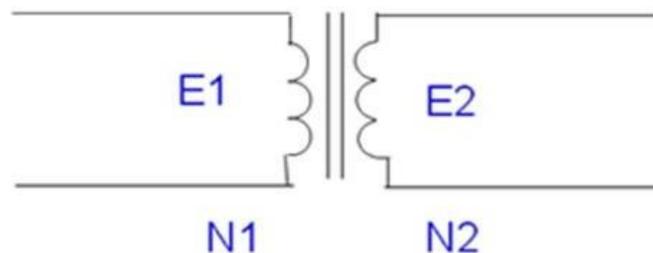


yang bekerja bersamaan dengan terjadinya gangguan. Alarm dapat dihentikan setelah operator menekan tombol “*acknowledge*”.

2.2 Trafo Tegangan (*Voltage Transformer*)¹³

2.2.1 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.¹⁴



Gambar 2.11 Prinsip kerja trafo tegangan

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

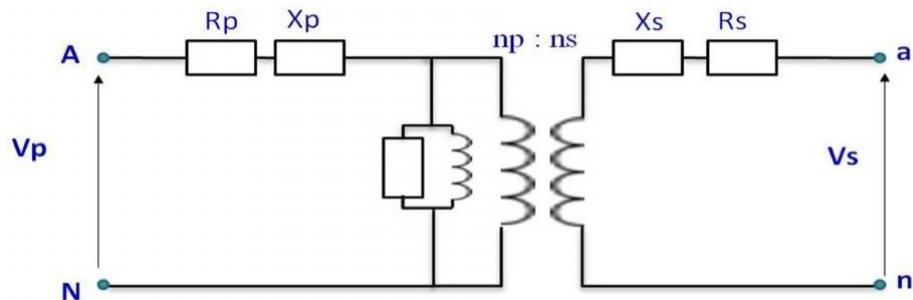
Dimana:

a = Rasio transformasi ($N_1 \square N_2$) E_1 = Tegangan primer

N_1 = Jumlah belitan primer E_2 = Tegangan sekunder

N_2 = Jumlah belitan sekunder

¹³ PT. PLN (PERSERO), Surat Keputusan Direksi PT. PLN (PERSERO), No. 0520-2.K/DIR/2014, Oktober



Gambar 2.12 Rangkaian Ekuivalen Trafo Tegangan

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:

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

2.2.2 Fungsi Trafo Tegangan

Fungsi dari trafo tegangan yaitu:

1. 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.
2. 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.
3. Mengisolasi bagian primer yang tegangannya sangat tinggi dengan bagian sekunder yang tegangannya rendah untuk digunakan sebagai sistem proteksi dan pengukuran peralatan dibagikan primer.



4. Sebagai standarisasi besaran tegangan sekunder (100 , $100/\sqrt{3}$, $110/\sqrt{3}$ dan 110 volt) untuk keperluan peralatan sisi sekunder.
5. Memiliki 2 kelas, yaitu kelas proteksi (3P, 6P) dan kelas pengukuran (0,1; 0,2; 0,5;1;3).

2.2.3 Jenis Trafo Tegangan

Trafo tegangan dibagi menjadi dua jenis yaitu:

1. 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.

2. 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.

2.2.4 Bagian-Bagian Trafo Tegangan

2.2.4.1 Trafo Tegangan Jenis Magnetik

- 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

- Rangkaian *Electromagnetic*

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

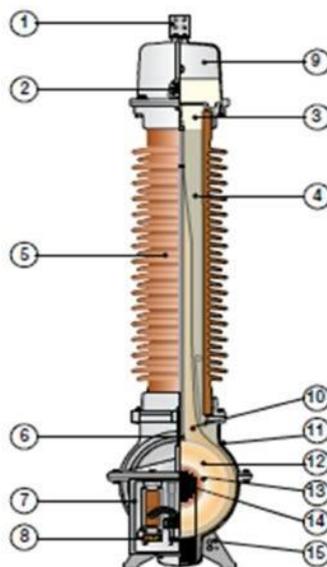
- *Expansion Chamber*

Merupakan peralatan yang digunakan untuk mengkompensasi level



ketinggian minyak akibat perubahan volume sebagai pengaruh temperatur. Jenis yang umum digunakan adalah *metallic bellow*.

- Terminal Primer
Adalah terminal yang terhubung pada sisi tegangan tinggi (fasa) dan satu lagi terhubung pada sistem pentanahan (*grounding*).
- Struktur Mekanikal
Struktur mekanikal adalah peralatan yang menyokong berdirinya trafo tegangan. Terdiri dari:
 - Pondasi
 - Struktur penopang VT
 - Isolator (keramik/*polyester*)
- Sistem Pentanahan
Sistem pentanahan adalah peralatan yang berfungsi mengalirkan arus lebih akibat tegangan surja atau sambaran petir ke tanah.



