

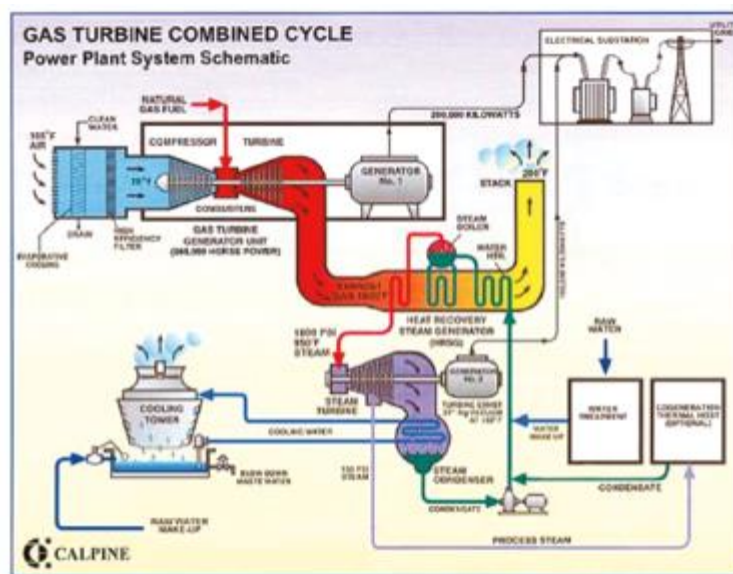
## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Pembangkit Tenaga Listrik

##### 2.1.1 Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG)

PLTG merupakan jenis pembangkit yang menggunakan “udara panas” untuk memutar turbin. Udara panas ini dihasilkan melalui pemanasan udara dengan menggunakan gas di dalam ruang bakar. Udara panas kemudian dialirkan ke turbin.



Gambar 2.1 Ilustrasi Siklus Kerja PLTG

##### 2.1.2 Prinsip Kerja PLTG

PLTG adalah pembangkit tenaga listrik yang mengonversi energi kinetik yang dihasilkan oleh gas untuk menghasilkan energi mekanik pada turbin dan kemudian di konversi lagi oleh generator menjadi energi listrik. Siklus kerja dari PLTG adalah sebagai berikut:

1. Udara dari lingkungan diserap oleh kompresor dengan bantuan filter agar udara yang masuk adalah udara yang bersih dari debu maupun kotoran lainnya.
2. Udara kemudian di tekan oleh kompresor bersamaan dengan bahan bakar gas.

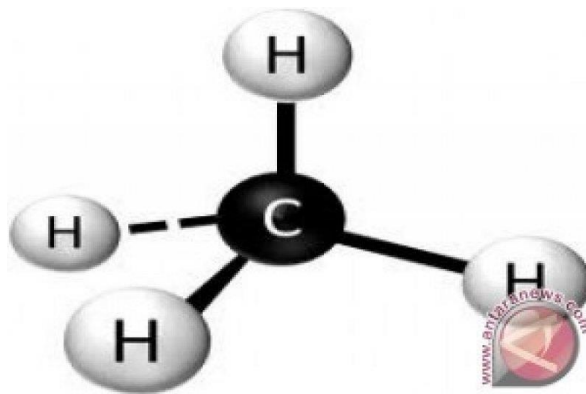


3. Di dalam combustion chamber campuran udara dan gas dibakar dalam tekanan yang tinggi sehingga gas buang dari combustion chamber memiliki tekanan tinggi yang dapat memutar turbin.
4. Turbin mengubah energi kinetik dari gas menjadi energi mekanik selanjutnya turbin akan memutar generator.
5. Generator menghasilkan energi listrik dari berputarnya turbin.
6. Sisa gas bakar dibuang secara langsung ke lingkungan.

### 2.1.3 Bagian-bagian PLTG

#### 1. Bahan Bakar

Bahan bakar yang digunakan di dalam proses pembakaran adalah bahan bakar fosil berbentuk gas yang bernama gas metana dengan rumus kimia  $\text{CH}_4$ . Gas metana merupakan salah satu gas yang terkategori dalam hidrokarbon. Hasil dari pembakaran satu meter kubik gas alam setara dengan 10,6 kWh. Gas metana terdiri dari 4 atom hidrogen dan 1 atom karbon.



Gambar 2.2 Simbol Gas Metana

#### 2. Kompresor

Kompresor berfungsi untuk menghisap udara dari lingkungan untuk dimasukkan ke dalam ruang pembakaran. Dengan naiknya tekanan udara maka suhu udara di dalam ruang pembakaran akan naik sehingga menyebabkan panas.



Gambar 2.3 Kompresor Udara

### 3. Pompa Bahan Bakar

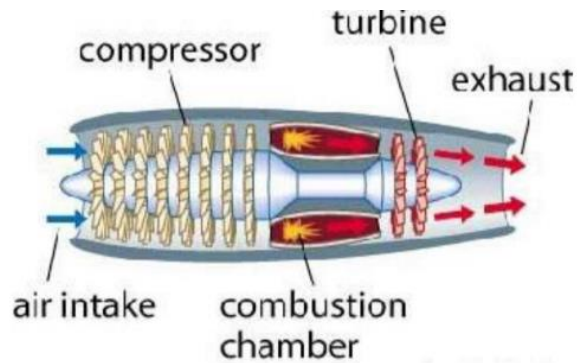
Bakar Pompa Bahan Bakar bekerja dengan prinsip sama seperti kompresor udara sebelumnya, yaitu untuk menghisap gas bahan bakar dari dalam penampungan dan mendorong gas tersebut menuju ruang pembakaran dengan tekanan tinggi.



Gambar 2.4 Fuel Pump

### 1. Ruang Bakar

Ruang bakar merupakan tempat terjadinya pembakaran antara udara dengan bahan bakar. Bahan bakar dapat terbakar apabila terdapat tiga unsur api yaitu bahan bakar, udara dan panas. Panas dihasilkan oleh udara dan bahan bakar yang dipompa sebelumnya di dalam kompresor dan pompa bahan bakar.



Gambar 2.5 Ilustrasi Combustion Chambe

## 2. Turbin

Turbin adalah komponen yang mengubah energi kinetik yang dihasilkan oleh gas buang dari ruang bakar menjadi energi mekanik. Pada turbin terdapat bilah-bilah besi yang dapat menerima gas buang sehingga turbin dapat berputar.<sup>1</sup>



Gambar 2.6 Turbin

## 2.2 Generator

### 2.2.1 Generator Sinkron

Generator sinkron (sering disebut alternator) adalah mesin listrik arus bolak balik yang menghasilkan tegangan dan arus bolak balik (alternating current, AC) yang bekerja dengan cara merubah energi mekanik (gerak) menjadi energi listrik dengan adanya induksi medan magnet. Perubahan energi ini terjadi karena adanya pergerakan relatif antara medan magnet dengan kumparan generator. Pergerakan

<sup>1</sup> Yuniarti Phil Nurhening (2019) Pembangkit Tenaga Listrik, Yogyakarta, Hlm 101-104



relatif adalah terjadinya perubahan medan magnet pada kumparan jangkar (tempat terbangkitnya tegangan pada generator) karena pergerakan medan magnet terhadap kumparan jangkar atau sebaliknya. Alternator ini disebut generator sinkron (sinkron = serempak) karena kecepatan perputaran medan magnet yang terjadi sama dengan kecepatan perputaran rotor generator. Alternator ini menghasilkan energi listrik bolak balik (alternating current, AC) dan biasa diproduksi untuk menghasilkan listrik AC 1-fasa atau 3-fasa.

