

## **BAB II**

### **GENERATOR**

#### **2.1. Generator Sinkron**

##### **2.1.1. Pengertian**

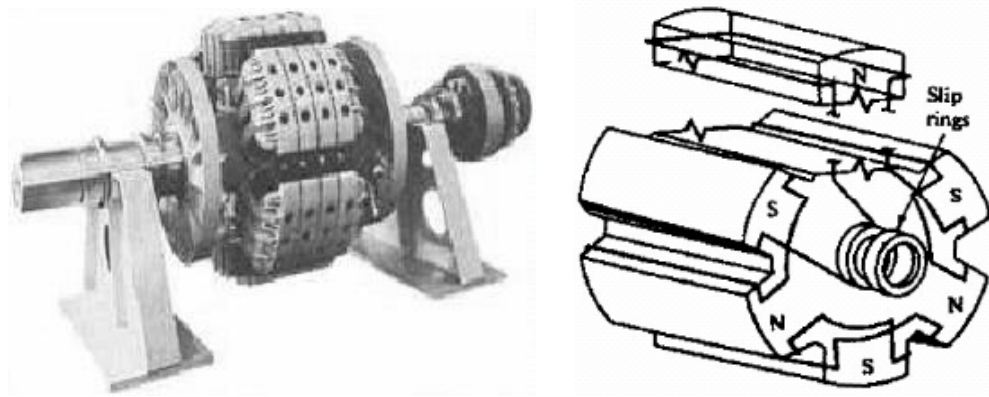
Generator adalah suatu alat yang dapat mengubah tenaga mekanik menjadi energi listrik. Tenaga mekanik bisa berasal dari panas, air, uap, dan lain-lainnya. Energi listrik yang dihasilkan oleh generator bisa berupa Listrik AC (listrik bolak-balik) maupun DC (listrik searah). Hal tersebut tergantung dari konstruksi generator yang dipakai oleh pembangkit tenaga listrik.

Generator berhubungan erat dengan hukum Faraday. Berikut hasil dari hukum Faraday “bahwa apabila sepotong kawat penghantar listrik berada dalam medan magnet berubah-ubah, maka dalam kawat tersebut akan terbentuk Gaya Gerak Listrik.

##### **2.1.2. Konstruksi Generator Sinkron**

Pada generator sinkron, arus DC diterapkan pada lilitan rotor untuk menghasilkan medan magnet rotor. Rotor generator diputar oleh prime mover menghasilkan medan magnet berputar pada mesin. Medan magnet putar ini menginduksi tegangan tiga fasa pada kumparan stator generator. Rotor pada generator sinkron pada dasarnya adalah sebuah elektromagnet yang besar.

Kutub medan magnet rotor dapat berupa salient (kutub sepatu) dan non salient (rotor silinder). Gambaran bentuk kutub sepatu generator sinkron diperlihatkan pada gambar di bawah ini.