Gambar 2.13 Bagian-bagian VT

Keterangan:

1. Terminal utama

9. Expansion system



- | | |
|-------------------------------|----------------------|
| 2. Kaca pemantau level minyak | 10. Isolasi kertas |
| 3. Minyak | 11. Tanki |
| 4. Quartz filling | 12. Belitan primer |
| 5. Isolator | 13. Belitan sekunder |
| 6. Lifting lug | 14. Inti (core) |
| 7. Kotak terminal sekunder | 15. Koneksi ground |
| 8. Terminal ujung netral | |

2.2.4.2 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-polypropylane* 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.

- Pembagi Tegangan (*Capacitive Voltage Divider*)

C1, C2 (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 C2 lebih besar dari C1 dan terhubung seri. Sebagai contoh untuk CVT 150/√3 kV / 100/√3 V, kapasitansi masukan (*input capacity*) 8.300 pF yang terdiri dari C1 = 8994 pF, dan C2 = 149.132 pF (Gambar 2.13 poin 2)



- *Ferroresonance supression/damping circuit*

Ferroresonance supression/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. (Gambar 2.14 poin 3)

- 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. (Gambar 2.14 poin 4)

- *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. (Gambar 2.14 poin 5)

- 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. (Gambar 2.14 poin 1)

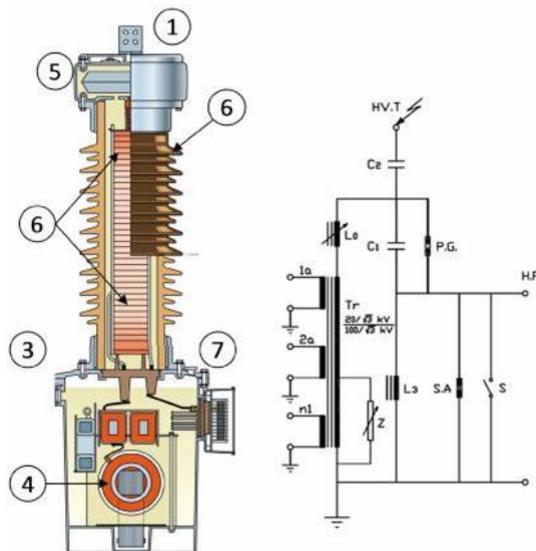
- Terminal Sekunder

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. (Gambar 2.14 poin 7). Pada box terminal sekunder terdapat juga komponen lain yang terdiri dari:

- PG (protective gap) adalah gap pengaman,
- 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.
- L3 adalah reaktor pentanahan yang berfungsi untuk meneruskan frekuensi 50 Hz,



- SA (surge arrester) atau arester surja adalah pelindung terhadap gelombang surja petir.
 - S adalah sakelar pentanahan (*earthing switch*), yang biasanya dipergunakan pada kegiatan pemeliharaan.
- Struktur Mekanikal
Struktur mekanikal adalah peralatan yang menyokong berdirinya trafo tegangan yang terdiri dari:
 - Pondasi
 - Struktur penopang CVT
 - Isolator penyangga (*porcelain/polyester*). tempat kedudukan kapasitor dan berfungsi sebagai isolasi pada bagian-bagian tegangan tinggi. (Gambar 2.13 poin 6)
 - Sistem Pentanahan
Sistem pentanahan adalah peralatan yang berfungsi mengalirkan arus lebih akibat tegangan surja atau sambaran petir ke tanah.



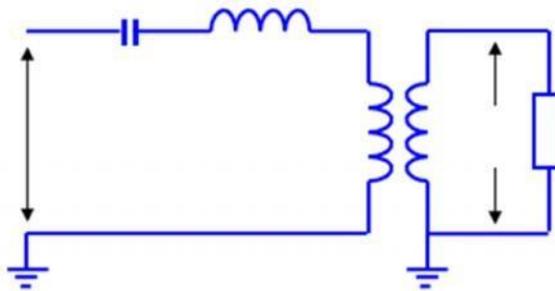
Gambar 2.14 Konstruksi Trafo Tegangan Kapasitif



2.2.5 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 ($C1$ & $C2$) 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 2.15 Rangkaian Ekuivalen CV

dimana:

V_i = tegangan tinggi ekuivalen (input),

V_p = tegangan tinggi sisi primer CVT,

V_o = tegangan keluaran (output),

$C1$ = adalah kapasitor tegangan tinggi,

$C2$ = adalah kapasitor tegangan menengah,

L_c = induktansi choke, dan

Z_b = impedansi beban.

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 non liniernya, seperti:

- pada gejala peralihan switching operations pemutus tenaga (PMT) atau pemisah (PMS).
- 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 mempertimbangkan 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:

- apabila sirkuit kapasitansi beresonansi dengan induktansi *nonlinear* 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.
- Pelepasan beban (*rejection of load*) sebelum hilangnya gangguan hubung singkat temporer juga menyebabkan kondisi kritis terjadinya osilasi *feroresonansi*.
- 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*.