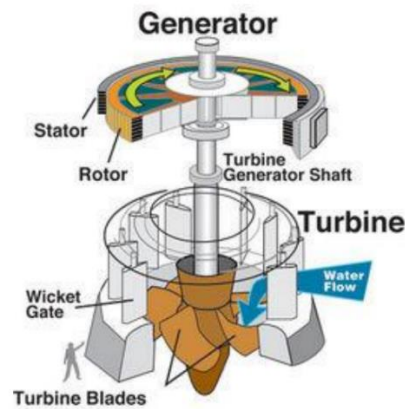
### 2.2.2 Generator Sinkron Sebagai Pembangkit Energi Listrik

Generator sinkron banyak digunakan sebagai pembangkit energi listrik berkapasitor besar, seperti yang diterapkan pada PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air), PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap), PLTG (Pembangkit Listrik Tenaga Gas), PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir), dan pembangkit listrik lainnya.



Gambar 2.7 Generator PLTG

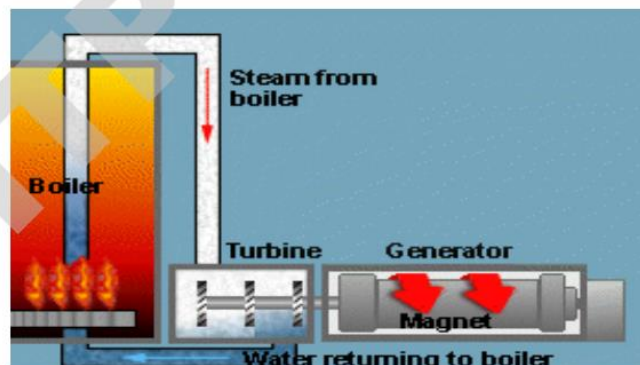
Generator sinkron banyak digunakan sebagai pembangkit energi listrik berkapasitor besar, seperti yang diterapkan pada PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air), PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap), PLTG (Pembangkit Listrik Tenaga Gas), PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir), dan pembangkit listrik lainnya.



Gambar 2.7 Generator P PLTA

Pada PLTA, generator digerakkan oleh tenaga air. Air ini ditampung pada sebuah dam dan dialirkan melalui pipa ke turbin generator untuk memutar turbin tersebut, sehingga rotor generator berputar. Akibat perputaran rotor pada generator ini, maka timbul tegangan pada kumparan jangkar generator. Bentuk gambaran tempat penggunaan generator pada PLTA ini diperlihatkan pada gambar 2.8 tersebut.

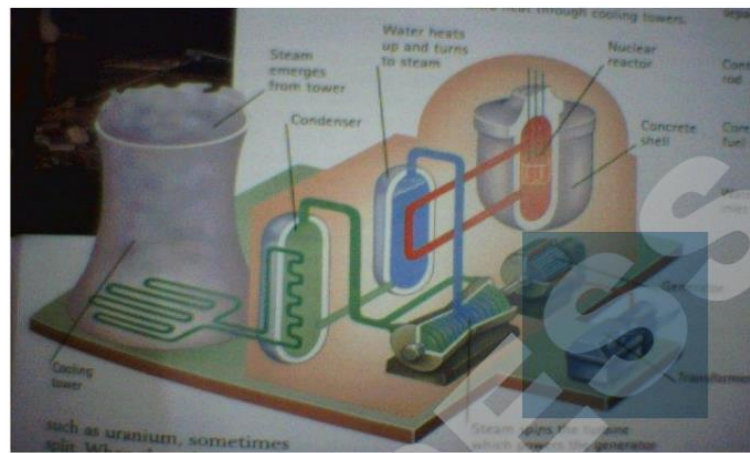
Pada PLTU, generator digerakkan oleh tenaga uap air yang dipanaskan dengan bahan bakar batu bara. Uap air yang dihasilkan dialirkan dengan tekanan yang tinggi untuk memutar turbin generator. Bentuk gambaran penggunaan generator pada PLTU ini diperlihatkan pada gambar 2.9.



Gambar 2.8 Penggunaan generator pada PLTU



Pada PLTN, zat radioaktif (bahan nuklir) digunakan sebagai bahan bakar untuk menghasilkan energi panas yang besar. Reaksi nuklir yang terjadi pada PLTN dikontrol oleh bahan moderator (air biasa, air berat atau grafit) sehingga proses pelepasan energi karena reaksi nuklir dapat dikendalikan. Energi panas yang dihasilkan oleh reaksi nuklir ini digunakan untuk memanaskan air. Uap air bertekanan tinggi yang dihasilkan karena proses pemanasan ini dialirkan untuk memutar turbin generator. Karena energi yang dihasilkan oleh reaksi nuklir ini sangat besar, maka pada PLTN ini dapat digunakan generator berkapasitas besar untuk membakitkan energi listrik. Bentuk gambaran PLTN diperlihatkan pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Penggunaan generator pada PLTN

Pada pembangkit listrik tenaga angin, kincir angin dihubungkan ke turbin generator. Ketika kincir berputar ditiup angin, turbin juga ikut berputar dan menggerakkan rotor generator, sehingga menghasilkan energi listrik pada kumparan jangkar generator. Bentuk gambaran penggunaan kincir angin sebagai pembangkit energi listrik diperlihatkan pada gambar dibawah.<sup>2</sup>

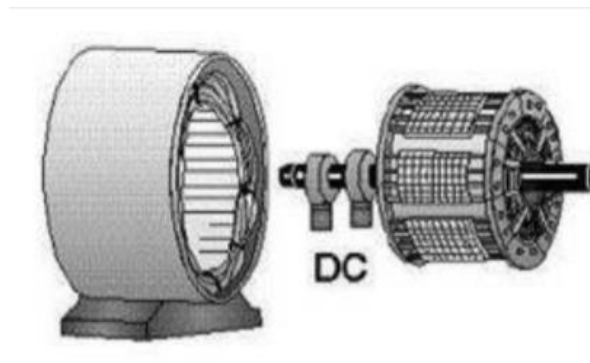
<sup>2</sup> Anthony Zuriman (2018) Mesin Listrik Dasar, Padang Hlm 6-8



Gambar 2.10 Penggunaan kincir angin sebagai pembangkit energi listrik

### 2.2.3 Konstruksi Generator Sinkron

Generator ini mempunyai dua komponen utama yaitu stator (bagian yang diam) dan rotor (bagian yang bergerak). Bentuk gambaran sederhana konstruksi generator sinkron diperlihatkan pada gambar dibawah.