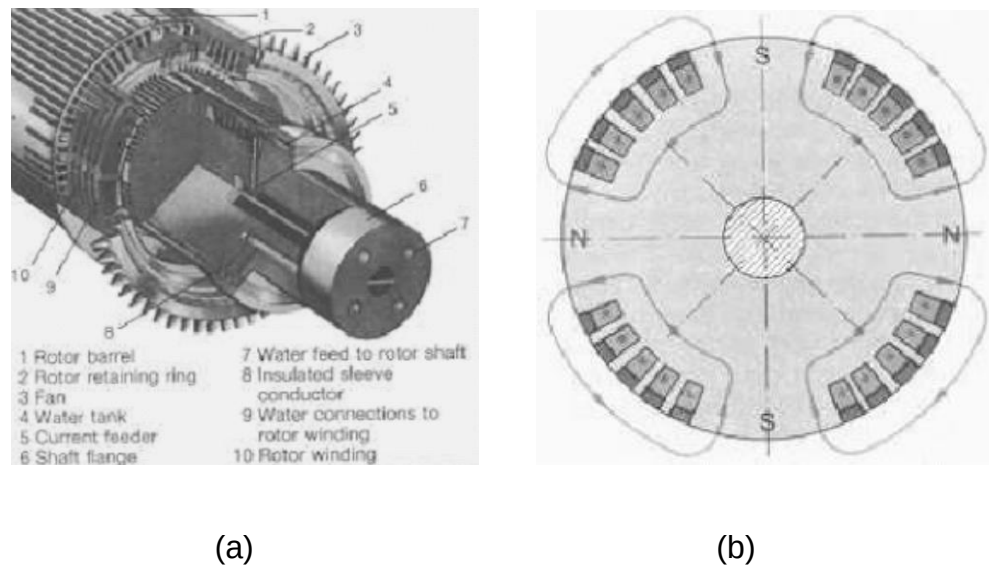


Gambar 2.1. Rotor salient pada generator sinkron

Pada kutub salient, kutub magnet menonjol keluar dari permukaan rotor sedangkan pada kutub non salient, konstruksi kutub magnet rata dengan permukaan rotor.

Rotor silinder umumnya digunakan untuk rotor dua kutub dan empat kutub, sedangkan rotor kutub sepatu digunakan untuk rotor dengan empat atau lebih kutub. Pemilihan konstruksi rotor tergantung dari kecepatan putar prime mover, frekuensi dan rating daya generator. Generator dengan kecepatan 1500 rpm ke atas pada frekuensi 50 Hz dan rating daya sekitar 10MVA menggunakan rotor silinder. Sementara untuk daya dibawah 10 MVA dan kecepatan rendah maka

digunakan rotor kutub sepatu. Gambaran bentuk kutup silinder generator sinkron diperlihatkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.2. (a) Rotor non-salient (rotor silinder), (b) Penampang rotor pada generator sinkron

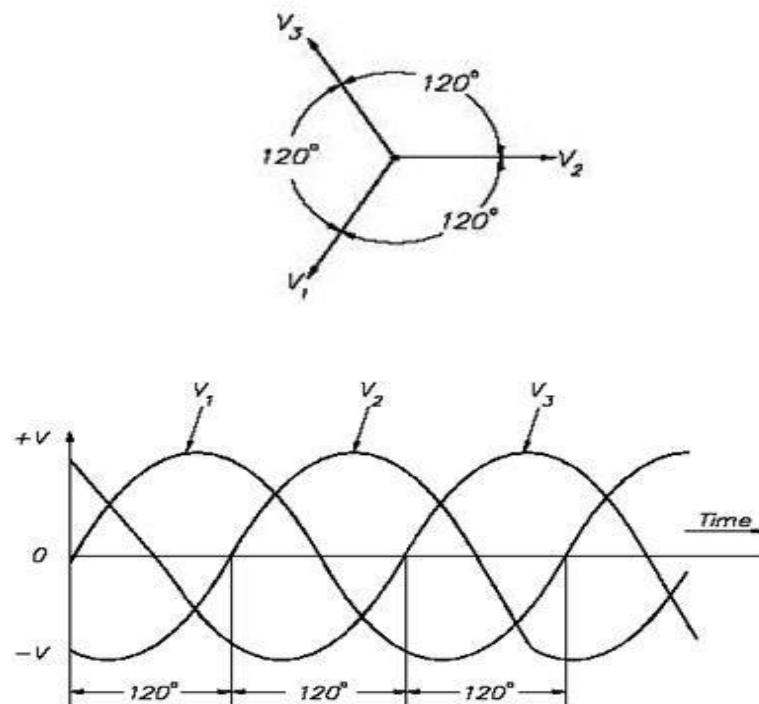
Arus DC disuplai ke rangkaian medan rotor dengan dua cara:

1. Menyuplai daya DC ke rangkaian dari sumber DC eksternal dengan sarana slip ring dan sikat.
2. Menyuplai daya DC dari sumber DC khusus yang ditempelkan langsung pada batang rotor generator sinkron.

