

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Umum

Konversi energi elektromagnetik yaitu perubahan energi dari bentuk mekanik ke bentuk listrik dan bentuk listrik ke bentuk mekanik. Generator sinkron (alternator) merupakan jenis mesin listrik yang berfungsi untuk menghasilkan tegangan bolak-balik dengan cara mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Energi mekanis diperoleh dari putaran rotor yang digerakkan oleh penggerak mula (*prime mover*), sedangkan energi listrik diperoleh dari proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan stator dan rotornya.

Generator sinkron dengan definisi sinkronnya, mempunyai makna bahwa frekuensi listrik yang dihasilkannya sinkron dengan putaran mekanis generator tersebut. Rotor generator sinkron yang diputar dengan penggerak mula (*prime mover*) yang terdiri dari belitan medan dengan suplai arus searah akan menghasilkan medan magnet putar dengan kecepatan dan arah putar yang sama dengan putaran rotor tersebut. Hubungan antara medan magnet pada mesin dengan frekuensi listrik pada stator ditunjukkan pada Persamaan dibawah ini:

$$F = \frac{n_s \cdot p}{120} \dots\dots\dots (2.1)$$

dimana :

$f$  = Frekuensi listrik (Hz)

$n_s$  = Kecepatan putar medan magnet atau kecepatan putar rotor (rpm)

$p$  = Jumlah kutub

Generator sinkron sering kita jumpai pada pusat - pusat pembangkit tenaga listrik ( dengan kapasitas yang relatif besar ). Misalnya, pada PLTA, PLTU, PLTD dan lain-lain. Selain generator dengan kapasitas besar, kita mengenal juga generator dengan kapasitas yang relatif kecil, misalnya generator yang digunakan untuk penerangan darurat yang sering disebut Generator Set atau generator cadangan.

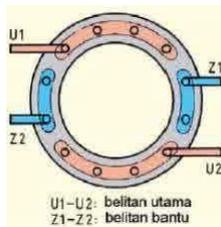
## **2.2 Generator AC**

Berdasarkan karakteristik dari arus listrik yang mengalir, motor AC (Alternating Current, Arus Bolak-balik) terdiri dari 2 jenis, yaitu:

1. Motor listrik AC / arus bolak-balik 1 fasa  
Pada motor listrik AC 1 fasa, yang terdiri dari: Motor Kapasitor, Motor Shaded Pole, dan Motor Universal
2. Motor listrik AC / arus bolak-balik 3 fasa

### **2.2.1 Prinsip Kerja Motor AC satu fasa**

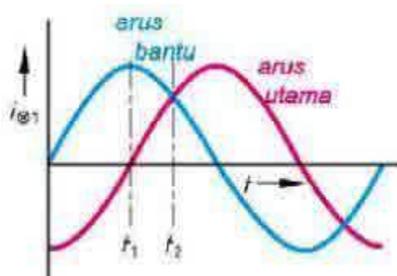
Motor AC satu fasa berbeda cara kerjanya dengan motor AC tiga fasa, dimana pada motor AC tiga fasa untuk belitan statornya terdapat tiga belitan yang menghasilkan medan putar dan pada rotor sangkar terjadi induksi dan interaksi torsi yang menghasilkan putaran. Sedangkan pada motor satu fasa memiliki dua belitan stator, yaitu belitan fasa utama (belitan U1-U2) dan belitan fasa bantu ( belitan Z1-Z2)



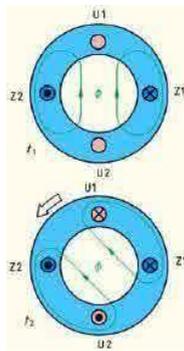
Gambar 2.1. Prinsip Medan Magnet Utama dan Medan magnet Bantu Motor Satu fasa

Belitan utama menggunakan penampang kawat tembaga lebih besar sehingga memiliki impedansi lebih kecil. Sedangkan belitan bantu dibuat dari tembaga berpenampang kecil dan jumlah belitannya lebih banyak, sehingga impedansinya lebih besar dibanding impedansi belitan utama.

Grafik arus belitan bantu dan arus belitan utama berbeda fasa sebesar  $\phi$ , hal ini disebabkan karena perbedaan besarnya impedansi kedua belitan tersebut. Perbedaan arus beda fasa ini menyebabkan arus total, merupakan penjumlahan vektor arus utama dan arus bantu. Medan magnet utama yang dihasilkan belitan utama juga berbeda fasa sebesar  $\phi$  dengan medan magnet bantu.



Gambar 2.2. Grafik Gelombang arus medan bantu dan arus medan utama



Gambar 3. Medan magnet pada Stator Motor satu fasa

Belitan bantu Z1-Z2 pertama dialiri arus bantu menghasilkan fluks magnet  $\Phi$  tegak lurus, beberapa saat kemudian belitan utama U1-U2 dialiri arus utama. Yang bernilai positif. Hasilnya adalah medan magnet yang bergeser sebesar  $45^\circ$  dengan arah berlawanan jarum jam. Kejadian ini berlangsung terus sampai satu siklus sinusoida, sehingga menghasilkan medan magnet yang berputar pada belitan statornya.

Rotor motor satu fasa sama dengan rotor motor tiga fasa yaitu berbentuk batang-batang kawat yang ujung-ujungnya dihubungkan singkatkan dan menyerupai bentuk sangkar tupai, maka sering disebut rotor sangkar.



Gambar 2.4. Rotor sangkar

Belitan rotor yang dipotong oleh medan putar stator, menghasilkan tegangan induksi, interaksi antara medan putar stator dan medan magnet rotor akan menghasilkan torsi putar pada rotor.

### 2.2.2 Motor Kapasitor

Motor kapasitor satu fasa banyak digunakan dalam peralatan rumah tangga seperti motor pompa air, motor mesin cuci, motor lemari es, motor air conditioning.