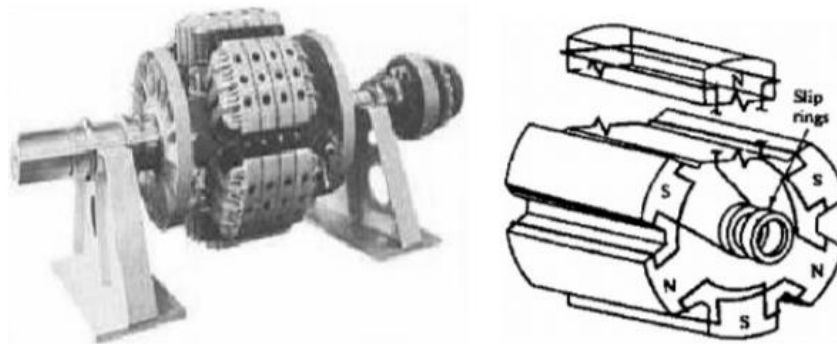


Gambar 2.11 Bentuk sederhana konstruksi generator sinkron

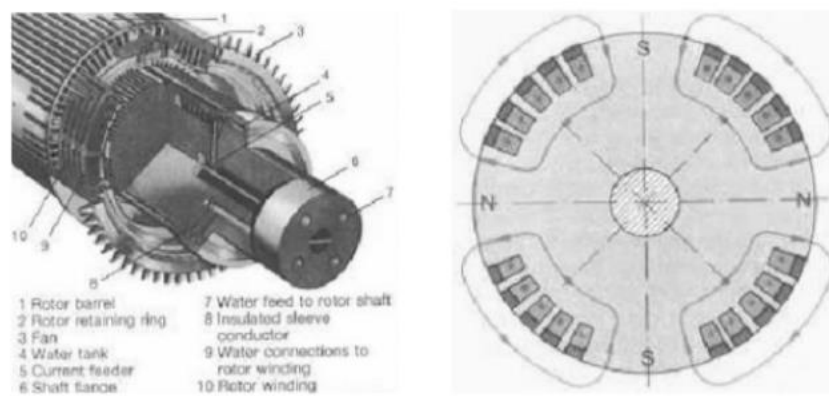




Gambar 2.12 Bentuk konstruksi stator pada generator sinkron



Gambar 2.13 Rotor salient (kutub menonjol) pada generator sinkron



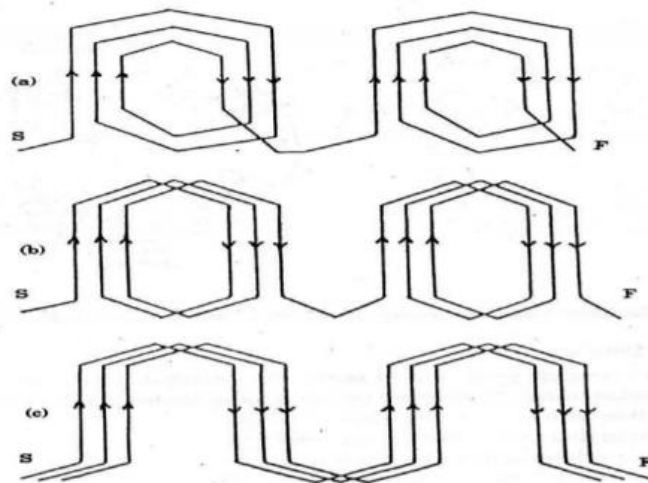
Gambar 2.14 Rotor silindris (silinder) dan Penampang rotor kutub silindris



Dengan memperhatikan gambar pada halaman sebelumnya, maka konstruksi stator ini terdiri dari :

1. Kerangka atau gandar dari besi tuang untuk menyangga inti jagkar.
2. Inti jagkar dari besi lunak / baja silicon,
3. Alur / parit / slot dan gigi tempat meletakkan belitan (kumparan) bentuk alur ada yang terbuka, setengah tertutup dan tertutup
4. Belitan jagkar terbuat dari tembaga, yang diletakan pada alur.

Gambaran bentuk lilitan stator dalam membentuk kutup magnet pada stator untuk menyesuaikan dengan kutup magnet rotor diperlihatkan pada gambar dibawah.



Gambar 2.15 Rangkaian belitan jangkar di stator generator sinkron

Kumparan jangkar yang ada di stator biasanya disebut belitan stator atau kumparan stator. Untuk generator 3-fasa biasanya kumparan dapat dirangkai dalam 2 jenis sebagai berikut :

1. Belitan satu lapis (single layer winding), dengan 2 macam bentuk, yaitu:
  - a. Mata rantai (cocertis or chain winding)
  - b. Gelombang (wawe)
2. Belitan dua lapis (double layer winding), dengan 2 macam bentuk pula, yaitu:
  - a. Jenis Gelombang (wawe)
  - b. Jenis gelung (lap)



Pada generator sinkron yang berkapasitas besar, arus DC diberikan pada lilitan rotor untuk menghasilkan medan magnet rotor, sedangkan kumparan jangkar tempat terbangkitnya tegangan terletak di stator. Rotor ini diputar oleh prime mover (penggerak mula) agar terjadi perpotongan medan magnet yang berubah-ubah pada kumparan jangkar di stator. Dengan adanya perpotongan medan magnet yang berubah-ubah ini, maka timbul tegangan induksi pada kumparan jangkar generator.

Ada 2 jenis bentuk kutub magnet generator sinkron pada rotornya yang dapat dijabarkan sebagai berikut.

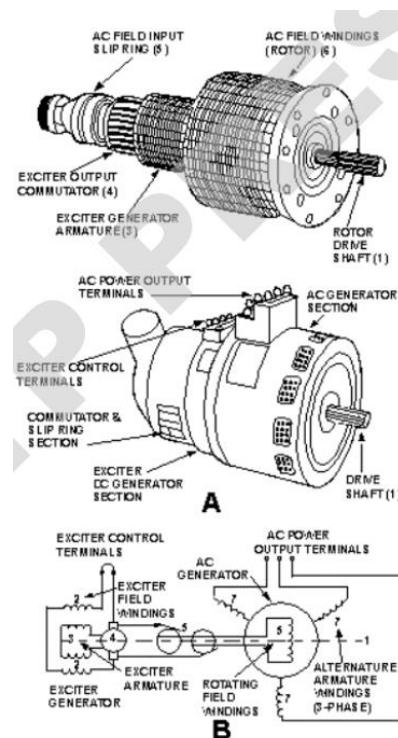
1. Rotor kutub sepatu atau menonjol *salient*. Kutub menonjol terdiri dari inti kutub, badan kutub dan sepatu kutub. Kumparan medan dililitkan pada badan kutub. Pada sepatu kutub juga dipasang kumparan peredam *damp winding*. Kumparan kutub dari tembaga, badan kutub dan sepatu kutub dari besi lunak.
2. Rotor kutub silindris *non salient*. Kutub ini terdiri dari alur-alur dan gigi yang dipasang untuk menempatkan kumparan medan.

Pemilihan konstruksi rotor tergantung dari kecepatan putar penggerak mula, frekuensi dan rating daya generator. Pada kutub sepatu (*salient*), kutub magnet menonjol keluar dari permukaan rotor. Rotor kutub sepatu ini biasanya digunakan untuk rotor dengan empat atau lebih kutub. Karena kutub rotornya banyak, maka biasanya rotor ini digerakkan dengan kecepatan yang rendah.

Pada kutub silindris (*non salient*), konstruksi kutub magnet rata dengan permukaan rotor yang membentuk seperti silinder. Rotor silinder ini umumnya digunakan untuk rotor dua kutub dan empat kutub. Rotor ini biasanya digerakkan dengan kecepatan tinggi sehingga generator yang menggunakan kutub ini biasanya disebut juga dengan turbo generator. Generator dengan kecepatan 1500 rpm ke atas pada frekuensi 50 Hz dengan rating daya sekitar 10 MVA biasanya menggunakan rotor silinder. Sementara untuk daya dibawah 10 MVA dan kecepatan rendah maka



digunakan rotor kutub sepatu. Generator-generator ini biasanya membentuk medan magnet dengan bantuan kumparan yang dililitkan pada rotornya, kemudian kumparan ini diberi sumber DC dengan sistem pengaturan yang baik sehingga besar arus yang melewati kumparan dapat diatur untuk mengatur kuat medan yang akan dihasilkan rotor. Bentuk konstruksi generator kutup silindris lengkap dengan sistem pemasukan arus medannya diperlihatkan pada gambar dibawah.



Gambar 2.16 Konstruksi generator kutup silindris dengan sistem pemasukan arus medannya.

Ada 2 cara pemasukan Arus DC (sebagai arus medan) ke rangkaian medan rotor untuk membentuk medan magnet pada kumparan rotor, yaitu:

1. Menyuplai daya DC ke rangkaian rotor dari sumber DC eksternal (biasanya berupa batere dari luar) dengan sarana slip ring dan sikat. Bila generator ini hanya menerima sumber DC dari luar untuk start awal saja, maka sumber DC sebagai penguat kumparan medan selanjutnya diambil dari keluaran generator itu sendiri (setelah sumber dari batere dilepas) dengan cara



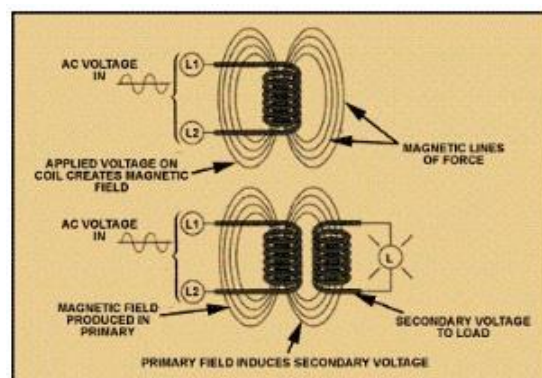
merubah keluaran AC generator ini menjadi DC (disearahkan sebelum dimasukkan ke kumparan medan pada rotor).

