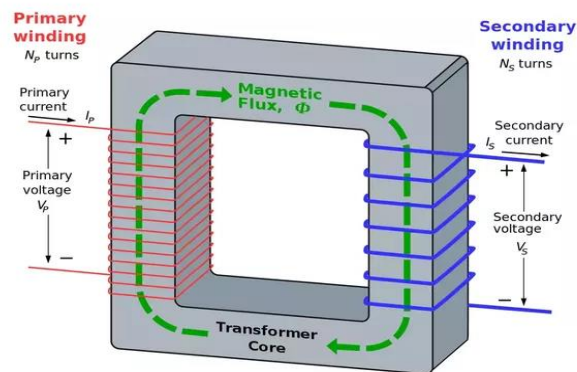


## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Transformator<sup>1</sup>

Menurut IEC 60076-1 tahun 2011, transformator merupakan peralatan statis dimana rangkaian magnetik dan belitan secara induksi elektro magnetik mentransformasikan daya listrik (arus dan tegangan) sistem AC ke sistem arus dengan tegangan lain pada frekuensi yang sama. 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 akan berubah menjadi magnet, dan apabila magnet tersebut dikelilingi oleh suatu belitan maka pada kedua ujung belitan tersebut akan terjadi beda potensial.



Dalam operasi penyaluran tenaga listrik transformator dapat dikatakan jantung dari sistem transmisi dan distribusi. Dalam kondisi ini suatu transformator diharapkan dapat beroperasi secara maksimal. Oleh karena itu transformator harus dipelihara dengan menggunakan sistem dan peralatan yang benar, baik, dan tepat.

---

<sup>1</sup> Sigi Syah Wibowo, Analisa Sistem Tenaga : Analisa Sistem Tenaga, Malang, UPT Percetakan dan Penerbitan Politema 2018, hal 20

### 2.1.1 Prinsip Kerja Transformator

Transformator memiliki bagian utama yaitu inti, dua set atau lebih kumparan dan isolator. Inti transformator terbuat dari lembaran baja silikon yang satu dengan lainnya diisolasi dengan pernis dan kumparan terbuat dari material tembaga. Kumparan yang dihubungkan ke sumber energi disebut kumparan primer, sedangkan kumparan yang dihubungkan ke beban disebut kumparan sekunder. Material isolasi trafo tersusun dari kombinasi material dielektrik cair dengan dielektrik padat.

Jika kumparan primer dihubungkan ke sumber tegangan bolak-balik, sementara kumparan sekunder dalam keadaan tidak dibebani, maka di kumparan primer mengalir arus yang disebut dengan arus beban nol ( $I_0$ ). Arus ini akan membangkitkan fluks bolak-balik pada inti. Fluks bolak-balik ini dilingkupi oleh kumparan primer dan kumparan sekunder, sehingga pada kedua kumparan timbul gaya gerak listrik (ggl).

Jika kumparan sekunder dibebani, maka pada kumparan tersebut mengalir arus sekunder ( $I_2$ ). Arus sekunder akan menimbulkan fluks pada inti transformator yang berlawanan dengan fluks arus  $I_0$ . Untuk mengimbangnya, maka arus di kumparan primer harus bertambah menjadi  $I_1$ , hingga dipenuhi

$$N_1 I_0 = N_1 I_1 - N_2 I_2 \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana :

$N_1$  = jumlah belitan kumparan primer

$N_2$  = jumlah belitan kumparan sekunder

$I_0$  = arus beban nol

$I_1$  = arus di kumparan primer

$I_2$  = arus di kumparan sekunder

### 2.1.2 Jenis - jenis Transformator

Dalam sistem kelistrikan, transformator memiliki beberapa jenis yang digunakan untuk keperluan yang berbeda antara lain :

## **a. Berdasarkan Level Tegangan**

### **1. Transformator *Step Up***

Transformator jenis ini merupakan transformator yang berfungsi untuk menaikkan besaran atau level tegangan AC dari rendah ke besaran yang lebih tinggi. Dalam hal ini nilai tegangan sekunder yang merupakan output lebih tinggi dengan cara memperbanyak jumlah lilitan di kumparan sekunder. Transformator step up biasa digunakan pada sistem pembangkit listrik.

### **2. Transformator *Step Down***

Transformator Step Down adalah transformator yang digunakan untuk menurunkan besaran tegangan AC dari besaran yang tinggi ke besaran yang lebih rendah. Pada Transformator step down ini, rasio jumlah lilitan pada kumparan primer lebih banyak jika dibandingkan dengan jumlah lilitan pada kumparan sekundernya. Transformator jenis ini digunakan pada sistem transmisi 150 kV ke sistem distribusi 11,5 kV dan kemudian diturunkan lagi ke besaran tegangan yang sesuai untuk kebutuhan rumah tangga dan industri.

## **b. Berdasarkan Penggunaannya**

### **1. Transformator Daya**

Transformator daya adalah jenis transformator yang digunakan untuk meyalurkan daya dari sistem pembangkitan ke sistem transmisi yang bertegangan tinggi serta untuk menyalurkan daya dari sistem transmisi ke sistem distribusi.

### **2. Transformator Distribusi**

Transformator distribusi digunakan untuk mendistribusikan energi listrik dari pembangkit listrik ke daerah perumahan ataupun lokasi industri. Pada dasarnya, Transformator distribusi ini mendistribusikan energi listrik pada tegangan menengah 20 kV ke Tegangan 220 V hingga 380 V untuk keperluan industri dan rumah tangga.

### **3. Transformator Ukur**

Transformator ukur digunakan untuk mengukur kuantitas tegangan, arus listrik dan daya yang biasanya diklasifikasikan menjadi transformator tegangan dan transformator arus arus.

### 2.1.3 Transformator Daya<sup>2</sup>

Secara umum transformator daya merupakan peralatan/komponen listrik pada gardu induk yang berfungsi untuk mentransformasikan daya listrik berupa arus dan tegangan dengan mempertahankan nilai frekuensi (tetap). Berdasarkan tegangan operasinya, transformator daya dapat dibedakan menjadi transformator 500/150 kV dan 150/70 kV yang biasa disebut Interbus Transformer (IBT) serta transformator 150/11 kV dan 70/11 kV yang disebut transformator distribusi. Titik netral transformator ditanahkan sesuai dengan kebutuhan untuk sistem pengamanan / proteksi, sebagai contoh transformator 150/70 kV ditanahkan secara langsung di sisi netral 150 kV dan transformator 70/11 kV ditanahkan dengan tahanan rendah atau tahanan tinggi atau langsung di sisi netral 11 kV nya.