### 2.1.3. Prinsip Kerja Generator Sinkron

Jika sebuah kumparan diputar pada kecepatan konstan pada medan magnet, maka akan terinduksi tegangan sinusoidal pada kumparan tersebut. Medan magnet bisa dihasilkan oleh kumparan yang dialiri arus DC atau oleh magnet tetap.

Pada mesin tipe ini medan magnet diletakkan pada stator (disebut generator kutub eksternal / external pole generator) yang mana energi listrik dibangkitkan pada kumparan rotor. Hal ini dapat menimbulkan kerusakan pada slip ring dan karbon sikat, sehingga menimbulkan permasalahan pada pembangkitan daya tinggi. Untuk mengatasi permasalahan ini, digunakan tipe generator dengan kutub internal (internal pole generator), yang mana medan magnet dibangkitkan oleh kutub rotor dan tegangan AC dibangkitkan pada rangkaian stator. Tegangan yang dihasilkan akan sinusoidal jika rapat fluks magnet pada celah udara terdistribusi sinusoidal dan rotor diputar pada kecepatan konstan. Tegangan AC tiga fasa dibangkitkan pada mesin sinkron kutub internal pada tiga kumparan stator yang diset sedemikian rupa sehingga membentuk beda fasa dengan sudut  $120^\circ$ . Bentuk gambaran sederhana hubungan kumparan 3-fasa dengan tegangan yang dibangkitkan diperlihatkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.3. Gambaran sederhana kumparan 3-fasa dan  
tegangan yang dibangkitkan

. Pada rotor kutub sepatu, fluks terdistribusi sinusoidal didapatkan dengan mendesain bentuk sepatu kutub. Sedangkan pada rotor silinder, kumparan rotor disusun secara khusus untuk mendapatkan fluks terdistribusi secara sinusoidal. Untuk tipe generator dengan kutub internal (internal pole generator), suplai DC yang dihubungkan ke kumparan rotor melalui slip ring dan sikat untuk menghasilkan medan magnet merupakan eksitasi daya rendah. Jika rotor menggunakan magnet permanen, maka tidak slip ring dan sikat karbon tidak begitu diperlukan.

#### 2.1.4. Kecepatan Putar Generator Sinkron

Frekuensi listrik yang dihasilkan generator sinkron adalah sinkron dengan kecepatan putar generator. Rotor generator sinkron terdiri atas rangkaian elektromagnet dengan suplai arus DC. Medan magnet rotor bergerak pada arah putaran rotor. Hubungan antara kecepatan putar medan magnet pada mesin dengan frekuensi elektrik pada stator adalah:

$$f_e = \frac{n_r \cdot p}{120} \dots\dots\dots(2.1)$$

yang mana:

$f_e$  = frekuensi listrik (Hz)

$n_r$  = kecepatan putar rotor = kecepatan medan magnet (rpm)

$p$  = jumlah kutub magnet

Oleh karena rotor berputar pada kecepatan yang sama dengan medan magnet, persamaan diatas juga menunjukkan hubungan antara kecepatan putar rotor dengan frekuensi listrik yang dihasilkan. Agar daya listrik dibangkitkan tetap pada frekuensi 50Hz atau 60 Hz, maka generator harus berputar pada kecepatan tetap dengan jumlah kutub mesin yang telah ditentukan. Sebagai contoh untuk membangkitkan 60 Hz pada mesin dua

kutub, rotor arus berputar dengan kecepatan 3600 rpm. Untuk membangkitkan 50 Hz pada mesin empat kutub, rotor harus berputar pada 1500 rpm.