2. Menyuplai daya DC dari sumber DC khusus yang ditempelkan langsung pada batang rotor generator sinkron. Sumber DC ini biasanya dari generator DC yang ditempel pada rotor generator sinkron.<sup>3</sup>

## 2.3 Transformator<sup>4</sup>

### 2.3.1 Pengertian dan Fungsi

Trafo merupakan peralatan statis dimana rangkaian magnetik dan belitan yang terdiri dari 2 atau lebih belitan, secara induksi elektromagnetik, mentransformasikan daya (arus dan tegangan) sistem AC ke sistem arus dan tegangan lain pada frekuensi yang sama (IEC 60076 -1 tahun 2011). Trafo menggunakan prinsip elektromagnetik yaitu hukum ampere dan induksi faraday, dimana perubahan arus atau medan listrik dapat membangkitkan medan magnet dan perubahan medan magnet / fluks medan magnet dapat membangkitkan tegangan induksi.



Gambar 2.17 Prinsip hukum elektromagnetik

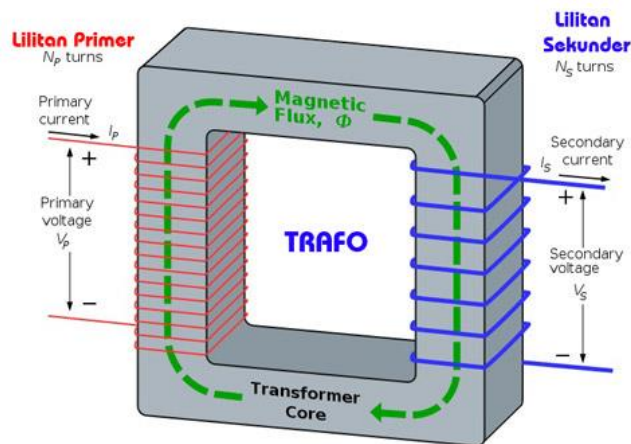
Arus AC yang mengalir pada belitan primer membangkitkan flux magnet yang mengalir melalui inti besi yang terdapat diantara dua belitan, flux magnet

<sup>3</sup> Anthony Zuriman (2018) Mesin Listrik Dasar, Padang Hlm 2-6

<sup>4</sup> PT PLN Persero (2010), *Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga*, Jakarta, Hlm 1-11



tersebut menginduksi belitan sekunder sehingga pada ujung belitan sekunder akan terdapat beda potensial / tegangan induksi.



Gambar 2.18 Elektromagnetik pada trafo

### 2.3.2 Jenis Trafo

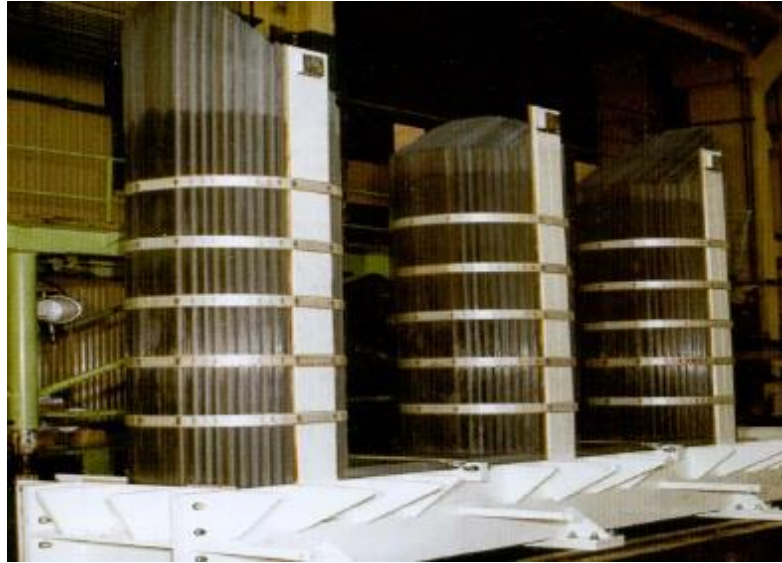
Berdasarkan fungsinya trafo tenaga dapat dibedakan menjadi:

- Trafo pembangkit
- Trafo gardu induk / penyaluran
- Trafo distribusi

### 2.3.3 Bagian-bagian Trafo dan Fungsinya

#### a. Electromagnetic Circuit (Inti besi)

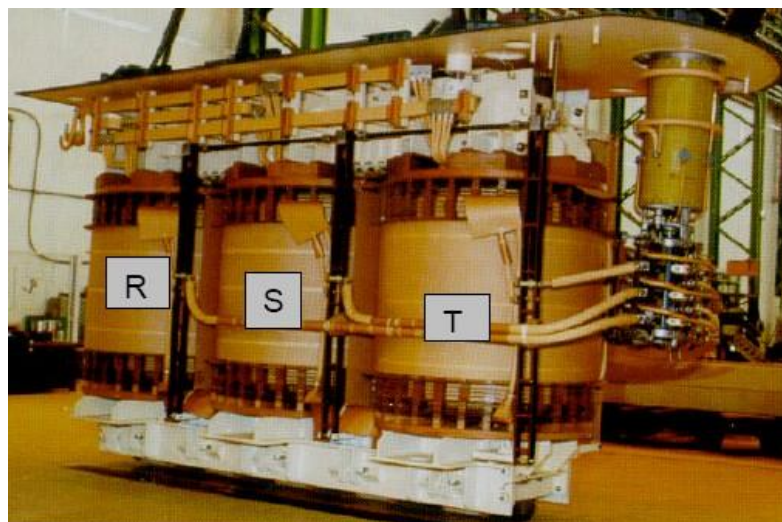
Inti besi digunakan sebagai media mengalirnya flux yang timbul akibat induksi arus bolak balik pada kumparan yang mengelilingi inti besi sehingga dapat menginduksi kembali ke kumparan yang lain. Dibentuk dari lempengan – lempengan besi tipis berisolasi dengan maksud untuk mengurangi eddy current yang merupakan arus sirkulasi pada inti besi hasil induksi medan magnet, dimana arus tersebut akan mengakibatkan rugi - rugi (losses).



Gambar 2.19 Inti besi

**b. 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 2.20 Belitan trafo



### c. 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 trafo.



Gambar 2.21 Bushing

### d. Isolasi

Berdasarkan media isolasi bushing terbagi menjadi dua (IEC 60137 tahun 2008) yaitu:

#### a. Bushing kondenser

Bushing kondenser umumnya dipakai pada tegangan rating bushing 72,5 kV ke atas. Bushing kondenser terdapat tiga jenis media isolasi (IEC 60137 tahun 2008) yaitu:

- Resin Bonded Paper (RBP)

Bushing tipe RBP adalah teknologi bushing kondenser yang pertama dan sudah mulai ditinggalkan