### 2.1.4 Transformator Arus

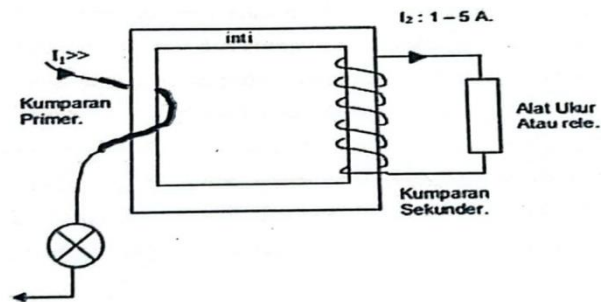
Transformator arus biasa disebut transformator arus atau current transformer (CT) adalah suatu peralatan listrik yang digunakan untuk mentransformasikan besaran arus dari tinggi ke rendah umumnya 1-5 A pada jaringan tegangan tinggi. Alasan lain digunakannya transformator arus adalah karena dalam melakukan pengukuran tidak dapat dilakukan secara langsung menggunakan alat ukur ampere meter karena isolasi pada ampere meter tidak dirancang untuk tegangan tinggi. Selain untuk pengukuran arus, transformator arus juga dibutuhkan untuk pengukuran daya, pengukuran energi, telemeter dan rele proteksi.

Bagian utama transformator arus adalah kumparan primer, kumparan sekunder, dan inti yang terbuat dari baja silikon. Prinsip kerja transformator arus sama dengan prinsip kerja transformator daya satu fasa. Kumparan primer transformator arus dihubungkan seri dengan jaringan atau peralatan yang akan diukur nilai arusnya, sehingga pada kumparan primer ( $I_1$ ) sama besarnya dengan arus pada jaringan. Arus  $I_1$  akan membangkitkan gaya gerak magnet (ggm) pada

---

<sup>2</sup> Tobing, Parulian Lumban. 2017. "Studi Analisa Sistem Proteksi Trafo 150 KV Daya 60 MVA Menggunakan Rele diferensial Pada Gardu Induk Tebing Tinggi" dalam Publikasi Ilmiah. Medan Universitas HKBP Nommensen

kumparan primer sebesar  $N_1$ .  $I_1$ . Ggm ini memproduksi fluks pada inti. Selanjutnya, fluks ini membangkitkan gaya gerak listrik pada kumparan sekunder ( $E_2$ ). Jika terminal kumparan sekunder dihubungkan dengan metering atau rele proteksi, maka akan mengalir arus  $I_2$  pada kumparan sekunder tersebut. Arus ini akan membangkitkan ggm pada kumparan sekunder sebesar  $N_2 \cdot I_2$ .



**Gambar 2.2** Prinsip Kerja Transformator Arus

Fungsi transformator arus antara lain adalah :

- Mengkonversi besaran arus pada sistem tenaga listrik dari besaran primer menjadi besaran sekunder untuk keperluan pengukuran sistem metering dan proteksi.
- Mengisolasi rangkaian sekunder terhadap rangkaian primer, sebagai pengamanan terhadap manusia atau operator yang melakukan pengukuran.
- Standarisasi besaran sekunder, untuk arus nominal 1 -5 A.

## 2.2 Transformator Pemakaian Sendiri

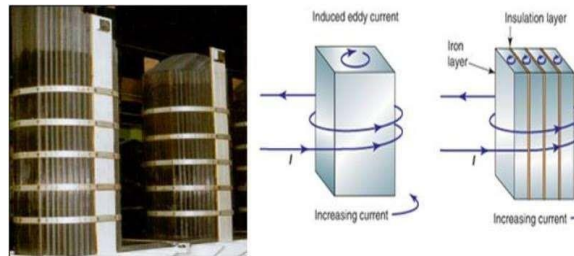
### 1.2.1 Bagian-bagian Utama<sup>3</sup>

#### 1. Inti Besi

Inti besi tersebut berfungsi untuk membangkitkan fluks yang timbul karena arus listrik dalam belitan atau kumparan transformator, sedang bahan ini terbuat

<sup>3</sup> Ariwibowo, Cahyo (2009), "TRAFO DISTRIBUSI PADA JARINGAN TEGANGAN MENENGAH 20 kV di PT PLN (Persero)" dalam Publikasi Ilmiah..Semarang: Universitas Diponegoro

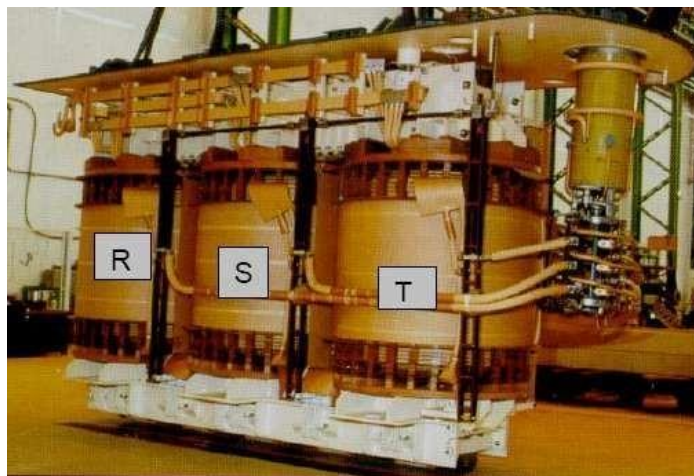
dari lempengan-lempengan baja tipis, hal ini dimaksudkan untuk mengurangi panas yang diakibatkan oleh arus eddy (*eddy current*).