Konstruksinya sederhana dengan daya kecil dan bekerja dengan tegangan suplai PLN 220 V, oleh karena itu menjadikan motor kapasitor ini banyak dipakai pada peralatan rumah tangga.

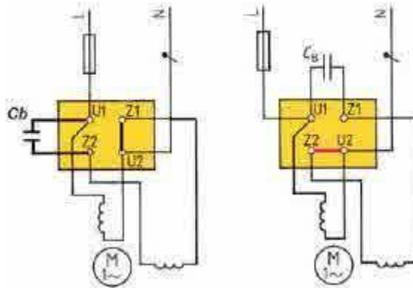


Gambar 2.5. Motor kapasitor

Belitan stator terdiri atas belitan utama dengan notasi terminal U1-U2, dan belitan bantu dengan notasi terminal Z1-Z2. Jala-jala L1 terhubung dengan terminal U1, dan kawat netral N terhubung dengan terminal U2. Kondensator kerja berfungsi agar perbedaan sudut fasa belitan utama dengan belitan bantu mendekati  $90^\circ$ .

Pengaturan arah putaran motor kapasitor dapat dilakukan dengan (lihat gambar 2.6).

- Untuk menghasilkan putaran ke kiri (berlawanan jarum jam) kondensator kerja CB disambungkan ke terminal U1 dan Z2 dan terminal Z1 dikopel dengan terminal.
- Putaran ke kanan (searah jarum jam) kondensator kerja disambung kan ke terminal Z1 dan U1 dan terminal Z2 dikopel dengan terminal U1.



Gambar 2.6. Pengawatan motor kapasitor dengan pembalik putaran.

Motor kapasitor dengan daya diatas 1 KW di lengkapi dengan dua buah kondensator dan satu buah saklar sentrifugal. Belitan utama U1-U2 dihubungkan dengan jala-jala L1 dan Netral N. Belitan bantu Z1-Z2 disambungkan seri dengan kondensator kerja CB, dan sebuah kondensator starting CA diseri dengan kontak normally close (NC) dari saklar sentrifugal, lihat gambar 2.7.

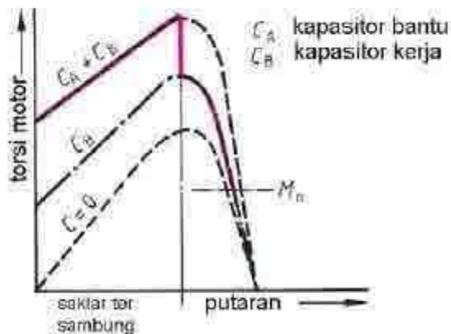
Awalnya belitan utama dan belitan bantu mendapatkan tegangan dari jala-jala L1 dan Netral. Kemudian dua buah kondensator CB dan CA, keduanya membentuk loop tertutup sehingga rotor mulai berputar, dan ketika putaran mendekati 70% putaran nominalnya, saklar

sentrifugal akan membuka dan kontak normally close memutuskan kondensator bantu CA.



Gambar 7. Pengawatan dengan Dua Kapasitor

Fungsi dari dua kondensator yang disambungkan parallel,  $C_A + C_B$ , adalah untuk meningkatkan nilai torsi awal untuk mengangkat beban. Setelah putaran motor mencapai 70% putaran, saklar sentrifugal terputus sehingga hanya kondensator kerja  $C_B$  saja yang tetap bekerja. Jika kedua kondensator rusak maka torsi motor akan menurun drastis, lihat gambar 2.8.



Gambar 8. Karakteristik Torsi Motor kapasitor

### 2.2.3 Motor shaded pole

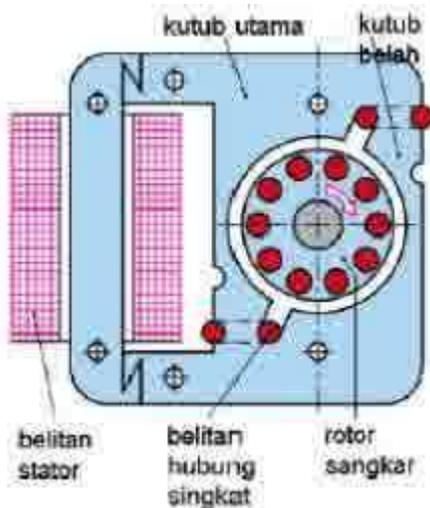
Motor shaded pole atau motor fasa terbelah termasuk motor satu fasa daya kecil, dan banyak digunakan untuk peralatan rumah tangga sebagai motor penggerak kipas angin, blender. Konstruksinya sangat sederhana, pada kedua ujung stator ada dua kawat yang terpasang dan dihubungkan singkatkan fungsinya sebagai pembelah fasa.

Belitan stator dibelitkan sekeliling inti membentuk seperti belitan transformator. Rotornya berbentuk sangkar tupai dan porosnya ditempatkan pada rumah stator ditopang dua buah bearing.



Gambar 2.9. Motor shaded pole, Motor fasa terbelah.

Irisan penampang motor shaded pole memperlihatkan dua bagian, yaitu bagian stator dengan belitan stator dan dua kawat shaded pole. Bagian rotor sangkar ditempatkan di tengah-tengah stator, lihat gambar 2.10.



Gambar 2.10. Penampang motor shaded pole.

Torsi putar dihasilkan oleh adanya pembelahan fasa oleh kawat shaded pole. Konstruksi yang sederhana, daya yang kecil, handal, mudah dioperasikan, bebas perawatan dan cukup di suplai dengan Tegangan AC 220 V, jenis motor shaded pole banyak digunakan untuk peralatan rumah tangga kecil.