### 2.1.5. Generator Tanpa Beban

Dengan memutar generator pada kecepatan sinkron dan rotor di beri arus medan (IF), maka tegangan ( $E_a$ ) akan terinduksi pada kumparan jangka stator. Bentuk hubungannya diperlihatkan pada persamaan berikut.

$$E_a = c.n.\phi \dots\dots\dots (2.2)$$

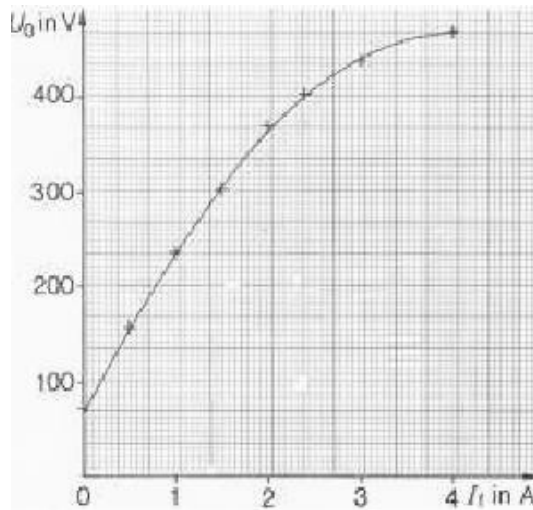
Dimana :

$c$  = Konstanta waktu

$n$  = putaran mesin sinkron

$\phi$  = Fluks yang dihasilkan oleh IF

Dalam keadaan tanpa beban arus jangkar tidak mengalir pada stator, karenanya tidak terdapat pengaruh reaksi jangkar. Fluks hanya dihasilkan oleh arus medan (IF). Apabila arus medan (IF) diubah-ubah harganya, akan diperoleh harga  $E_a$  seperti yang terlihat pada kurva sebagai berikut.



Gambar 2.4. Karakteristik generator sinkron tanpa beban

#### 2.1.6. Generator Berbeban

Dalam keadaan berbeban arus jangkar akan mengalir dan mengakibatkan terjadinya reaksi jangkar. Reaksi jangkar bersifat reaktif karena itu dinyatakan sebagai reaktansi, dan disebut reaktansi magnetisasi ( $X_m$ ). Reaktansi pemagnet ( $X_m$ ) ini bersama-sama dengan reaktansi fluks bocor ( $X_a$ ) dikenal sebagai reaktansi sinkron ( $X_s$ )

Persamaan tegangan pada generator adalah:

$$E_a = V + I.R_a + j I.X_s \dots\dots\dots(2.3)$$

$$X_s = X_m + X_a \dots\dots\dots(2.4)$$



Yang mana :

$E_a$  = tegangan induksi pada jangkar

$V$  = tegangan terminal output

$R_a$  = resistansi jangkar

$X_s$  = reaktansi sinkron

### **2.1.7. Kerja Paralel Generator**

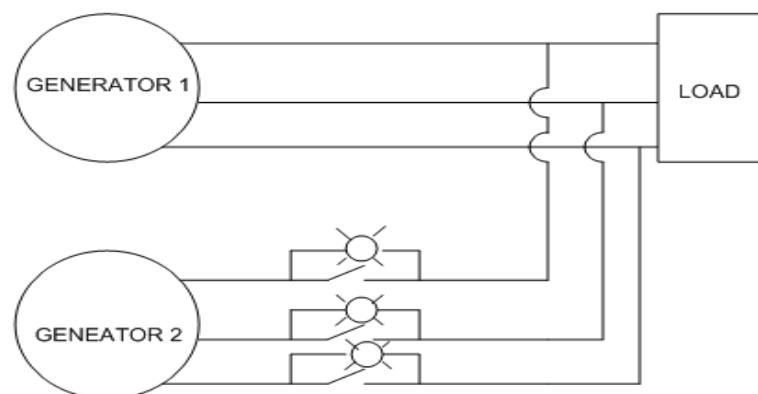
Untuk melayani beban yang berkembang, maka diperlukan tambahan sumber daya listrik. Agar sumber daya listrik yang baru (alternator baru) bisa digunakan bersama, maka dilakukan penggabungan alternator dengan cara memparalelkan dua atau lebih alternator pada sistem tenaga dengan maksud memperbesar kapasitas daya yang dibangkitkan pada sistem. Selain untuk tujuan di atas, kerja paralel juga sering dibutuhkan untuk menjaga kontinuitas pelayanan apabila ada mesin (generator) yang harus dihentikan, misalnya untuk istirahat atau reparasi, maka alternator lain masih bisa bekerja untuk mensuplai beban yang lain. Untuk maksud memparalelkan ini, ada beberapa persyaratan yang harus dipenuhi, yaitu:

1. Harga sesaat ggl kedua generator harus sama dalam kebesarannya, dan bertentangan dalam arah, atau harga sesaat ggl alternator harus sama dalam

kebesarannya dan bertentangan dalam arah dengan harga efektif tegangan jala-jala.

2. Frekuensi kedua generator atau frekuensi generator dengan jala harus sama
3. Fasa kedua generator harus sama
4. Urutan fasa kedua generator harus sama

Bila sebuah generator 'G' akan diparaelkan dengan jala-jala, maka mula-mula G diputar oleh penggerak mula mendekati putaran sinkronnya, lalu penguatan IF diatur hingga tegangan terminal generator tersebut sama dengan jala-jala. Untuk mendekati frekuensi dan urutan fasa kedua tegangan (generator dan jala-jala) digunakan alat pendeteksi yang dapat berupa lampu sinkronoskop hubungan terang. Benar tidaknya hubungan paralel tadi, dapat dilihat dari lampu tersebut. Bentuk hubungan operasi paralel generator sinkron dengan lampu sinkronoskop diperlihatkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.5. Operasi paralel generator sinkron

Jika rangkaian untuk paralel itu benar (urutan fasa sama) maka lampu L1, L2 dan L3 akan hidup-mati dengan frekuensi  $f_L - f_G$  cycle. Sehingga apabila ke tiga lampu sedang tidak berkedip berarti  $f_L = f_G$  atau frekuensi tegangan generator dan jala-jala sudah sama. Untuk mengetahui bahwa fasa kedua tegangan (generator dan jala-jala) sama dapat dilihat dari lampu L1, L2, dan L3. Frekuensi tegangan generator diatur oleh penggerak mula, sedang besar tegangan diatur oleh penguatan medan. Jika rangkaian untuk memparalelkan itu salah (urutan fasa tidak sama) maka lampu L1, L2 dan L3 akan hidup-mati bergantian dengan frekuensi  $(f_L + f_G)$  cycle. Dalam hal ini dua buah fasa (sebarang) pada terminal generator harus kita pertukarkan.

Jika urutan fasa kedua sistem tegangan sama, maka lampu L1, L2, dan L3 akan hidup-mati bergantian dengan frekuensi  $f_L - f_G$  cycle. Saat memparalelkan adalah pada keadaan L1 mati sedangkan L2 dan L3 menyala sama terang, dan keadaan ini berlangsung agak lama (yang berarti  $f_L$  dan  $f_G$  sudah sangat dekat atau benar-benar sama). Dalam keadaan ini, posisi semua fasa sistem tegangan jala-jala berimpit dengan semua fasa sistem tegangan generator.

## **2.2. Jenis Gangguan Pada Generator**

Berikut ini adalah beberapa gangguan yang dapat terjadi pada generator :

### **2.2.1. Gangguan Penggerak Awal**

Generator dengan penggerak awal mesin diesel harus dilengkapi dengan pengaman terhadap kerja balik atau gangguan monitoring karena gangguan – gangguan mekanik.