**Gambar 2.3** Inti Besi

## 2. Kumaran Primer dan Kumaran Sekunder

Kawat email yang berisolasi terbentuk kumaran serta terisolasi baik antar kumaran maupun antara kumaran dan inti besi. Terdapat dua kumaran pada inti tersebut yaitu kumaran primer dan kumaran sekunder, bila salah satu kumaran tersebut diberikan tegangan maka pada kumaran akan membangkitkan fluks pada inti serta menginduksi kumaran lainnya sehingga pada kumaran sisi lain akan timbul tegangan tersebut diatas disebut pernapasan transformator, akibatnya permukaan minyak akan bersinggungan dengan udara luar, udara luar tersebut lembab. Oleh sebab itu pada ujung pernapasan diberikan alat dengan bahan yang mampu menyerap kelembaban udara luar yang disebut kristal zat Hygrokopsis (*Clilicagel*).



**Gambar 2.4** Kumaran Transformator

### 3. Minyak Transformator

Untuk mendinginkan transformator saat beroperasi maka kumparan dan inti transformator direndam di dalam minyak transformator, minyak juga berfungsi sebagai isolasi.

Oleh karena itu minyak transformator harus memenuhi persyaratan, sebagai berikut :

- a. Mempunyai kekuatan isolasi (*Dielectric Strength*).
- b. Penyalur panas yang baik dengan berat jenis yang kecil, sehingga partikel-partikel kecil dapat mengendap dengan cepat;
- c. Viskositas yang rendah agar lebih mudah bersirkulasi dan kemampuan pendinginan menjadi lebih baik.
- d. Tidak nyala yang tinggi, tidak mudah menguap.
- e. Sifat kimia yang stabil.

### 4. Bushing

Bushing transformator adalah sebuah konduktor yang berfungsi untuk menghubungkan kumparan transformator dengan rangkaian luar yang diberi selubung isolator. Isolator juga berfungsi sebagai penyekat antara konduktor dengan tangki transformator. Selain itu juga bushing berfungsi sebagai pengaman hubung singkat antara kawat yang bertegangan dengan tangki transformator. Bahan bushing adalah terbuat dari porselin yang tengahnya berlubang.

### 5. Tangki dan Konservator

Tangki transformator berfungsi untuk menyimpan minyak transformator dan sebagai pelindung bagian-bagian transformator yang direndam dalam minyak. Ukuran tangki disesuaikan dengan ukuran inti dan kumparan.

Konservator merupakan tabung berisi minyak transformator yang diletakan pada bagian atas tangki. Fungsinya adalah :

- a. Untuk menjaga ekspansi atau meluapnya minyak akibat pemanasan;
- b. Sebagai saluran pengisian minyak.

## 6. Pendingin Transformator

Perubahan temperatur akibat perubahan beban maka seluruh komponen transformator akan menjadi panas, guna mengurangi panas pada transformator dilakukan pendingin pada transformator. Sedangkan cara pendinginan transformator terdapat dua macam yaitu : alamiah/natural (Onan) dan paksa/tekanan (Onaf). Pada pendinginan alamiah (natural) melalui sirip-sirip radiator yang bersirkulasi dengan udara luar dan untuk transformator yang besar minyak pada transformator disirkulasikan dengan pompa. Sedangkan pada pendinginan paksa pada sirip-sirip transformator terdapat fan yang bekerjanya sesuai setting temperaturnya.

## 7. Tap changer Transformator (perubahan tap)

Tap *changer* adalah alat perubah pembanding transformasi untuk mendapatkan tegangan operasi sekunder yang sesuai dengan tegangan sekunder yang diinginkan dari tegangan primer yang berubah-ubah. Tap *changer* hanya dapat dioperasikan pada keadaan transformator tidak bertegangan atau disebut dengan "*Off Load Tap Changer*" serta dilakukan secara manual.

### 2.2.2 Fungsi Transformator Pemakaian Sendiri<sup>8</sup>

Transformator Pemakaian sendiri di Gardu Induk berfungsi untuk memenuhi kebutuhan Tenaga Listrik peralatan bantu, pada umumnya dibutuhkan untuk memasok daya listrik ke peralatan di Gardu Induk antara lain :

1. Pengisi Baterai (*Charger*)
2. Lampu Penerangan
3. Komputer
4. AC (Air Cnditioner)

---

<sup>8</sup> Okdiansyah, Muhammad Holik. 2017. "INSTALASI SISTEM TRAFU PEMAKAIAN SENDIRI DI GARDU INDUK 150 KV JAJAR" dalam publikasi ilmiah. Surakarta: Universitas Muhammadiyah Surakarta



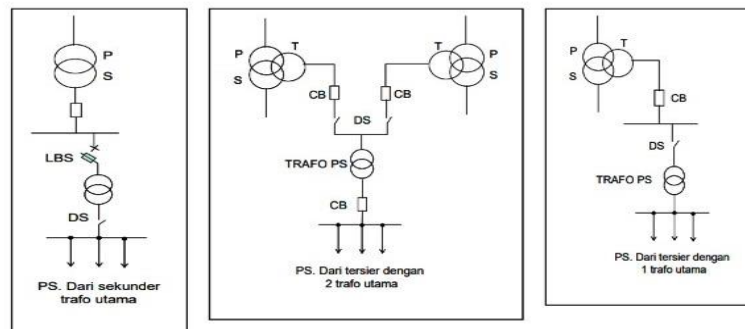
5. Penerangan Gedung
6. Penerangan Panel kontrol
7. DII. Selain sumber AC, di Gardu Induk juga diperlukan sumber arus searah (DC). Sumber tenaga untuk kontrol selalu harus mempunyai keandalan dan stabilitas yang tinggi. Karena persyaratan inilah dipakai Baterai sebagai sumber arus searah.