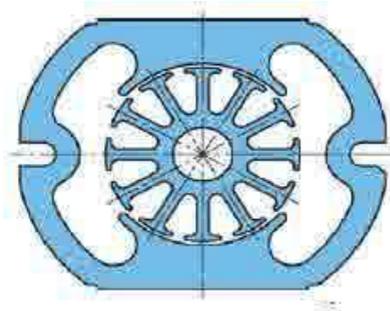
#### 2.2.4 Motor Universal

Motor Universal termasuk motor satu fasa dengan menggunakan belitan stator dan belitan rotor. Motor universal dipakai pada mesin jahit, motor bor tangan. Perawatan rutin dilakukan dengan mengganti sikat arang yang memendek atau pegas sikat arang yang lembek. Kontruksinya yang sederhana, handal, mudah dioperasikan, daya yang kecil, torsi yang cukup besar motor universal dipakai untuk peralatan rumah tangga.



Gambar 2.11. Komutator pada motor universal.

Bentuk stator dari motor universal terdiri dari dua kutub stator. Belitan rotor memiliki dua belas alur belitan dan dilengkapi komutator dan sikat arang yang menghubungkan secara seri antara belitan stator dengan belitan rotornya. Motor universal memiliki kecepatan tinggi sekitar 3000 rpm.

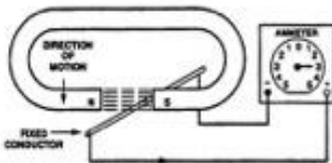


Gambar 2.12. Stator dan rotor motor universal

Aplikasi motor universal untuk mesin jahit, untuk mengatur kecepatan dihubungkan dengan tahanan geser dalam bentuk pedal yang ditekan dan dilepaskan.

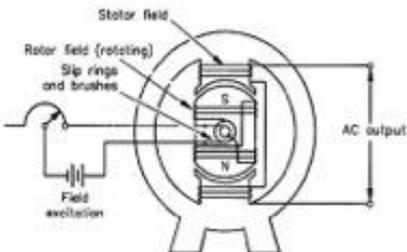
Generator merupakan satu komponen yang paling penting pada sebuah pabrik penghasil listrik semacam PLTU. Energi panas dari uap air yang diproduksi oleh boiler diubah menjadi energi mekanis berupa putaran poros pada turbin. Energi mekanis tersebut selanjutnya akan diubah menjadi energi listrik oleh generator. Generator listrik menggunakan prinsip dasar dari Hukum Faraday dimana apabila sebuah konduktor listrik dilewatkan ke sebuah medan magnet, akan timbul tegangan listrik yang terinduksi pada konduktor tersebut.

#### THE PHYSICS OF GENERATOR ACTION



A VOLTAGE IS INDUCED IN THE STATIONARY CONDUCTOR WHEN THE MAGNETIC FIELD MOVES ACROSS IT. REVERSING THE DIRECTION OF MOVEMENT OF THE MAGNETIC FIELD WILL CAUSE THE DIRECTION OF THE INDUCED VOLTAGE AND RESULTING CURRENT FLOW TO REVERSE.

#### THE BASIC GENERATOR

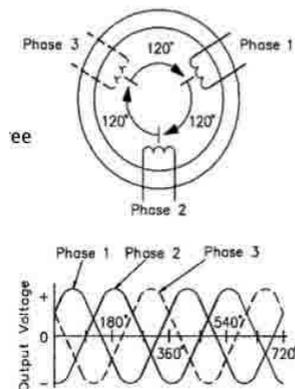


Gb. 2.13. Basic Generator

## 2.3 Prinsip Dasar Generator

Secara umum generator terbagi ke dalam dua jenis, yakni generator DC dan generator AC. Generator DC membangkitkan arus listrik searah dengan menggunakan komponen utama berupa komutator, sebuah komponen berupa lilitan kawat untuk membangkitkan listrik searah. Generator DC hanya cocok untuk membangkitkan tenaga listrik kecil, karena untuk memenuhi kebutuhan listrik yang tinggi, dibutuhkan generator DC yang ukurannya sangat besar mengalahkan ukuran generator AC untuk menghasilkan daya yang sama. Generator AC tersusun atas sebuah konduktor listrik yang bergerak memotong medan magnet (biasanya berupa elektromagnetik). Kedua ujung dari konduktor tersebut terhubung ke beban listrik yang menjadi konsumen listrik dari generator.

### 2.3.1 Prinsip Pembangkit Arus Listrik AC



Gb. 2.14. Pembangkit Arus Listrik AC

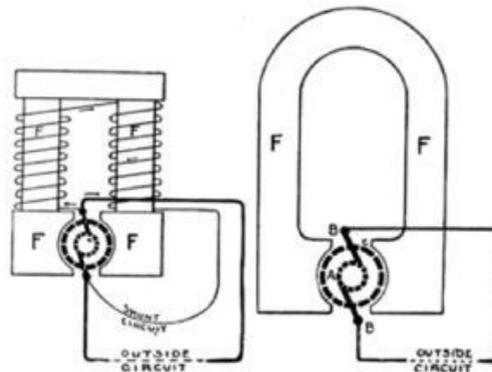
Pada saat posisi konduktor vertikal, tegangan yang dihasilkan adalah nol karena pada posisi ini konduktor tidak memotong garis medan magnet. Konduktor terus berputar hingga  $90^\circ$  sehingga pada saat posisi horisontal akan dihasilkan tegangan listrik maksimum. Konduktor ini akan terus berputar sehingga menghasilkan arus listrik AC yang dapat digambarkan dengan grafik sinusoidal pada gambar di atas.

### **2.3.2 Prinsip Dasar Generator AC 3 Fasa**

Generator 3-fasa memiliki prinsip kerja yang sama dengan generator 1-fasa. Tiga lilitan konduktor disusun secara melingkar sehingga jarak antar lilitan adalah sebesar  $120^\circ$ . Medan magnet yang berputar di tengah-tengah ketiga lilitan konduktor tersebut menginduksi lilitan-lilitan tersebut sehingga menghasilkan tegangan listrik pada masing-masing lilitan. Jika digambarkan menjadi sebuah kurva, maka akan membentuk tiga kurva yang masing-masing memiliki jarak  $120^\circ$ .