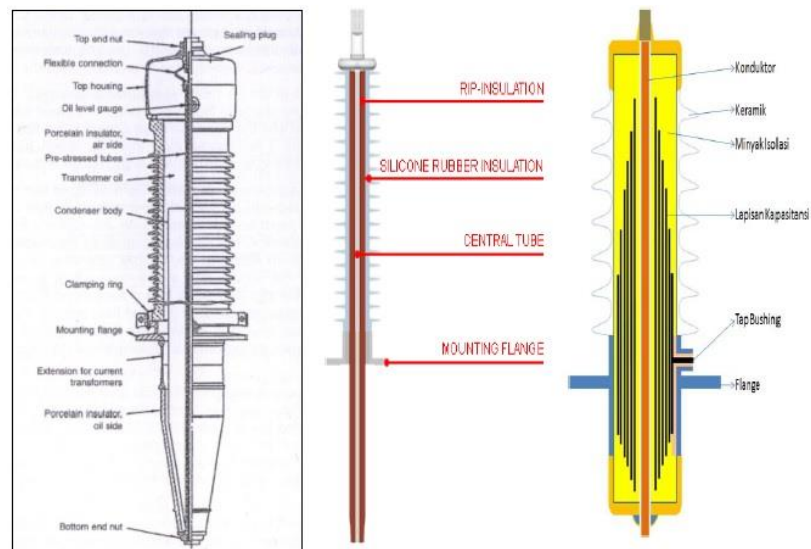
- Oil Impregnated Paper (OIP)

Pada tipe OIP isolasi yang digunakan adalah kertas dan minyak yang merendam kertas isolasi

- Resin Impregnated Paper (RIP)

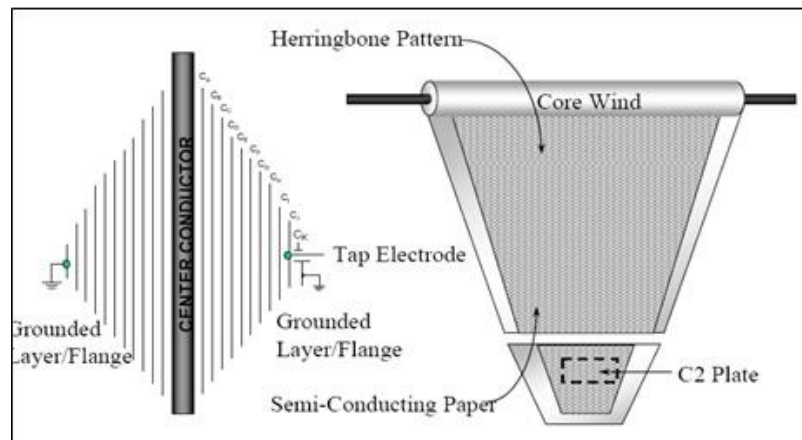
Pada tipe RIP isolasi yang digunakan adalah kertas isolasi dan resin.

Di dalam bushing kondenser terdapat banyak lapisan kapasitansi yang disusun secara seri sebagai pembagi tegangan. Pada bushing terdapat dua kapasitansi utama yang biasa disebut C1 dan C2. C1 adalah kapasitansi antara konduktor dengan tap bushing, dan C2 adalah kapasitansi dari tap bushing ke ground (flange bushing). Dalam kondisi operasi tap bushing dihubungkan ke ground, sehingga C2 tidak ada nilainya ketika bushing operasi.

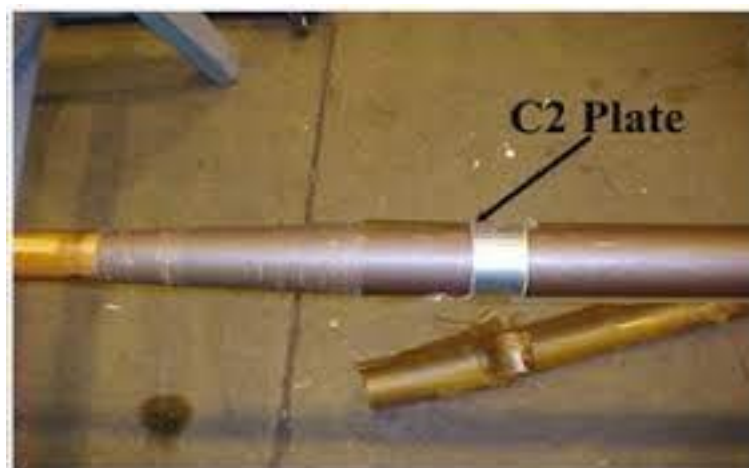


Bagian – bagian dari bushing

Gambar 2.22 Bagian-Bagian Bushing



Gambar 2.23 Kertas isolasi pada bushing (oil impregnated paper bushing)



Gambar 2.24 Konduktor bushing dilapisi kertas isolasi

b. Bushing non-kondenser

Bushing non kondenser umumnya digunakan pada tegangan rating 72,5 kV ke bawah. Media isolasi utama bushing non-kondenser adalah isolasi padat seperti porcelain atau keramik.



- **Konduktor**

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

- **Klem Koneksi**

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

- **Asesoris**

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



Gambar 2.25 Indikator level minyak bushing



Gambar 2.26 Gasket/seal antara flage bushing dengan body trafo



#### **e. Pendingin**

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

Minyak isolasi trafo 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.

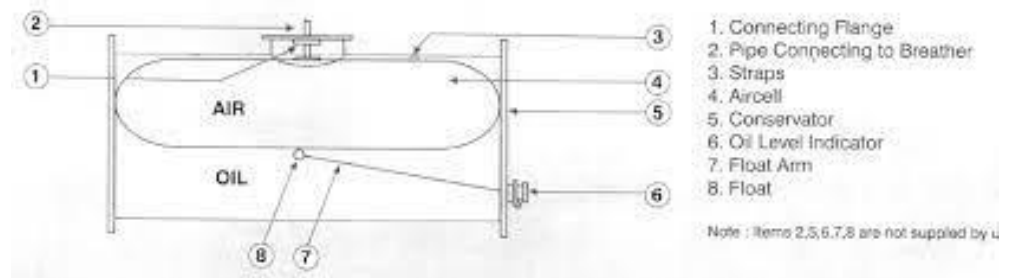
#### **f. Oil Preservation & Expansion (Konservator)**

Saat terjadi kenaikan suhu operasi pada trafo, 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 trafo mengalami kenaikan suhu.

Seiring dengan naik turunnya volume minyak di konservator akibat pemuaian dan penyusutan minyak, volume udara di dalam konservator pun akan bertambah dan berkurang. Penambahan atau pembuangan udara di dalam konservator akan berhubungan dengan udara luar. Agar minyak isolasi trafo tidak terkontaminasi oleh kelembaban dan oksigen dari luar (untuk tipe konservator tanpa rubber bag), maka udara yang akan masuk kedalam konservator akan difilter melalui silicagel sehingga kandungan uap air dapat diminimalkan. Untuk menghindari agar minyak trafo tidak berhubungan langsung dengan udara luar, maka saat ini konservator dirancang dengan menggunakan breather bag/ rubber bag, yaitu sejenis balon karet yang dipasang di dalam tangki konservator.



Gambar 2.27 Gasket/seal antara flage bushing dengan body  
Konservator



Gambar 2.28 Konstruksi konservator dengan rubber bag



Gambar 2.29 Silica gel



Silicagel sendiri memiliki batasan kemampuan untuk menyerap kandungan uap air sehingga pada periode tertentu silicagel tersebut harus dipanaskan bahkan perlu dilakukan penggantian. Dehydrating Breather merupakan teknologi yang berfungsi untuk mempermudah pemeliharaan silicagel, dimana terdapat pemanasan otomatis ketika silicagel mencapai kejenuhan tertentu.