### 2.2.3 Rangkaian Transformator Pemakaian Sendiri

Kapasitas dari Transformator pemakaian sendiri ditentukan dengan memperhatikan faktor diversitas (*diversity*), yaitu perbandingan antara jumlah kebutuhan (*demand*) maksimum setiap bagian sistim dan kebutuhan maksimum seluruh sistem. Beban gardu dibagi menjadi beban kontinu dan beban terputus-putus. Biasanya tenaga listrik diambilkan dari sisi sekunder atau tersier dari transformator utama atau pada Gardu Induk yang tidak mempunyai transformator untuk distribusi kadang kadang diambilkan dari sisi sekunder dari transformator penyetanahan netral (*Earthing Transformer*). Hal-hal yang perlu dipertimbangkan dalam susunan rangkaian pemakaian sendiri adalah sebagai berikut :

1. Bila tenaga untuk pemakaian sendiri diambil dari sisi tersier dari transformator utama dalam GI yang hanya mempunyai satu transformator utama, harus diusahakan agar dapat diterima tenaga dari jaring - jaring distribusi dari sistim lain (sumber lain).
2. Transformator pemakaian sendiri harus terdiri dari 3 unit , sehingga dalam keadaan gangguan pada sebuah transformator, kedua transformator lainnya dapat bekerja terus dengan hubungan - V delta terbuka.
3. Jika dipakai unit 3 - fasa untuk transformator pemakaian sendiri, harus dipakai lebih dari 2 buah transformator dan kapasitasnya harus cukup besar untuk dapat menyediakan tenaga dengan normal sekalipun ada gangguan pada sebuah transformator.
4. Bila pengasut (*starting transformer*) untuk *kondensator sinkron* dihubungkan pada sisi sekunder dari transformator utama, perlu diatur agar transformator

pengasut itu dapat dipakai sebagai cadangan untuk transformator pemakaian sendiri.

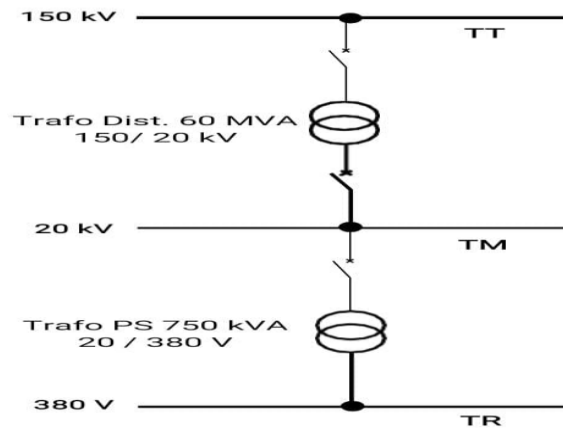


**Gambar 2.5** Rangkaian Transformator Pemakaian Sendiri

Jika tenaga untuk pemakaian sendiri diambil dari sisi tersier dari transformator utama, maka sisi primer dari transformator pemakaian sendiri biasanya hanya dilengkapi dengan pemisah, dan pemutus beban pada sisi *tersier* dari transformator utama dapat dipakai untuk transformator pemakaian sendiri. Jika tenaga untuk pemakaian sendiri diambil dari sisi sekunder dari transformator utama, maka untuk ini perlu dipakai pemutus beban atau pengaman lumer (*power fuse*). Transformator pemakaian sendiri yang menurunkan tegangan dari tegangan tinggi ke tegangan motor, dipakai pengaman lumer atau pemutus tanpa pengaman lumer (*no-fuse breaker*) pada sisi primer dan sisi sekunder. Dalam menentukan letak trafo pemakaian sendiri harus diperhatikan juga kemungkinan perluasan yang akan datang.

#### 2.2.4 Pasokan Transformator Pemakaian Sendiri

Pasokan catu daya untuk kebutuhan pemakaian sendiri diperoleh dari 1 (satu) sumber, dimana sisi primer 11,5 kV dipasok dari Transformator melalui Rel 1. Jumlah Transformator (PS) terpasang akan sangat tergantung dari desain awal pada Gardu Induk tersebut, misalnya terpasang satu atau dua transformator Pemakaian Sendiri (PS). Pertimbangan terpasang dua Transformator PS adalah untuk lebih meningkatkan keandalan, artinya bila salah satu transformator distribusi terganggu maka dapat memindahkan pasokan dari transformator yang operasi dapat dilihat pada gambar di bawah ini :

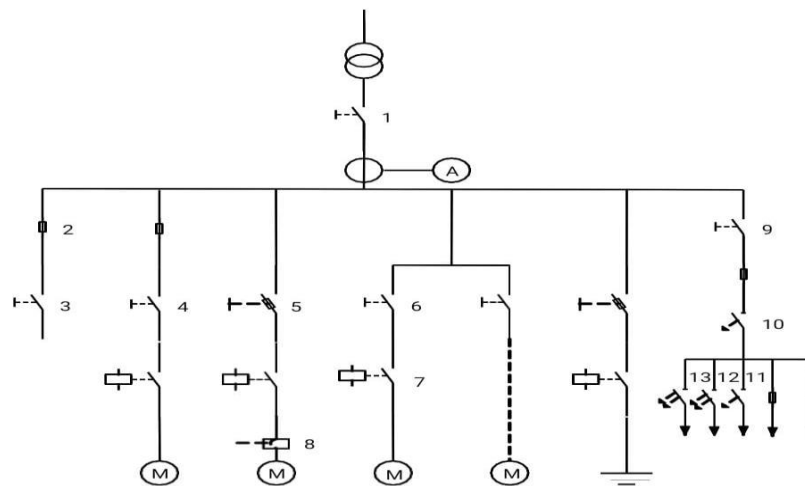


**Gambar 2.6** Diagram Satu Garis Instalasi Transformator Pemakaian Sendiri

## 2.3 Instalasi Sistem Pemakaian Sendiri Gardu Induk

### 2.3.1 Peralatan *Switch Gear* Tegangan Rendah

Umumnya jenis peralatan yang terpasang pada Instalasi *Switch Gear* Tegangan Rendah dari setiap Gardu Induk berbeda dan akan sangat tergantung pada merk dan Desain, misalnya merk ABB dalam pemilihan peralatan terpasang standar untuk *Switch Gear* tegangan rendah dapat dilihat pada gambar di bawah ini.