### **2.4 Sistem Eksitasi**

Komponen utama dari rotor sebuah generator adalah magnet. Magnet ini dapat berupa magnet permanen maupun magnet yang dibangkitkan dengan menggunakan kumparan. Pada generator yang menggunakan kumparan sebagai magnet buatan, maka dibutuhkan arus listrik yang mengalir ke kumparan tersebut. Proses dari pembangkitan medan magnet secara buatan pada generator inilah yang disebut dengan proses eksitasi.



Gb. 2.15. Sistem eksitasi generator

#### Perbedaan Generator Dengan *Exciter* dan Magnet Permanen

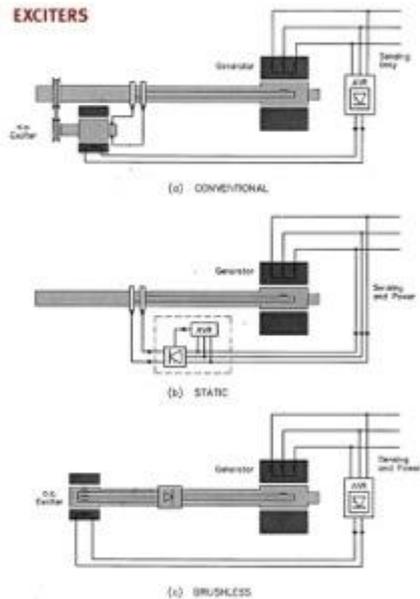
Pada generator dengan sistem eksitasi, besar tegangan listrik yang dihasilkan oleh generator sebanding dengan besar medan magnet di dalamnya, sedangkan besar medan magnet ini sebanding dengan besar arus eksitasi yang dibangkitkan. Maka, jika arus eksitasi sama dengan nol, maka tegangan listrik juga sama dengan nol. Atas dasar ini, sistem eksitasi dapat dikatakan sebagai sebuah sistem *amplifier*, dimana sejumlah kecil daya dapat mengontrol sejumlah daya yang besar. Prinsip ini menjadi dasar untuk mengontrol tegangan keluaran generator, jika tegangan sistem turun maka arus eksitasi harus ditambah, dan jika tegangan sistem terlalu tinggi maka arus eksitasi dapat diturunkan.

Secara umum *exciter* dapat dikelompokkan menjadi dua jenis, yaitu:

1. *Exciter* Berputar. *Exciter* jenis ini membangkitkan arus listrik DC dengan menggunakan semacam generator

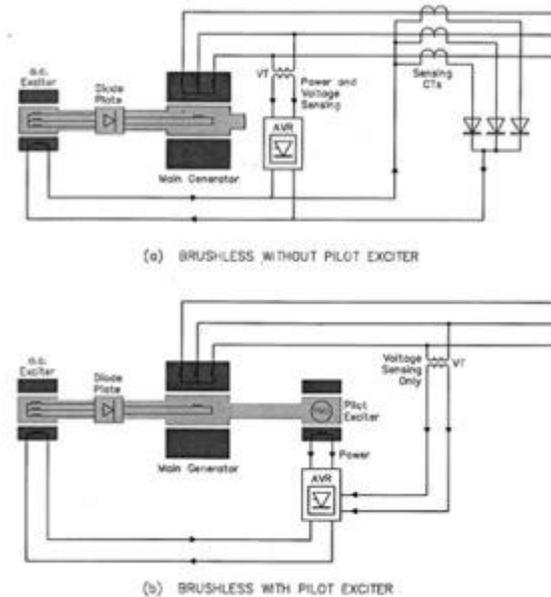
berukuran kecil yang ikut berputar dengan generator utama. Ada dua tipe *exciter* berputar, mereka adalah:

a. Tipe yang menggunakan *brush*. Tipe klasik ini memerlukan komponen *slip-ring* untuk menghubungkan arus yang dibangkitkan oleh *exciter* dengan rotor generator. Sehingga tipe ini memerlukan perawatan yang berjangka.



Gb. 2.16. Exciter tipe brush

b. Tipe *brushless*. Tipe ini lebih modern karena *exciter* berada satu poros dengan generator utama. Supply arus dari *exciter* kumparan magnet generator dihubungkan dengan plat dioda.



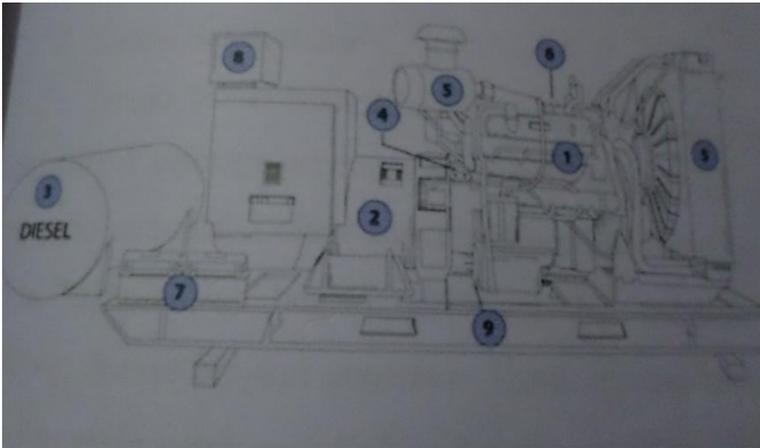
### Gb.2.17. Exciter Tipe Brushless

2. *Exciter Statis.* *Exciter* tipe ini tidak menggunakan generator kecil sebagai pembangkit arus DC untuk generator utamanya. Tipe ini menggunakan arus listrik yang keluar dari generator yang “disalurkan” menjadi DC dan disupply ke rotor generator utama

Komponen utama dari sebuah generator listrik dapat secara luas sebagai berikut:

1. Mesin
2. Alternator
3. Sistem Bahan Bakar
4. Voltage Regulator
5. Pendingin dan Exhaust System
6. Sistem Pelumasan

7. Charger Baterai
8. Control Panel



Gb.2.18. Bagian – bagian generator

## 2.5 Generator DC

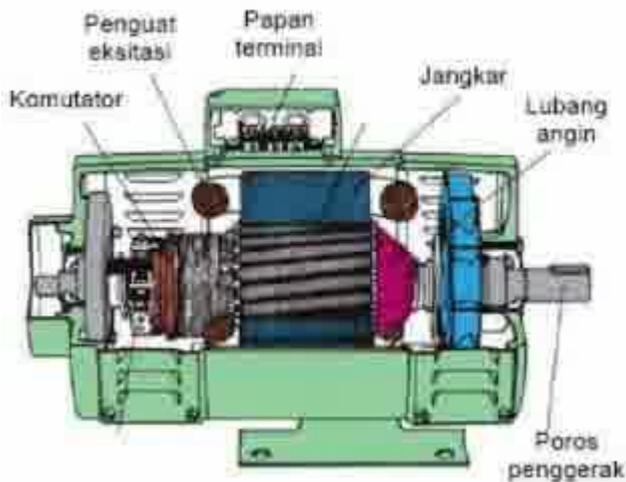
Generator DC merupakan sebuah perangkat mesin listrik dinamis yang mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Generator DC menghasilkan arus DC / arus searah. Generator DC dibedakan menjadi beberapa jenis berdasarkan dari rangkaian belitan magnet atau penguat eksitasinya terhadap jangkar (anker), jenis generator DC yaitu:

- Generator penguat terpisah
- Generator shunt
- Generator kompon

### 2.5.1 Konstruksi Generator DC

Pada umumnya generator DC dibuat dengan menggunakan magnet permanent dengan 4-kutub rotor,

regulator tegangan digital, proteksi terhadap beban lebih, starter eksitasi, penyearah, bearing dan rumah generator atau casing, serta bagian rotor. Gambar 1 menunjukkan gambar potongan melintang konstruksi generator DC.



Gambar 2.19. Konstruksi Generator DC

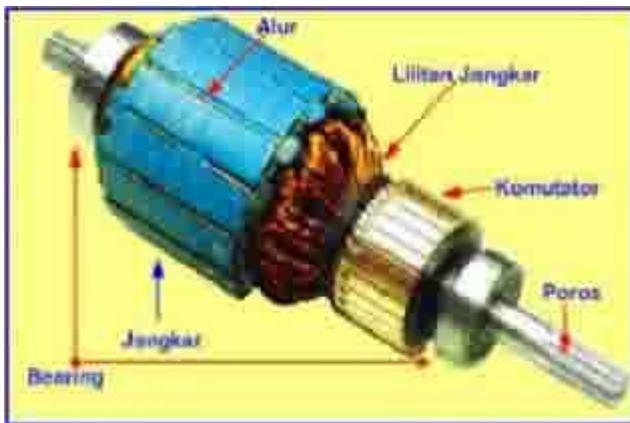
Generator DC terdiri dua bagian, yaitu stator, yaitu bagian mesin DC yang diam, dan bagian rotor, yaitu bagian mesin DC yang berputar. Bagian stator terdiri dari: rangka motor, belitan stator, sikat arang, bearing dan terminal box. Sedangkan bagian rotor terdiri dari: komutator, belitan rotor, kipas rotor dan poros rotor.

Bagian yang harus menjadi perhatian untuk perawatan secara rutin adalah sikat arang yang akan memendek dan harus diganti secara periodic / berkala. Komutator harus dibersihkan dari kotoran sisa sikat arang yang menempel dan serbuk arang yang mengisi celah-celah

komutator, gunakan amplas halus untuk membersihkan noda bekas sikat arang.

### 2.5.2 Jangkar Generator DC

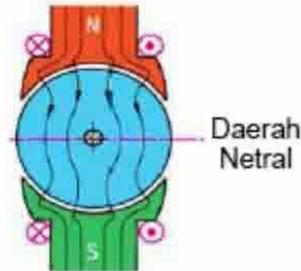
Jangkar adalah tempat lilitan pada rotor yang berbentuk silinder beralur. Belitan tersebut merupakan tempat terbentuknya tegangan induksi. Pada umumnya jangkar terbuat dari bahan yang kuat mempunyai sifat feromagnetik dengan permeabilitas yang cukup besar. Permeabilitas yang besar diperlukan agar lilitan jangkar terletak pada daerah yang induksi magnetnya besar, sehingga tegangan induksi yang ditimbulkan juga besar. Belitan jangkar terdiri dari beberapa kumparan yang dipasang di dalam alur jangkar. Tiap-tiap kumparan terdiri dari lilitan kawat atau lilitan batang.



Gambar 2.20. Jagkar Generator DC.

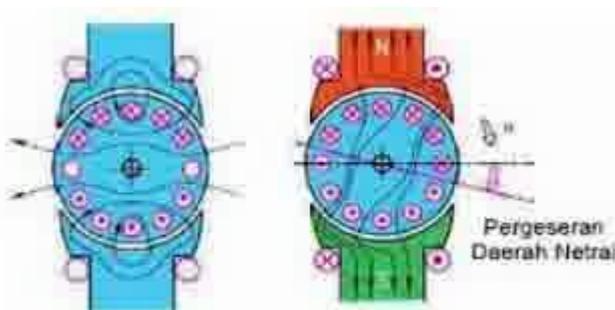
### 2.5.3 Reaksi Jangkar

Fluks magnet yang ditimbulkan oleh kutub-kutub utama dari sebuah generator saat tanpa beban disebut Fluks Medan Utama (Gambar 2.21). Fluks ini memotong lilitan jangkar sehingga timbul tegangan induksi.