Akibat adanya tekanan balik maka generator perlu dilengkapi dengan pengaman gangguan monitoring untuk menghindari kerusakan-kerusakan yang terjadi. Pada saat ada kerusakan pada penggerak awal, maka ada daya balik dalam kumparan stator sehingga generator perlu dilengkapi dengan relai daya balik (*Reverse Power Relay*) dengan karakteristik tunda waktu.

### **2.2.2. Gangguan Hilang Penguatan**

Meskipun gangguan pada penguat generator jarang terjadi, namun gangguan ini dapat menyebabkan terganggunya kelangsungan kerja generator. Untuk itu generator perlu dilengkapi pengaman terhadap hilang penguatan (*Loss of Field Relay*).

### **2.2.3. Gangguan Arus Lebih**

Gangguan arus lebih pada generator sering kali terjadi akibat adanya hubung singkat atau beban lebih. Pada saat ini generator telah dibuat sedemikian rupa sehingga mampu bertahan terhadap adanya arus lebih, meskipun tidak terlalu

lama. Namun demikian pengamanan terhadap arus lebih sangat diperlukan agar generator terhindar dari kerusakan akibat arus yang berkepanjangan

#### **2.2.4. Gangguan Putaran Lebih**

Putaran lebih pada generator disebabkan adanya penurunan beban yang mendadak. Sebenarnya pada generator telah dilengkapi dengan perangkat governor. Pada saat terjadinya pelepasan beban. Governor tersebut akan mengatur atau menutup katup darurat (*emergency valve*) sehingga tidak terjadi putaran yang berlebihan.

Namun demikian generator masih perlu dilengkapi dengan pengamanan terhadap putaran lebih yang mampu memberikan sinyal tripping pada pemutus tenaga (*Over Speed Relay*).

#### **2.2.5 Gangguan Tegangan Lebih**

Tegangan lebih yang dibangkitkan generator terutama disebabkan oleh putaran lebih akibat pelepasan beban yang mendadak. Governor pada generator mengatur kecepatan putaran agar putarannya tetap normal. Namun, rentang waktu yang diperlukan cukup lama sehingga pada saat terjadi tegangan yang sangat membahayakan peralatan listrik lainnya. Tegangan lebih yang terjadi akan merusak isolasi kumparan generator akibat panas yang berlebih ( *Over Voltage Relay*).

### **2.2.6 Gangguan Ketidak Seimbangan Beban**

Ketidak seimbangan beban generator disebabkan adanya kebocoran atau hubung singkat penghantar ketanah atau antar penghantar. Juga bisa disebabkan oleh adanya beban yang tidak seimbang pada ketiga fase generator. Gangguan ini menyebabkan adanya arus urutan negatif yang mengalir pada penghantar bernilai nol. Pada keadaan tersebut generator harus segera diamankan agar kerusakan dapat dihindari (*Neutral Ground Relay*).

### **2.2.7 Gangguan Isolasi**

Kegagalan isolasi pada kumparan generator akan menyebabkan gangguan-gangguan hubung singkat, Baik hubung singkat didalam kumparan, antar kumparan, maupun hubung singkat kumparan dengan inti besi.

Banyak faktor yang menyebabkan terjadinya kegagalan isolasi, antara lain terjadinya tegangan lebih, panas berlebihan pada kumparan, kerusakan pada sistem pendingin atau ventilasi maupun adanya vibrasi.

## **2.3 Gangguan Hubung Singkat Pada Generator**

Pada saat terjadi gangguan di sistem tenaga listrik pasti akan mengalir arus yang besar pada sistem tersebut, dan peralatan proteksi arus lebih (*seperti Circuit Breker, Over Current Relay dan Fuse* ) harus dapat mengisolasi lokasi hubung

singkat agar meminimalkan kerusakan yang terjadi pada komponen-komponen peralatan.