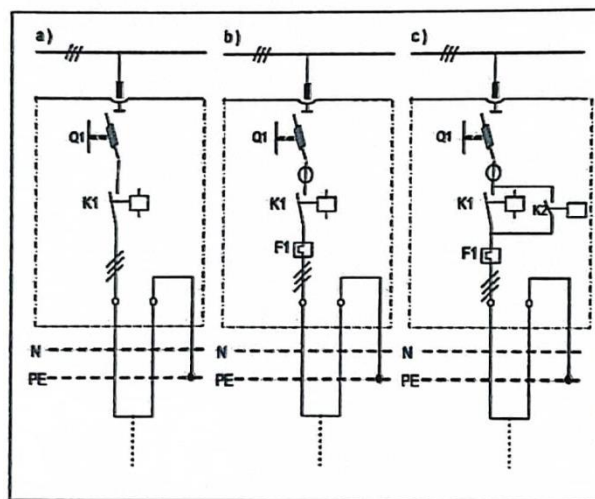


**Gambar 2.7** Peralatan untuk *Switchgear* Tegangan Rendah

Keterangan :

1. *Circuit Breaker*
2. *Fuse*
3. *Disconnector*
4. *Load Break Switch*
5. *Fused switch-disconnector*
6. *Motor Starter ( motor protection switch)*
7. *Contactors*
8. *Overload relay*
9. *Switch disconnector with fuses*
10. *Residual current circuit breaker ( RCCB)*
11. *Miniature Circuit Breaker ( MCB )*
12. *Residual current circuit-breaker with overcurrent trip*
13. *RCD operated miniatur circuit breaker.*

Pengertian *Switchgear* Secara Luas dalam sistem tenaga listrik adalah komponen-komponen hubung/ pemutus dan pendukung - pendukungnya dalam satu kesatuan (unit) terintegrasi, sehingga dapat difungsikan sebagai penghubung, pemutus, dan pelindung terhadap dua sisi rangkaian tersebut.



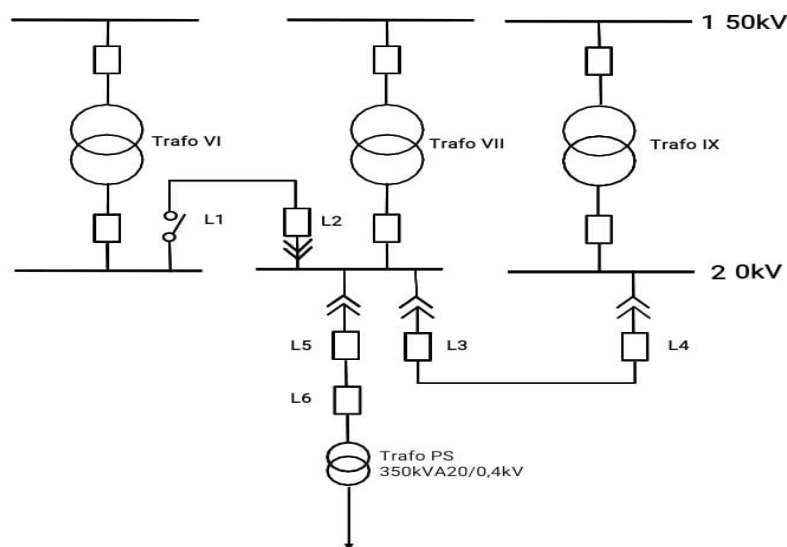
**Gambar 2.8** Diagram Sirkuit Standar Pemasangan dengan Fuse dan *Switch disconnector*.

Keterangan :

- Tanpa Proteksi Panas
- Dengan Proteksi panas, satu arah
- Dengan Pembalikan arah

### 2.3.2 Pengoperasian

Transformator Pemakaian sendiri di Gardu Induk umumnya dipasok dari Transformator Distribusi 150/11 kV atau 70/ 11 kV, tetapi pada Instalasi Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi ada juga yang dipasok dari Transformator pentanahan (*Earthing Transformer*) sesuai S.O.P yang telah ditentukan. Tegangan 11 kV (TM) dialirkan melalui kabel dari *Switch Gear* 11 kV ke Transformator Pemakaian Sendiri (PS) dan tegangan keluaran sisi sekunder (TR) adalah 380 V dialirkan melalui kabel ke Panel Distribusi AC. Bila Tegangan sekunder rendah maka perlu menaikkan tegangan dengan cara menaikkan Tap pada Transformator, pemindahan Tap dapat dilakukan dalam keadaan transformator bebas tegangan (tidak operasi).



**Gambar 2.9** Diagram Satu Garis Transformator PS

### S.O.P Trafo PS :

1. Normal Operasi Trafo PS di pasok dari Trafo VII ( L1, L2, L3, L4 keluar L5, L6 masuk ).
2. Kondisi Abnormal, maka dipasok dari Trafo IX ( L1, L2 keluar, L3, L4, L5, L6 masuk ) .
3. Kondisi Abnormal, maka dipasok dari Trafo VI ( L1, L2 masuk, L3, L4 keluar dan L5, L6 masuk ) .

Keterangan :

L1: Pms *Interface*

L2: Pms *Bus Coupler*

L3: Pmt Kopel Trafo VII

L4: Pmt Kopel Trafo IX

L5: LBS MG Sel 20 kV

L6: LBS MG Sel 20 kV Konvensional.

### 2.3.3 Peralatan Instalasi Transformator PS

Peralatan instalasi sistem pemakaian sendiri umumnya terdiri dari *Load Breaker Switch* (saklar pemutus beban), Transformator PS, *No Fuse Breaker* (NFB) dan Lemari Panel Distribusi AC.



**Gambar 2.10** Load Breaker Switch



**Gambar 2.11** Transformator Pemakaian Sendiri

## **2.4 Transformator Pemakaian Sendiri**

### **2.4.1 Lokasi Pemasangan**

Pemasangan Transformator pemakaian sendiri tergantung dari desain Gardu Induk pada awal pembangunan antara lain pemasangan dalam gedung kontrol (*Indoor*) dan pemasangan luar gedung kontrol (*Outdoor*). Bila terpasang didalam ruangan maka sirkulasi udara pada ruangan harus baik dan dipasang *exhaust, fan*, bila terpasang diluar gedung maka harus aman dan terlindung dari benda-benda atau binatang yang dapat menyebabkan gangguan.

### **2.4.2 Batasan Operasi**

Tegangan input di sisi primer hendaknya disesuaikan dengan spesifikasi teknis dari pabrik pembuatnya dan tegangan output disisi sekunder disesuaikan dengan karakteristik beban. Besarnya Kapasitas daya terpasang (kVA) Transformator pemakaian sendiri biasanya diperhitungkan dengan besarnya beban dan melihat perkembangan atau perluasan pada gardu induk tersebut. Umumnya Kapasitas Transformator Pemakaian Sendiri adalah 200 - 800 kVA.