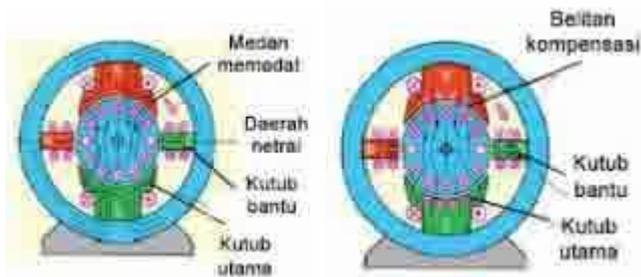
Gambar 2.21. Medan Eksitasi Generator DC

Bila generator dibebani maka pada penghantar jangkar timbul arus jangkar. Arus jangkar ini menyebabkan timbulnya fluks pada penghantar jangkar tersebut dan biasa disebut Fluks Medan Jangkar (Gambar 2.22).



Gambar 2.22. Medan Jangkar dari Generator DC (a) dan Reaksi Jangkar (b).

Munculnya medan jangkar akan memperlemah medan utama yang terletak disebelah kiri kutub utara, dan akan memperkuat medan utama yang terletak di sebelah kanan kutub utara. Pengaruh adanya interaksi antara medan utama dan medan jangkar ini disebut reaksi jangkar. Reaksi jangkar ini mengakibatkan medan utama tidak tegak lurus pada garis netral  $n$ , tetapi bergeser sebesar sudut  $\alpha$ . Dengan kata lain, garis netral akan bergeser. Pergeseran garis netral akan melemahkan tegangan nominal generator. Untuk mengembalikan garis netral ke posisi awal, dipasangkan medan magnet bantu (interpole atau kutub bantu), seperti ditunjukkan pada Gambar 2.23(a).



Gambar 2.23. Generator dengan Kutub Bantu (a) dan Generator Kutub Utama, Kutub Bantu, Belitan Kompensasi (b).

Lilitan magnet bantu berupa kutub magnet yang ukuran fisiknya lebih kecil dari kutub utama. Dengan bergesernya garis netral, maka sikat yang diletakkan pada permukaan komutator dan tepat terletak pada garis netral  $n$  juga akan bergeser. Jika sikat dipertahankan pada posisi semula (garis netral), maka akan timbul percikan bunga api, dan ini sangat berpotensi menimbulkan kebakaran atau

bahaya lainnya. Oleh karena itu, sikat juga harus digeser sesuai dengan pergeseran garis netral. Bila sikat tidak digeser maka komutasi akan jelek, sebab sikat terhubung dengan penghantar yang mengandung tegangan. Reaksi jangkar ini dapat juga diatasi dengan kompensasi yang dipasangkan pada kaki kutub utama baik pada lilitan kutub utara maupun kutub selatan, seperti ditunjukkan pada gambar 2.23 (a) dan (b), generator dengan komutator dan lilitan kompensasinya.

Kini dalam rangkaian generator DC memiliki tiga lilitan magnet, yaitu:

- a. lilitan magnet utama
- b. lilitan magnet bantu (interpole)
- c. lilitan magnet kompensasi

## **2.6 Jenis-Jenis Generator DC**

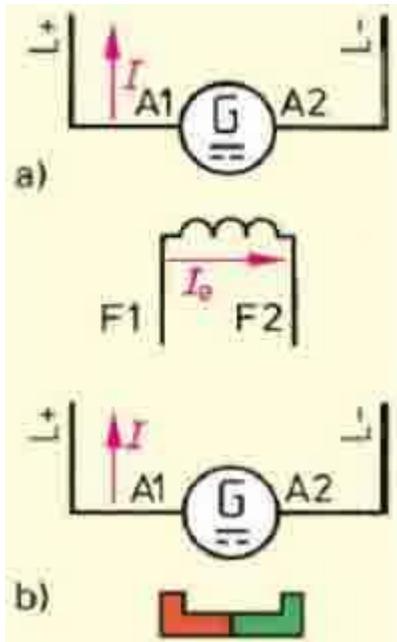
Seperti telah disebutkan diawal, bahwa generator DC berdasarkan dari rangkaian belitan magnet atau penguat eksitasinya terhadap jangkar (anker) dibagi menjadi 3 jenis, yaitu:

### **2.6.1 Generator penguat terpisah**

Pada generator penguat terpisah, belitan eksitasi (penguat eksitasi) tidak terhubung menjadi satu dengan rotor.

Terdapat dua jenis generator penguat terpisah, yaitu:

1. Penguat elektromagnetik (Gambar 2.24a)
2. Magnet permanent / magnet tetap (Gambar 2.24.b)

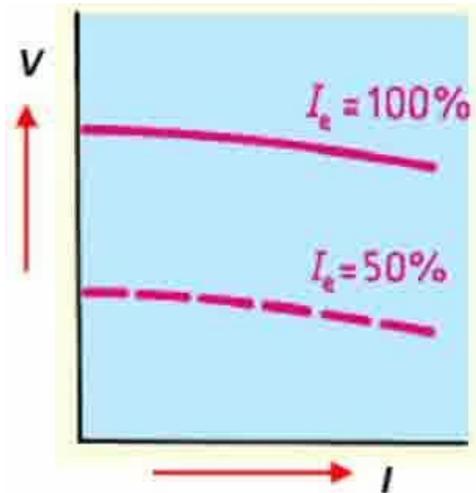


Gambar 2.24. Generator Penguat Terpisah.

Energi listrik yang dihasilkan oleh penguat elektromagnet dapat diatur melalui pengaturan tegangan eksitasi. Pengaturan dapat dilakukan secara elektronik atau magnetik. Generator ini bekerja dengan catu daya DC dari luar yang dimasukkan melalui belitan F1-F2.