2.2.6 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:

$$\varepsilon = \frac{K_T \cdot V_S - V_P}{V_P} \times 100\%$$

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 berikut:

Tabel 2. 1 Batasan Kesalahan Tegangan dan Penyimpangan Fasa untuk CVT Pengukuran

Kelas akurasi	Persentase kesalahan Tegangan (Rasio) \pm	Perpindahan fasa	
		Menit	centiradians
0.2	0.2	10	0.3
0.5	0.5	20	0.6
1	1	40	1.2
3	3	Tidak ditentukan	Tidak ditentukan



Note 1: Beban masukan (impedansi masukan) dari jembatan penghubung sangat rendah ($=0$) (sangat tinggi)

Note 2: Faktor daya dari beban pengenalan harus sesuai dengan 9.8.2

Note 3: Untuk CVT yang memiliki dua atau lebih belitan sekunder (lihat 9.8) jika salah satu belitan hanya di bebani kadang-kadang untuk waktu yang singkat atau hanya digunakan sebagai belitan tegangan sisa, pengaruhnya terhadap belitan lain mungkin terlantar.

Tabel 2. 2 Batasan Kesalahan Tegangan dan Penyimpangan Fasa untuk CVT

Percentage of rated voltage Protection classes	Percent voltage (ratio) error at percentage of rated voltage ϵ_v \pm				Phase displacement at percentage of rated voltage, ϕ_v \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).

2.2.7 Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

FMEA adalah suatu metode untuk menganalisa penyebab kegagalan 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 Subsystem, *functional failure*, dan *failure mode* dapat dilihat pada Lampiran 2

FMEA atau Failure Modes and Effects Analysis dibuat dengan cara:

- Mendefinisikan sistem (peralatan) dan fungsinya
- Sistem atau peralatan adalah kumpulan komponen yang secara bersama-sama bekerja membentuk satu atau lebih fungsi
- Menentukan sub sistem dan fungsi tiap subsystem



- Sub sistem adalah peralatan dan/atau komponen yang bersama-sama membentuk satu fungsi. Dari fungsinya subsistem berupa unit yang berdiri sendiri dalam suatu sistem
- Menentukan *functional failure* tiap subsistem
- *Functional failure* adalah ketidakmampuan suatu asset untuk dapat bekerja sesuai fungsinya sesuai standar unjuk kerja yang dapat diterima pemakai
- Menentukan *failure mode* tiap subsistem
- *Failure mode* adalah setiap kejadian yang mengakibatkan *functional failure*

2.3 *Negative sequence* ¹⁵

Deteksi pengontrol alarm *negative sequence* mendeteksi urutan fasa *negative* dengan mengukur keseimbangan beban dalam fasa yang terhubung. Jika ketidakseimbangan beban ini melebihi ambang yang dapat di konfigurasi, alarm urutan fase negative dirancang untuk melindungi *Potensial Transformer (PT)*. Penyebab beban fasa tak seimbang diantaranya karena kesalahan saluran, pergeseran phasor/ beda sudut pada trafo, kerusakan pada PMT, dan juga *maneuver* pergerakan atau pergeseran sudut antar fasa dalam trafo hubung bintang (delta) sinkronisasi menjadi lebih sulit dan mengarah ke arus besar jika pemutus ditutup. Komponen arus urutan *negative* menyebabkan panas berlebih pada generator, perlindungan urutan *negative* saat ini telah menjadi standar dalam industri terutama di PT.PLN.

¹⁶Ada tiga jenis impedansi urutan suatu sistem yang dibahas disini yaitu urutan positif, urutan negatif dan impedansi urutan nol. Mereka didefinisikan sebagai berikut: Impedansi rangkaian ketika arus urutan positif saja mengalir disebut impedansi ke arus urutan positif. Demikian pula ketika hanya arus urutan negatif yang ada, impedansi disebut impedansi ke arus urutan negatif. Ketika hanya arus urutan nol yang mengalir, impedansi disebut impedansi ke arus urutan nol. Untuk rangkaian statis simetris 3 fasa tanpa tegangan internal seperti transformator

¹⁵ Geoff Klempner dan Isidor Kerszebaum, *Operatio maintenance of large generators* (New York: John Wiley & Sons, 2004), hal.176

¹⁶ G. Shiriivasan, *Power System Analysis* (Maharashtra Technical Publications, 2009) hal.5-9



dan saluran transmisi, impedansi ke arus dari setiap urutan adalah sama dalam tiga fasa juga arus dari urutan tertentu akan menghasilkan penurunan urutan yang sama (atau) tegangan dari urutan tertentu hanya akan menghasilkan arus dengan urutan yang sama. Artinya tidak ada gotong royong antar sequence networks. Untuk perangkat statis, urutan tidak memiliki signifikansi. Impedans urutan positif dan negatif adalah sama; impedansi urutan nol yang mencakup pentingnya jalur balik melalui ground berbeda dengan impedansi urutan positif dan negatif pada umumnya.

Tetapi dalam kasus mesin berputar simetris, impedans bertemu dengan dinamo arus dari urutan yang diberikan sama dalam tiga fasa. Karena menurut definisi, induktansi, adalah hubungan fluks per ampere, itu akan tergantung pada urutan fasa urutan arus relatif terhadap arah putaran rotor. Impedans urutan positif, negatif dan nol tidak sama dalam kasus umum. Mari kita merepresentasikan impedans urutan positif, negatif dan nol masing-masing oleh Z_+ , Z_- , dan Z_0 . Dalam kasus sistem simetris, tidak ada kopling timbal balik antara jaringan urutan.