## **2.4 Sistem Proteksi**

### **2.4.1 Sistem Proteksi Tenaga Listrik**

Sistem proteksi adalah suatu sistem pengamanan terhadap peralatan listrik, yang diakibatkan adanya gangguan teknis, gangguan alam, kesalahan operasi, dan penyebab yang lainnya. Proteksi sistem tenaga listrik adalah sistem proteksi yang dipasang pada peralatan-peralatan listrik suatu sistem tenaga listrik, misalnya generator, transformator, jaringan dan lain-lain, terhadap kondisi abnormal operasi sistem itu sendiri. Kondisi abnormal itu dapat berupa antara lain: hubung singkat, tegangan lebih, beban lebih, frekuensi sistem rendah, asinkron dan lain-lain. Keandalan dan kemampuan suatu sistem tenaga listrik dalam melayani konsumen sangat tergantung pada sistem proteksi yang digunakan. Oleh sebab itu dalam perancangan suatu sistem tenaga listrik, perlu dipertimbangkan kondisi-kondisi gangguan yang mungkin terjadi pada sistem, melalui analisa gangguan. Dari hasil analisa gangguan, dapat ditentukan sistem proteksi yang akan digunakan, seperti: spesifikasi switchgear, rating circuit breaker (CB) serta penetapan besaran-besaran yang menentukan bekerjanya suatu relay (setting relay) untuk keperluan proteksi.

Suatu sistem tenaga listrik terdiri dari rangkaian peralatan yang sangat memungkinkan untuk mengalami gangguan, baik sebagai akibat dari faktor luar maupun dari kerusakan peralatan itu sendiri. Untuk itulah diperlukan sistem proteksi yang pada prinsipnya bertugas sebagai berikut :

- a. Mendeteksi gangguan yang terjadi dengan cara mengenali gejala gangguan yang dapat berupa perubahan besaran tegangan, arus, sudut fasa maupun frekuensi.



- b. Membebaskan (memisahkan) bagian sistem yang terganggu dari sistem yang tidak terganggu.

Sistem proteksi tidak bisa menghilangkan datangnya gangguan, namun dengan adanya sistem proteksi yang bekerja dengan baik maka beberapa kerugian dan kemungkinan timbulnya bahaya atau kerusakan dapat dihindarkan. Berikut ini adalah beberapa manfaat dari adanya sistem proteksi :

- a. Mencegah kerusakan lebih jauh dari peralatan yang terganggu. Peralatan yang terganggu tentu telah mengalami kelainan atau kerusakan awal. Apabila peralatan tersebut tidak dibebaskan dari tegangan tentu kerusakan akan menjadi semakin besar.
- b. Mencegah bahaya terhadap manusia dan properti. Gangguan hubung singkat yang melalui peralatan atau properti (misal rumah, pohon) tentu akan membahayakan kalau tidak segera dibebaskan dari tegangan, karena semua benda yang bersentuhan dengan sistem akan mempunyai tegangan sentuh yang membahayakan bagi manusia.
- c. Mencegah meluasnya pemadaman atau gangguan. Bila gangguan yang terjadi pada suatu tempat tidak segera dipisahkan, maka gejala gangguan akan dirasakan oleh seluruh atau sebagian besar sistem sehingga bisa menimbulkan gangguan yang meluas atau bahkan bisa mengakibatkan pemadaman total (black out).
- d. Mengurangi stress pada peralatan yang tidak terganggu. Gejala gangguan yang terjadi pada suatu tempat akan dirasakan oleh peralatan yang tidak terganggu disekelilingnya. Misalnya gangguan hubung singkat maka akan mengalirkan arus yang sangat besar yang melewati komponen sistem (peralatan) disekitarnya dan ini menimbulkan stress pada peralatan tersebut yang pada akhirnya bisa mengurangi umur (life time) peralatan.



Pemilik sistem tenaga listrik tentu berharap setiap saat proteksi yang terpasang bisa bekerja normal sesuai yang diharapkan. Namun demikian perlu dimaklumi bahwa proteksi itu sendiri merupakan rangkaian dari beberapa peralatan yang masing-masing mempunyai kemungkinan rusak atau gagal beroperasi. Semakin besar harapan yang diminta akan semakin besar pula sumber daya yang harus diberikan pada sistem proteksi. Untuk itu diperlukan keputusan yang logis, yang mempertimbangkan keseimbangan antara tingkat keperluan dan biaya yang harus dikeluarkan. Sebagai contoh kompleksitas proteksi pada sistem tegangan menengah tentu tidak perlu sama dengan proteksi pada sistem tegangan tinggi<sup>5</sup>.

#### **2.4.2 Tujuan Sistem Proteksi Tenaga Listrik**

Tujuan dari sistem proteksi adalah sebagai berikut:

- a. Mengurangi kerusakan peralatan yang terganggu, maupun peralatan yang dilewati oleh arus gangguan
- b. Mengisolir bagian sistem yang terganggu sekecil mungkin dan secepat mungkin
- c. Mencegah meluasnya gangguan.

#### **2.4.3 Fungsi Sistem Proteksi Tenaga Listrik**

Fungsi dari sistem proteksi adalah sebagai berikut:

- a. Untuk menghindari atau mengurangi kerusakan peralatan listrik akibat adanya gangguan (kondisi abnormal). Semakin cepat reaksi perangkat proteksi yang digunakan, maka akan semakin sedikitlah pengaruh gangguan terhadap kemungkinan kerusakan alat.
- b. Untuk mempercepat melokalisasi luas/zone daerah yang terganggu, sehingga daerah yang terganggu menjadi sekecil mungkin.
- c. Untuk dapat memberikan pelayanan listrik dengan keandalan yang tinggi kepada konsumen, dan juga mutu listriknya baik.

---

<sup>5</sup> Sugiarto dkk (2007), , *PENGENALAN PROTEKSI SISTEM TENAGA LISTRIK*, Semarang, Hal 1-2





- d. Untuk mengamankan manusia (terutama) terhadap bahaya yang ditimbulkan oleh listrik.

#### 2.4.4 Syarat-syarat Sistem Proteksi

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

- a. Kepekaan (*sensitifitas*)

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

- b. Kecepatan

Sistem proteksi perlu memiliki tingkat kecepatan sebagaimana ditentukan sehingga meningkatkan mutu pelayanan, keamanan manusia, peralatan dan stabilitas operasi. Mengingat suatu sistem tenaga mempunyai batas-batas stabilitas serta kadang-kadang gangguan sistem bersifat sementara, maka rele yang semestinya bereaksi dengan cepat kerjanya perlu diperlambat (*time delay*).

- c. Selektifitas

Selektif berarti suatu sistem proteksi harus dapat memilih bagian sistem yang harus diisolir apabila rele proteksi mendeteksi gangguan. Bagian yang dipisahkan dari sistem yang sehat sebisanya adalah bagian yang terganggu saja. Diskriminatif berarti suatu sistem proteksi harus mampu membedakan antara kondisi normal dan kondisi abnormal. Ataupun membedakan apakah kondisi abnormal tersebut terjadi di dalam atau di luar daerah proteksinya. Dengan demikian, segala tindakannya akan tepat dan akibatnya gangguan dapat dieliminir menjadi sekecil mungkin.

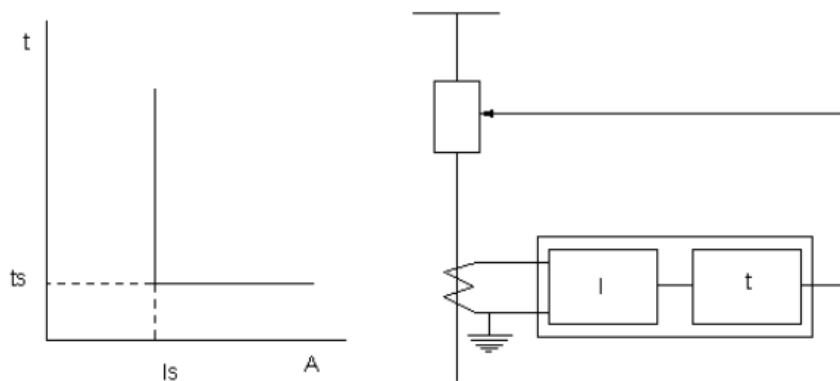


#### **2.4.5 Relai Arus Lebih Definite**

Karakteristik waktu kerja tetap (definite time) yang setelahnya memang boleh dikatakan tidak terlalu memerlukan hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat, sehingga dirasakan mudah dalam menyusun nilai setelan koordinasi relai dari jenis karakteristik ini, tetapi dalam operasinya, perusahaan listrik sering mengalami kesulitan akibat komulasi waktu kerja relai disisi hulunya yang berdampak kerusakan berat pada peralatan instalasi disisi hulu yaitu trafo tenaga (di Gardu Induk untuk sistem besar) atau mesin penggerak (PLTD di sistem kecil).