Penguat dengan magnet permanen menghasilkan tegangan output generator yang konstan dari terminal rotor A1-A2. Karakteristik tegangan  $V$  relatif konstan dan tegangan akan menurun sedikit ketika arus beban  $I$  dinaikkan mendekati harga nominalnya.

## Karakteristik Generator Penguat Terpisah



Gambar 2.25. Karakteristik Generator Penguat Terpisah  
Gambar di atas menunjukkan:

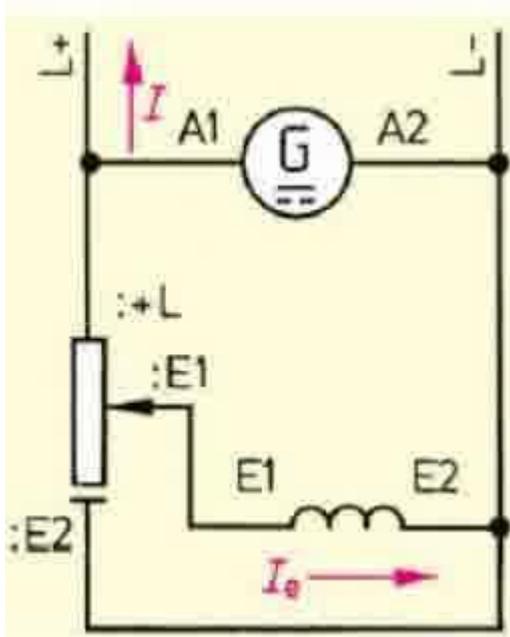
- a. karakteristik generator penguat terpisah saat eksitasi penuh ( $I_e$  100%) dan saat eksitasi setengah penuh ( $I_e$  50%).  $I_e$  adalah arus eksitasi,  $I$  adalah arus beban. Tegangan output generator akan sedikit turun jika arus beban semakin besar.
- b. Kerugian tegangan akibat reaksi jangkar.
- c. Perurunan tegangan akibat resistansi jangkar dan reaksi jangkar, selanjutnya mengakibatkan turunnya pasokan arus penguat ke medan magnet, sehingga tegangan induksi menjadi kecil.

### 2.6.2 Generator Shunt

Pada generator shunt, penguat eksitasi E1-E2 terhubung paralel dengan rotor (A1-A2). Tegangan awal

generator diperoleh dari magnet sisa yang terdapat pada medan magnet stator.

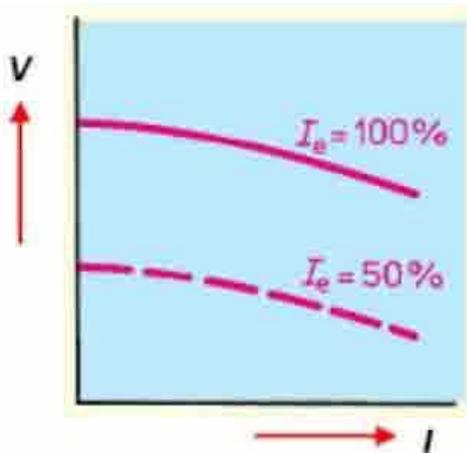
Rotor berputar dalam medan magnet yang lemah, dihasilkan tegangan yang akan memperkuat medan magnet stator, sampai dicapai tegangan nominalnya. Pengaturan arus eksitasi yang melewati belitan shunt E1-E2 diatur oleh tahanan geser. Makin besar arus eksitasi shunt, makin besar medan penguat shunt yang dihasilkan, dan tegangan terminal meningkat sampai mencapai tegangan nominalnya. Diagram rangkaian generator shunt dapat dilihat pada Gambar 2.26.



Gambar 2.26. Diagram Rangkaian Generator Shunt

Jika generator shunt tidak mendapatkan arus eksitasi, maka sisa magnetisasi tidak akan ada, atau jika belitan eksitasi salah sambung atau jika arah putaran terbalik, atau rotor terhubung-singkat, maka tidak akan ada tegangan atau energi listrik yang dihasilkan oleh generator tersebut.

### Karakteristik Generator Shunt



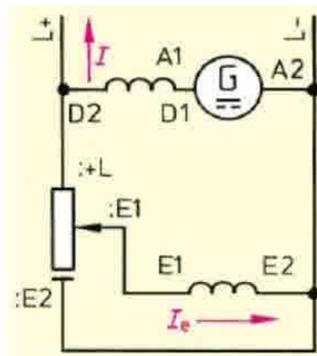
Gambar 2.27. Karakteristik Generator Shunt.

Generator shunt mempunyai karakteristik seperti ditunjukkan pada Gambar 11. Tegangan output akan turun lebih banyak untuk kenaikan arus beban yang sama, dibandingkan dengan tegangan output pada generator penguat terpisah.

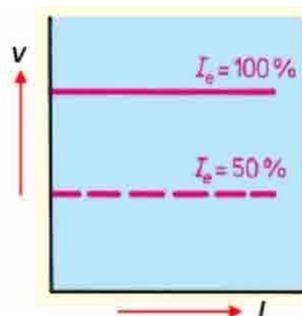
Sebagai sumber tegangan, karakteristik dari generator penguat terpisah dan generator shunt tentu kurang baik, karena seharusnya sebuah generator mempunyai tegangan output yang konstan, namun hal ini dapat diperbaiki pada generator kompon.

### 2.6.3 Generator Kompon

Generator kompon mempunyai dua penguat eksitasi pada inti kutub utama yang sama. Satu penguat eksitasi merupakan penguat shunt, dan lainnya merupakan penguat seri. Diagram rangkaian generator kompon ditunjukkan pada Gambar 2.28. Pengatur medan magnet (D1-D2) terletak di depan belitan shunt.