### **2.4.3 Sistem Pengaturan Tegangan**

Pengaturan tegangan diatur sesuai dengan tegangan kerja peralatan. Cara menurunkan dan menaikkan tegangan pada Transformator pemakaian sendiri biasanya dengan merubah Tap (*Off-Load Tap Changer*) kondisi dimana keadaan transformator tanpa beban. *Tap changer* yang hanya bisa beroperasi untuk memindahkan tap transformator dalam keadaan transformator tidak berbeban dan hanya dapat dioperasikan manual.

### **2.4.4 Sistem Pengaturan Beban**

Kapasitas dari transformator pemakaian sendiri ditentukan dengan memperhatikan faktor diversitas (*diversity*) yaitu perbandingan antara jumlah kebutuhan (*demand*) maksimum setiap bagian sistem dan kebutuhan maksimum seluruh sistem. Dalam hal ini beban gardu dibagi menjadi beban kontinu dan beban terputus-putus.

### **2.4.5 Sistem Pendingin**

Jika kumparan dialiri arus listrik, maka pada inti besi dan kumparan transformator akan timbul panas akibat adanya rugi-rugi besi dan tembaga. Untuk mengurangi panas sebagai akibat kenaikan suhu yang berlebihan, maka pada transformator perlu dilengkapi dengan sistem pendingin. Dalam hal ini sistem pendingin berfungsi untuk menyalurkan panas agar keluar/ terbuang dari transformator. Metode pengaliran media pendingin pada Transformator Pemakaian sendiri adalah media pendingin minyak dan udara (ONAN), sebagai media pemindah panas dilengkapi dengan sirip-sirip.





**Gambar 2.12** Sirip Sirip Transformator Pemakaian Sendiri

## 2.5 Pengertian Isolasi<sup>1</sup>

Pengertian paling umum dan mudah dipahami dari isolasi adalah "suatu sakelar mekanis yang untuk mengisolasi sirkuit listrik" (Abhang, 2017). Pada saat sistem isolasi ini menahan tekanan elektrik (*electrical stresses*) dan tekanan suhu (*thermal stresses*) yang dapat menyebabkan penuaan (*aging*) akan ditandai dengan adanya peristiwa peluahan sebagian. Isolasi dapat ada beberapa karakteristik diantaranya karakteristik elektrik, dan karakteristik mekanis.

## 2.6 Pengertian Tahanan Isolasi

Tahanan isolasi adalah tahanan yang terdapat diantara dua kawat saluran (kabel) yang diisolasi satu sama lain atau tahanan antara satu kawat saluran dengan tanah (*ground*) (Andriyanto, 2016). Hargi (2017) mendefinisikan tahanan isolasi adalah sebagai suatu yang diukur dari isolasi antara belitan dan inti besi pada transformator. Tahanan isolasi bertujuan agar membatasi aliran arus antara belitan dan inti besi. Nilai yang didapat tahanan isolasi semakin besar indeks polarisasinya maka semakin bagus tahanannya.

---

<sup>1</sup> Andi Makkulau dkk. 2018. "Pengujian Tahanan Isolasi dan Rasio Pada Trafo PS T15 PT INDONESIA POWER UP MERICA" dalam Jurnal Ilmiah: Energi dan Kelistrikan. Banjarnegara: Sekolah Tinggi Teknik-PLN. Januari-Juni 2018..

## 2.7 Perawatan dan Pemantauan Transformator

Dengan melakukan perawatan secara berkala dan pemantauan kondisi transformator pada saat beroperasi akan banyak keuntungan yang didapat, antara lain:

- a. Meningkatkan keandalan dari transformator tersebut.
- b. Memperpanjang masa pakai.
- c. Jika masa pakai lebih panjang, maka secara otomatis akan dapat menghemat biaya penggantian unit transformator.

Adapun langkah-langkah perawatan dari transformator, antara lain adalah:

- a. Pemeriksaan berkala kualitas minyak isolasi.
- b. Pemeriksaan/pengamatan berkala secara langsung (Visual Inspection).
- c. Pemeriksaan-pemeriksaan secara teliti (overhauls) yang terjadwal.

Pada saat transformator beroperasi ada beberapa pemeriksaan dan analisa yang harus dilakukan, antara lain:

1. Pemeriksaan dan analisa minyak isolasi transformator, meliputi:

- a. Tegangan tembus (*breakdown voltage*) Analisa gas terlarut (*dissolved gas analysis, DGA*)
- b. Analisa minyak isolasi secara menyeluruh (sekali setiap 10 tahun)

Pemeriksaan dan analisa kandungan gas terlarut (*dissolved gas analysis, DGA*), untuk mencegah terjadinya partial discharge, kegagalan thermal (*thermal faults*), deteriorasi/pemburukan kertas isolasi/laminasi.

Pemeriksaan dan analisa minyak isolasi secara menyeluruh, meliputi: power factor ( $\tan \delta$ ), kandungan air (*water content*), neutralization number, interfacial tension, furtual analysis dan kandungan katalisator negatif (*inhibitor content*).

2. Pengamatan dan Pemeriksaan Langsung (Visual Inspections)

- a. Kondisi fisik transformator secara menyeluruh
- b. Alat-alat ukur, relay, saringan/filter, dan lain-lain.
- c. Pemeriksaan dengan menggunakan sinar infra-merah

(infrared monitoring) setiap dua tahun

### 3. Tindakan yang biasa dilakukan pada saat Pemeriksaan Teliti (Overhaul)

- a. Perawatan dan pemeriksaan ringan (*Minor overhaul*), setiap 3 atau 6 tahun.
  - On-load tap changers
  - Oil filtering dan vacuum treatment
  - Relays dan auxiliary devices
- b. Perawatan dan pemeriksaan teliti (*Major overhaul*)
  - Secara teknis setidaknya 1 kali selama masa pakai
  - Pembersihan, pengencangan kembali dan pengeringan.
- c. Analisa kimia
  - Analisa kertas penyekat/laminasi (sekali setiap 10 tahun)
- d. Pengujian listrik (*Electrical Test*) untuk peralatan
  - Power transformer
  - Bushing
  - Transformator ukur (*measurement transformer*)
  - Breaker capacitors

Pengujian listrik (*Electrical Test*) dilakukan setiap 6 sampai 9 tahun.