Oleh karena itu perhitungan arus hubung singkat diperlukan :

- a. Memperoleh perkiraan arus hubung singkat maksimum, yang berfungsi untuk memilih kapasitas dari CB, use bus & rating dan setting dari alat proteksi dan koordinasi proteksi arus lebih yang digunakan.
- b. Memperoleh perkiraan arus hubung singkat minimum, yang berfungsi untuk menetapkan sensitifitas alat proteksi.
- c. Evaluasi aliran arus hubung singkat dan profil tegangan selama terjadinya hubung singkat

Salah satu jenis gangguan yang sering terjadi adalah gangguan hubung singkat stator. Gangguan ini merupakan jenis gangguan yang paling sering terjadi pada generator. Penyebabnya adalah penurunan isolasi pada lilitan akibat pengaruh lingkungan, seperti kelembapan atau minyak bercampur kotoran yang menempel pada permukaan kumparan dibagian luar alur stator.

### **2.3.1. Hubung Singkat Antar Fasa**

Gangguan ini terjadi bila isolasi antar fasa rusak bisa terjadi didalam stator maupun diluar stator. Untuk melindungi generator dari gangguan ini dipakai relay differensial yang segera mentrip PMT generator, PMT arus medan penguat dan memberhentikan mesin penggerak generator. Hal ini

diperlukan untuk menghentikan GGL yang dibangkitkan dalam stator generator, sehingga hubung singkat antar fasa dapat segera berhenti.

Relay differensial tidak dapat menghindarkan terjadinya gangguan hubung singkat antar fasa, tetapi hanya dapat mendeteksi dan memberhentikan hubung singkat antar fasa yang terjadi, untuk menghindarkan kerusakangenerator yang lebih besar.

### **2.3.2. Hubung Singkat Tiga Fasa**

Kemungkinan terjadinya gangguan tiga fasa bisa disebabkan putusnya kawat fasa yang letaknya di transmisi atau distribusi dengan konfigurasi kawat antar fasanya disusun secara vertikal.

Dalam sistem tiga fasa dikenal dengan adanya impedansi urutan positif ( $Z_1$ ), urutan negatif ( $Z_2$ ), dan urutan nol ( $Z_0$ ). Suatu sistem yang tidak seimbang tetapi tidak simetris setelah terjadinya gangguan tiga fasa, gangguan tiga fasa mempunyai impedansi sama diantara setiap salurannya dan titik yang sama hanya mengalir arus positif saja.

Dalam pembahasan gangguan tiga fasa, arus gangguannya dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$I_{base} = \frac{KVA \text{ dasar}}{\sqrt{3} \times Tegangan \text{ dasar}} (Ampere) \dots\dots\dots(2.5)$$



Satuan generator data reaktansi biasanya diberikan dalam persen. Untuk menghitung besarnya gangguan hubung singkat digunakan reaktansinya saja. Besar reaktansi R.

$$X_{(pu)} = X(\%) \cdot \frac{KVA \text{ base}}{KVA \text{ rating}} \cdot \left( \frac{KV \text{ rating}}{KV \text{ base}} \right)^2 \dots\dots\dots(2.6)$$

$$E(Pu) = \frac{KV \text{ sebenarnya}}{kV \text{ dasar}} \dots\dots\dots(2.7)$$

Untuk mencari arus hubung singkat tiga fasa dalam per unit adalah s sebagai berikut:

$$I_{hs \ 3\phi} (Pu) = \frac{E (Pu)}{Z_{leqi}} \dots\dots\dots(2.8)$$

Dan untuk mengubah arus hubung singkat dari per unit ke ampere adalah sebagai berikut :

$$I_{hs \ 3\phi} (Ampere) = I_{hs \ 3\phi} (Pu) \times I \text{ dasar} \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana,

$I_{hs \ 3\phi}$  = Besar arus yang mengalir pada setiap fasa waktu terjadi gangguan

hubung singkat di suatu titik didalam sistem)

$E(Pu)$  = Besar tegangan tiap fasa terhadap netral sistem

$Z_{leqi}$  = impedansi ekivalen urutan positif (per unit)

X = besar reaktansi pada generator