Untuk memberi gambaran yang lebih meyakinkan akan perlunya penguasaan cara berhitung arus gangguan hubung singkat untuk keperluan koordinasi proteksi arus lebih, berikut ini diuraikan bagaimana mudahnya mengkoordinasi relai arus lebih dari jenis definite dan bagaimana dampak kesulitan yang dihadapi setelah penerapan relay jenis ini di dalam sistem.

Jadi dengan menggunakan relay arus lebih dari jenis karakteristik Definite Time sebagai proteksi jaringan distribusi primer, cara menghitung koordinasinya memang mudah dilakukan, cukup dengan menyetel arusnya diatas nilai arus beban kemudian menyusun setelan koordinasi waktu kerjanya seperti dicontohkan diatas, selesai sudah pekerjaan ini, tetapi dampak dari hasil koordinasinya adalah berupa kemungkinan besar terjadi kerusakan parah diperalatan instalasi baik di titik gangguan maupun disisi pemasok (Trafo Tenaga atau mesin PLTD). Bila memang terjadi kerusakan disisi hulu tersebut, maka pemadaman yang terjadi akan lebih lama.



Gambar 2.30 kurva relay karakteristik definite

Keterangan :

Is: I setting

ts: waktu setting

t : waktu

Relay ini akan memberikan perintah pada PMT pada saat terjadi gangguan bila besar arus gangguannya melampaui penyetelannya ( $I_s$ ), dan jangka waktu kerja relai mulai pick up sampai kerja relai diperpanjang dengan waktu tertentu tidak tergantung besarnya arus lihat gambar di atas.

Untuk relai arus lebih dari jenis karakteristik definite, penyetelan sensitivity arus berpegang kepada nilai arus beban yang mengalir di relai pada setiap seksinya, dengan maksud agar relai tidak boleh bekerja bila hanya dilewati arus beban, oleh sebab itu setelan arusnya diset diatas arus beban.

Sesuai British standard untuk:

♣ Kfk Relai Definite diset sebesar 1,2 s/d 1,3

selain bisa menggunakan arus beban dan juga arus hubung singkat pada sistem proteksi kita juga dapat juga menggunakan In trafo. Karena trafo merupakan salah satu instrument penting yang harus dilindungi agar pasokan listrik tetap terjaga keandalannya. Karena ketika terjadi arus gangguan hubung singkat tidak hanya titik gangguan yang rusak tetapi juga trafo tenaga menderita sewaktu dilalui oleh arus gangguan hubung singkat tersebut. Arus besar di belitan trafo menghasilkan gaya yang besar dan sampai menggerakkan konduktor belitan, bahkan kertas



pembungkus konduktor belitan bisa robek dan membuat gangguan baru di trafo tenaga berupa hubung singkat antar lilit. Menurut standard IEC 60076, trafo tenaga dengan kapasitas 60 MVA hanya mampu menahan arus gangguan hubung singkat yang terjadi di terminal Low Voltage (20 kV) sebesar 25 kA selama 2 detik. Tentunya, nilai diatas merupakan nilai untuk kondisi trafo tenaga yang baru diproduksi pabrik dan kondisi baik.

Berikut merupakan Perhitungan Inominal

$$I_n = \frac{\text{daya}}{\text{tegangan} \sqrt{3}} \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan:

$I_n$  = I nominal pada trafo

Daya = kapasitas daya

Tegangan = kapasitas tegangan

Berikut merupakan rumus Isetting over current relay kurva definite:

$$I_{set} = I_n \times K_{fk} \frac{1}{\text{Rasio CT}} \dots\dots\dots (2.2)$$

Berikut merupakan rumus Isetting ground fault relay kurva definite:

$$I_{set} = I_n \times K_{fk} \frac{1}{\text{Rasio CT}} \times 40\% \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan:

$I_{set}$  = Nilai setting arus

$I_n$  = I nominal

$K_{fk}$  = Faktor keamanan sebesar 1,2 s/d 1,3

## 2.5 Over Current Relay (OCR)

OCR Merupakan relay yang bekerja dengan input analog arus, dimana relai akan bekerja apabila mendeteksi gangguan diatas setingnya khususnya untuk gangguan fasa-fasa. OCR diseting lebih besar dari kemampuan arus nominal



peralatan terkecil (110%-120%) dan harus bekerja pada gangguan arus hubung singkat 2 fasa minimum.

Waktu kerja OCR penghantar diset +/- 1 (satu) detik pada arus hubung singkat 2 fasa maksimum di lokal bus. Relai ini digunakan untuk mendeteksi gangguan fasa – fasa, mempunyai karakteristik inverse (waktu kerja relai akan semakin cepat apabila arus gangguan yang dirasakannya semakin besar) atau definite (waktu kerja tetap untuk setiap besaran gangguan). Selain itu pada relai arus lebih tersedia fungsi high set yang bekerja seketika (moment/instantaneous).

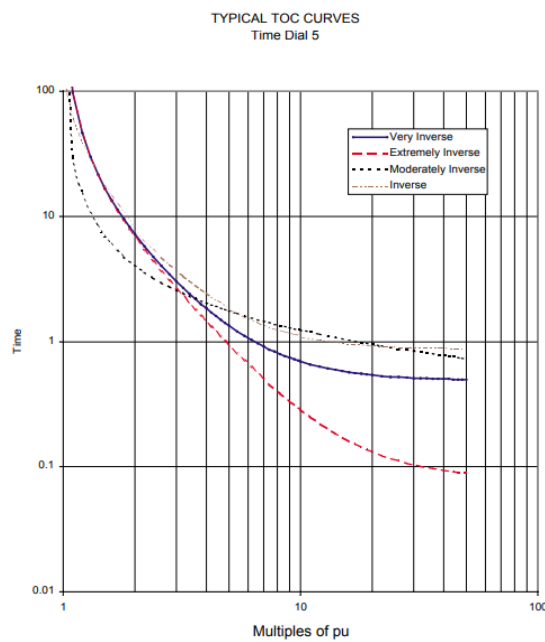
Untuk karakteristik inverse mengacu kepada standar IEC atau ANSI/IEEE. Relai ini digunakan sebagai proteksi cadangan karena tidak dapat menentukan titik gangguan secara tepat, dan juga ditujukan untuk keamanan peralatan apabila proteksi utama gagal bekerja. Agar dapat dikoordinasikan dengan baik terhadap relai arus lebih disisi yang lain (bukan relai arus lebih yang terpasang di penghantar), maka karakteristik untuk proteksi penghantar yang dipilih adalah kurva yang sama yaitu standard inverse (IEC) / normal inverse (ANSI/IEEE). Untuk selektifitas dengan proteksi utama fungsi high set tidak diaktifkan.<sup>6</sup>

### 2.5.1 Skema Over Current Relay

Arus fasa atau arus urutan dapat digunakan sebagai besaran operasi. Relai arus lebih fase beroperasi untuk semua kemungkinan jenis kesalahan, tetapi memerlukan pengaturan pengambilannya lebih tinggi dari beban normal atau kondisi emergency aliran beban. Relai arus lebih negatif dan urutan-nol tidak beroperasi untuk beban seimbang atau untuk gangguan tiga fase, tetapi dapat memiliki pengaturan pickup jauh di bawah beban yang diharapkan. Tripping mungkin terjadi *instantaneous*, *delay for a fixed time*, atau *delay for a inversely time proportional* untuk besaran arus . Gambar dibawah menunjukkan beberapa dari berbagai bentuk karakteristik waktu / arus yang dapat digunakan.