Pengujian yang dilakukan meliputi:

- Doble measurements
- PD-measurement
- Frequency Response Analysis (FRA)
- Voltage Test

Penyebab hubung singkat didalam transformator, antara lain:

- a. Gangguan hubung singkat antara lilitan karena kerusakan laminasi
- b. Perubahan kandungan gas H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> dan C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>.

## 2.8 Pemeliharaan Transformator

Tujuan pemeliharaan adalah untuk mencegah terjadinya gangguan pada saat unit beroperasi, sehingga tidak mengakibatkan kerusakan yang lebih besar / fatal, dan peralatan tersebut mempunyai masa pakai yang lebih lama, menghasilkan unjuk kerja yang lebih baik serta tingkat keselamatan lebih terjamin. Kerusakan terbesar pada mesin listrik berputar terutama pada mesin induksi disebabkan oleh kerusakan isolasi winding stator. Kerusakan isolasi winding stator biasa disebabkan oleh :

### 1. *Thermal Stresses*

*Overheating* yang terjadi pada winding dan berlangsung lama, menyebabkan stress pada winding & isolasi kawat menjadi rapuh, dan lama kelamaan isolasi akan menjadi retak. Jika gejala ini disertai dengan timbulnya PD (*partial discharge*), maka proses penuaan isolasi akan menjadi lebih cepat.

### 2. *Mechanical Stresses*

Winding yang tidak divarnis dengan baik, *connection point*, *blocking coil*, adalah merupakan titik paling lemah terhadap pengaruh dari luar, seperti *mechanical vibration*, dan *magnetic vibration*.

### 3. *Environmental Stresses*

Kontaminasi udara lembab, debu, karbon, minyak atau bahan kimia lain, yang terkumpul di permukaan isolasi, adalah merupakan partikel konduktive yang dapat menghantar listrik.

Karena adanya beda potensial antara winding dengan ground, maka partikel tersebut, akan berfungsi sebagai media hantaran untuk menghantar arus listrik dari winding ke ground, karena sifat kotoran yang demikian maka pada tempat-tempat penumpukan kotoran akan terbentuk jalur hantaran listrik (*Electrical tracking*).

Seperti kita ketahui bahwa pelaksanaan pemeliharaan terdapat beberapa klasifikasi, diantaranya pemeliharaan yang biasa dilakukan secara rutin adalah pemeliharaan jenis preventif.

Pada umumnya pemeliharaan komponen trafo di unit pembangkit thermal dilakukan dalam 2 kategori, yaitu :

- a. Pemeliharaan yang bersifat rutin.

b. Pemeliharaan yang bersifat periodik

**a. Pemeliharaan Rutin**

Pemeliharaan bersifat rutin adalah pemeliharaan yang dilakukan secara berulang dengan periode harian, mingguan dan bulanan dengan kondisi yang sedang beroperasi, yaitu meliputi:

- a. Pemeriksaan temperatur belitan stator, bearing, air pendingin dan lainnya dilakukan setiap hari.
- b. Pemeriksaan kebocoran pendingin minyak (khusus generator dengan pendingin hydrogen) dalam sekali sebulan.
- c. Pemeriksaan vibrasi sekali dalam sebulan.
- d. Pemeriksaan tekanan hydrogen, *seal oil pump*.
- e. Pemeriksaan *fuse rotating rectifier (Brushless Excitation)* atau pemeriksaan sikat arang (*Static Excitation / DC Dinamic Excitation*)

Pada dasarnya penggantian sikat arang dapat dilakukan pada saat mesin beroperasi, karena pada mesin-mesin yang besar sikat arang biasanya dipasang tidak hanya satu tetapi ada beberapa pasang dengan cara parallel.

Ada beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam pelaksanaan penggantian pada kondisi beroperasi, yaitu:

- a. Terjadinya sengatan listrik atau terbakar
- b. Terjadi kontak dengan peralatan yang berputar
- c. Lokasi tempat bekerja harus bersih, penerangan yang cukup dan diberi batas
- d. Petugas pelaksana harus berpakaian rapi, tidak sobek dan pakaian lengan pendek
- e. Semua piranti kerja harus terisolasi dan tidak dapat jauh pada saat bekerja
- f. Beri catatan (Tagging) pada peralatan kontrol bahwa sedang dilakukan pekerjaan penggantian sikat arang.
- g. Sebelum sikat arang lepas dari rumah sikat arang, periksa dan yakinkan bahwa sikat arang yang lain mengontak dengan baik terhadap komutator Slip Ring
- h. Cek tekanan sikat arang, tidak boleh terlalu lemah atau terlalu keras

## **b. Pemeliharaan Periodik**

Pemeriksaan yang bersifat periodik adalah pemeriksaan yang dilakukan berdasarkan lama beroperasi generator, yang diklasifikasikan sebagai berikut:

- a. Pemeriksaan sederhana yang dilakukan setiap 8.000 jam
- b. Pemeriksaan sedang, setiap 16.000 jam
- c. Pemeriksaan serius, setiap 32.000 jam

Pemeriksaan periodik kegiatan yang dilakukan meliputi pembongkaran (disassembly), pemeriksaan (inspection) dan pengujian (testing). Kegiatan pemeriksaan tersebut tidak harus semua komponen dilakukan sama, melainkan tergantung dari klasifikasi pemeriksaan periodiknya.

Pemeriksaan sederhana dan sedang, komponen yang diperiksa tidak seluruhnya melainkan sebagian saja. Tetapi pemeriksaan serius, kegiatan- kegiatan seperti disebutkan diatas dilakukan secara menyeluruh terhadap transformator dan alat bantu.

## **2.9 Masalah Dalam Pengujian Tahanan Isolasi**

Pengujian tahanan isolasi dapat dipengaruhi oleh suhu, kelembaban, dan jalur bocor atau juga kerak kotoran pada *bushing* sehingga berdampak pada nilai tahanan isolasi sebenarnya.

## **2.10 Solusi Penanganan Permasalahan Pengujian Tahanan Isolasi**

- a. Pengujian dilakukan setelah kondisi suhu transformator menurun.
- b. Pembersihan isolator sisi primer dan sekunder serta bagian *bushing* transformator.