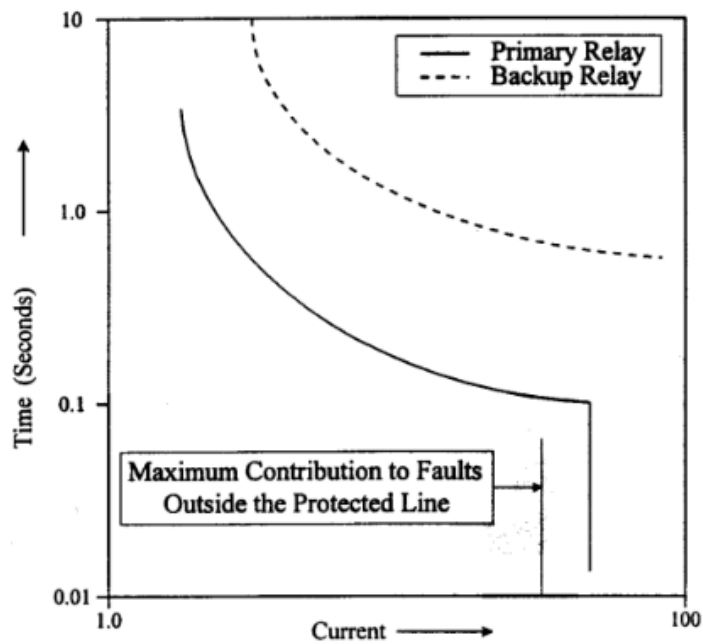
---

<sup>6</sup> Karyono dkk, (2013,) Jakarta *Pedoman dan Petunjuk Sistem Proteksi Transmisi dan Gardu Induk Jawa, Bail*. Hal 109-110



Gambar 2.31 Kurva bentuk perbandingan waktu overcurrent

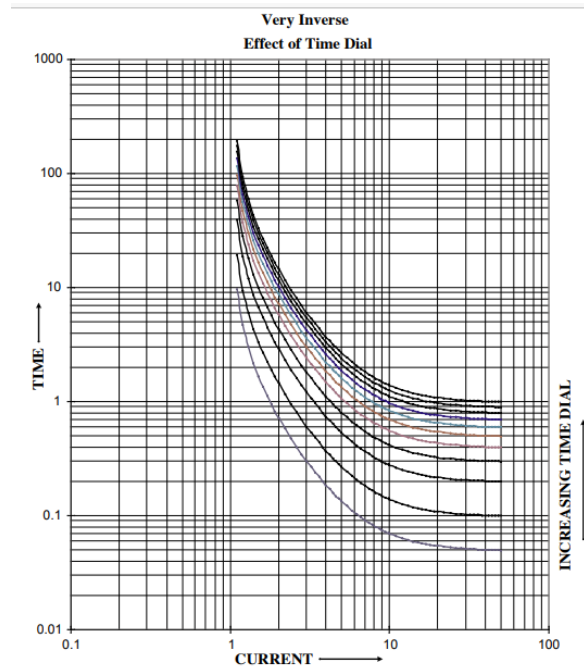
*Tripping instantaneous* dapat diterapkan jika titik pengambilan unit sesaat diatur lebih tinggi dari kontribusi maksimum untuk gangguan di luar fasa yang dilindungi. Persentase saluran yang dapat dilindungi oleh relai arus lebih sesaat akan bervariasi dengan panjang saluran dan impedansi sumber. Untuk melindungi seluruh jalur nonradial, penundaan waktu biasanya diperlukan untuk mencapai koordinasi dengan perangkat pelindung hilir. Gambar di bawah menunjukkan bagaimana koordinasi dicapai antara relai dengan elemen waktu dan sesaat (relai primer), dan upstream (relai cadangan) dengan hanya elemen waktu. Untuk memastikan koordinasi yang tepat, titik pengambilan unit sesaat harus diatur lebih tinggi dari kontribusi maksimum untuk gangguan di luar fasa yang dilindungi.



Gambar 2.32 Koordinasi Waktu Overcurrent Relay

Nilai *Pick up* dari elemen waktu harus diatur untuk mencegah trip untuk arus beban maksimum yang bisa mengalir pada salah satu arah pada fasa. Penyesuaian waktu (yaitu, dial) umumnya harus disetel untuk menghasilkan waktu pengoperasian tercepat yang tidak akan mengakibatkan kesalahan koordinasi dengan proteksi lain di belakang atau di depan terminal. Efek dari memvariasikan penyesuaian waktu diilustrasikan pada Gambar dibawah untuk relai arus lebih waktu yang khas.<sup>7</sup>

<sup>7</sup> IEEE Guide for Protective Relay Applications to Transmission Lines. 1999. IEEE-SA Standards Board



Gambar 2.33 Variasi Penyesuaian waktu pada Kurva Karakteristik Relay Arus  
Lebih karakteristik very inverse

## 2.6 Ground Fault Relay<sup>8</sup>

GFR merupakan relai yang bekerja dengan input analog arus, dimana relai akan bekerja apabila relai merasakan arus gangguan 1 fasa ke tanah di atas nilai settingnya. Adapun standar nilai setting GFR yaitu 40% dari nilai setting OCR. Untuk selektifitas dengan proteksi utama fungsi high set tidak diaktifkan. Relai arus gangguan tanah diset 10 – 40% dari kemampuan arus nominal peralatan yang terkecil, namun harus dipastikan bahwa setting arus relai masih tetap bekerja pada arus hubung singkat 1 fasa – tanah minimum. Waktu kerja relai arus gangguan tanah diset +/- 1 (satu) detik pada arus hubung singkat 1 fasa - tanah maksimum di lokal bus.

<sup>8</sup> Karyono dkk, (2013,) Jakarta *Pedoman dan Petunjuk Sistem Proteksi Transmisi dan Gardu Induk Jawa, Bail*. Hal 111





Ground Fault Relay (GFR) pada dasarnya mempunyai prinsip kerja yang sama dengan relai arus lebih (OCR) namun memiliki perbedaan dalam kegunaannya. GFR mendeteksi melalui binary input yang ada pada relai sehingga memerintahkan binary output agar memberikan perintah jika adanya hubungan singkat ke tanah.

Pada kondisi normal beban seimbang  $I_r$ ,  $I_s$ ,  $I_t$  sama besar, sehingga pada kawat netral tidak timbul arus dan relai hubung tanah tidak di aliri arus. Bila terjadi ketidakseimbangan arus atau terjadi gangguan hubung singkat ke tanah, maka akan timbul arus urutan nol pada kawat netral, sehingga relai hubung tanah akan bekerja.

<sup>9</sup>Ground Fault Relay lebih hanya akan merespon terhadap adanya arus residu sistem, karena komponen residual hanya muncul bilamana arus gangguan mengalir ketanah. Oleh karena itu Rele gangguan tanah tidak terpengaruh sama sekali terhadap arus beban, baik dalam kondisi seimbang maupun tidak dan dapat disetel yang hanya dibatasi oleh desain peralatan. Pernyataan ini hanya berlaku dengan syarat jika perhatian penyetelan hanya beberapa persen dari rating sistem, karena kebocoran tidak seimbang atau arus kapasitif menuju tanah mungkin menimbulkan besaran residu dalam orde ini. Secara keseluruhan, penyetelan rendah memungkinkan bagi Rele Gangguan Tanah menjadi sangat berguna, tidak hanya terhadap gangguan tanah, tetapi lebih jauh terhadap hampir semua gangguan, tetapi mungkin dibatasi magnitudnya oleh besarnya impedansi pentanahan atau oleh tahanan pentanahan.

---

<sup>9</sup> Hendra Marta Yudha, (2008) *Rele Proteksi- Prinsip dan Aplikasi*, Palembang, Hal 129