## **2.11 Prosedur Pengujian Tahanan Isolasi**

Dalam melakukan suatu pengujian harus memahami prosedur yang berlaku sesuai standar yang ada maupun prosedur yang digunakan oleh perusahaan, berikut prosedur pengujian tahanan isolasi yang digunakan oleh PT PLN (PERSERO) :

- a. Persiapkan material dan alat yang digunakan.
- b. Koordinasikan ke pihak operator.

- c. Lepas PMT 380 V sisi trafo T14.
- d. Lepas fuse 380 V sisi LV T 14.
- e. Lepas PMT 380 V sisi trafo T15.
- f. Pastikan sudah tidak ada tegangan di trafo.
- g. Lepas koneksi bushing sisi 11,5 KV dan 380 Volt.
- h. Pengukuran tahanan isolasi primer dan sekunder sebelum dibersihkan.
- i. Bersihkan isolator sisi primer, sekunder, titik bintang, body transformator, dan konservator.
- j. Pengukuran tahanan isolasi primer dan sekunder sesudah dibersihkan
- k. Pemasangan sambungan bushing kembali sisi 11 KV dan 380 Volt.
- l. Final Check.



**Gambar 2.13** Melakukan pemutusan / pelepasan arus transformator 11,5 kV dari PMT

## 2.12 Perhitungan Pengujian Tahanan Isolasi

Isolasi (*Insulation resistance test*) bertujuan untuk mengetahui besar tahanan isolasi antara belitan dengan *ground* atau antara dua belitan. Pengujian tersebut menggunakan *megger* (Mega ohm meter). Metode yang umum dilakukan adalah dengan memberikan tegangan dan merepresentasikan kondisi isolasi dengan satuan Mega ohm. Tahanan isolasi yang diukur merupakan fungsi dari arus bocor yang menembus melewati isolasi atau melalui jalur bocor pada permukaan eksternal. Pengujian tahanan isolasi ini dapat dipengaruhi suhu, kelembaban, dan jalur bocor pada permukaan eksternal seperti kotoran pada bushing atau isolator. Megaohm

meter biasanya memiliki kapasitas pengujian 500, 1000, 2500, atau 5000 V DC.

Indeks polarisasi adalah sebuah pengujian yang dilakukan untuk mengetahui besar kebocoran arus (*leakage current*)<sup>5</sup>. *Leakage current* sendiri merupakan arus konduksi nyata pada isolasi, dengan membandingkan hasil pengujian selama 10 menit dengan hasil pengujian selama 1 menit. Nilai indeks polarisasi yang semakin besar akan semakin bagus. Jika nilainya terlalu rendah berarti kondisi isolasi mengalami pemburukan Untuk perhitungan indeks polarisasi dapat menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$IP = \frac{R_{10}}{R_1} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana:

IP = Indeks Polarisasi

R<sub>10</sub> = Nilai Tahanan Isolasi saat pengujian selama 10 menit (Ω)

R<sub>1</sub> = Nilai Tahanan Isolasi saat pengujian selama 1 menit (Ω)

**Tabel 2.1 Kondisi Isolasi berdasarkan Indeks Polarisasi**

Kondisi	Indeks Polarisasi
Berbahaya	< 1,0
Jelek	1,0 - 1,1
Dipertanyakan	1,1 - 1,25
Baik	1,25 - 2,0
Sangat baik	Di atas 2.0

Untuk isolasi belitan yang baik, nilai Indeks Polarisasi harus minimum 1.25 pada pengukuran di temperatur 20 °C.

- a. Nilai Indeks Polarisasi dibawah diantara 1.25 - 2 , peralatan masih dapat dioperasikan, tapi perlu pengawasan dan pemantauan berkala.
- b. Nilai Indeks Polarisasi dibawah 1.25, mengindikasikan isolasi belitan peralatan tersebut dalam keadaan basah, kotor atau sudah ada yang bocor.

<sup>5</sup> Buku Pedoman Pemeliharaan Primer Gardu Induk SK DIR 0520 PT.PLN (Persero) Tahun 2014 Tentang Trafo Tenaga



Sehingga perlu dilakukan pembersihan, pengeringan dan refurbish apabila ditemukan kerusakan pada isolasinya.

Arus total yang muncul saat memberikan tegangan *de steady state* terdiri dari :

1. *Charging current* karena sifat kapasitansi dari isolasi yang diukur. Arus ini turun dari nilai maksimum ke nol sangat cepat.
2. *Ion current* karena molecular charge shifting pada isolasi. Arus transien ini menghilang sampai nol lebih lambat.
3. *Leakage current* merupakan arus konduksi nyata pada isolasi. *Leakage current* bervariasi tergantung tegangan uji. Juga termasuk arus bocor dikarenakan kebocoran pada permukaan akibat kontaminasi.

*Leakage current* meningkat lebih cepat dengan kehadiran kelembaban dibanding *absorpt ion current*, pembacaan megaohm tidak akan meningkat seiring waktu layaknya antara kecepatan pada isolasi buruk dengan cepatnya isolasi yang bagus. Hal ini berdampak pada rendahnya indeks polarisasi. Keuntungan dari indeks *ratio* adalah dengan banyaknya hal yang dapat mempengaruhi pembacaan megaohm seperti suhu dan *humidity* baik pada satu menit maupun sepuluh menit. Indeks polarisasi merupakan perbandingan antara nilai tahanan isolasi pada menit ke sepuluh dengan menit pertama.

Tabel 2.2 Nilai Minimum Tahanan Isolasi pada Transformator<sup>4</sup>

Voltase Sirit Nominal V	Voltase uji a,s. V	Resistans insulasi MΩ
SELV dan PELV	250	≥ 0,5
Sampai dengan 5000 V, termasuk FELV	500	≥ 1,0
Di atas 500 V	1000	≥1,0

Nilai Minimum Tahanan Isolasi pada saat pengujian tahanan isolasi pada Transformator Pemakaian Sendiri Telah tercantum pada tabel

---

<sup>4</sup> Buku Pedoman PUIL (PERSYARATAN UMUM INSTALASI LISTRIK) tahun 2014