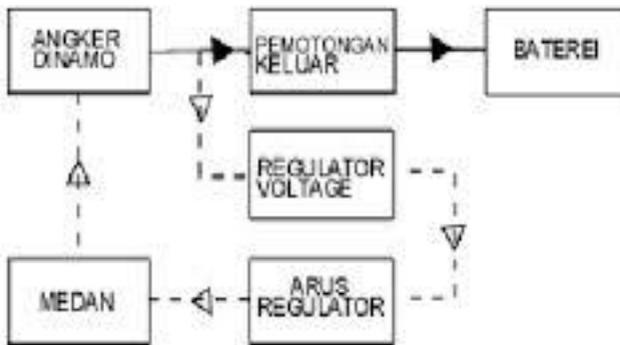


Gambar 2.28. Diagram Rangkaian Generator Kompon  
**Karakteristik Generator Kompon**



Gambar 2.29. Karakteristik Generator Kompon

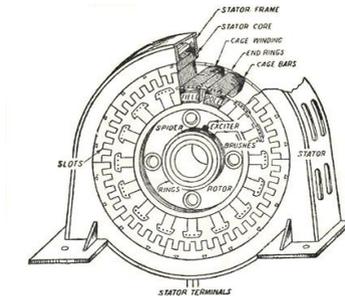
Tegangan output generator terlihat konstan dengan pertambahan arus beban, baik pada arus eksitasi penuh maupun eksitasi 50%. Hal ini disebabkan oleh adanya penguatan lilitan seri, yang cenderung naik tegangannya jika arus beban bertambah besar. Jadi ini merupakan kompensasi dari generator shunt, yang cenderung tegangannya akan turun jika arus bebannya naik.



Gb. 2.30. Blok Diagram Generator DC

## 2.7 Komponen Generator Sinkron

Generator sinkron mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik bolak-balik secara elektromagnetik. Energi mekanik berasal dari penggerak mula yang memutar rotor, sedangkan energi listrik dihasilkan dari proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan-kumparan stator.



Gambar 2.31. Konstruksi Generator Sinkron

Secara umum generator sinkron terdiri atas stator, rotor, dan celah udara. Stator merupakan bagian dari generator sinkron yang diam sedangkan rotor adalah bagian yang berputar dimana diletakkan kumparan medan yang disuplai oleh arus searah dari Eksiter. Celah udara adalah ruang antara stator dan rotor.

#### 1. Stator

Stator terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu :

- a. Rangka Stator  
Rangka stator merupakan rumah (kerangka) yang menyangga inti jangkar generator
- b. Inti Stator  
Inti stator terbuat dari laminasi-laminasi baja campuran atau besi magnetik khusus yang terpasang ke rangka stator.
- c. Alur (slot) dan Gigi  
Alur dan gigi merupakan tempat meletakkan kumparan stator. Ada 3 (tiga) bentuk alur stator yaitu terbuka, setengah terbuka, dan tertutup.
- d. Kumparan Stator (Kumparan Jangkar)

- e. Kumparan jangkar biasanya terbuat dari tembaga. Kumparan ini merupakan tempat timbulnya ggl induksi.

## 2. Rotor

Rotor terdiri dari tiga komponen utama yaitu :

### a. Slip Ring

Slip ring merupakan cincin logam yang melingkari poros rotor tetapi dipisahkan oleh isolasi tertentu. Terminal kumparan rotor dipasangkan ke slip ring ini kemudian dihubungkan ke sumber arus searah melalui sikat (brush) yang letaknya menempel pada slip ring.

### b. Kumparan Rotor (kumparan medan)

- c. Kumparan medan merupakan unsur yang memegang peranan utama dalam menghasilkan medan magnet. Kumparan ini mendapat arus searah dari sumber eksitasi tertentu.

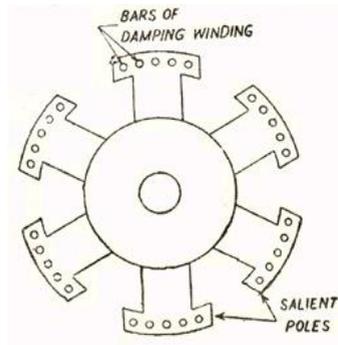
### d. Poros Rotor

Poros rotor merupakan tempat meletakkan kumparan medan, dimana pada poros rotor tersebut telah terbentuk slot-slot secara paralel terhadap poros rotor.

Rotor pada generator sinkron pada dasarnya adalah sebuah elektromagnet yang besar. Kutub medan magnet rotor dapat berupa salient pole (kutub menonjol) dan non salient pole (kutub silinder).

### a. Jenis Kutub Menonjol (Salient Pole)

Pada jenis salient pole, kutub magnet menonjol keluar dari permukaan rotor. Belitan-belitan medannya dihubungkan seri. Ketika belitan medan ini disuplai oleh Eksiter, maka kutub yang berdekatan akan membentuk kutub berlawanan.



Gambar 2.32. Rotor Kutub Menonjol

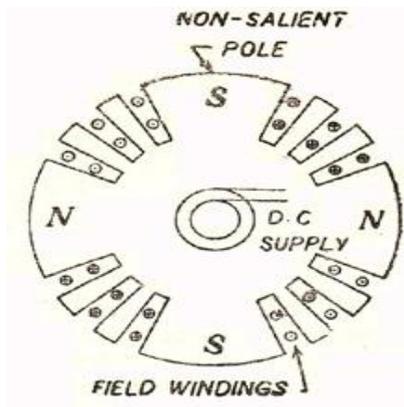
Rotor kutub menonjol umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putar rendah dan sedang (120-400 rpm). Generator sinkron tipe seperti ini biasanya dikopel oleh mesin diesel atau turbin air pada sistem pembangkit listrik. Rotor kutub menonjol baik digunakan untuk putaran rendah dan sedang karena:

- Kutub menonjol akan mengalami rugi-rugi angin yang besar dan bersuara bising jika diputar dengan kecepatan tinggi.
- Konstruksi kutub menonjol tidak cukup kuat untuk menahan tekanan mekanis apabila diputar dengan kecepatan tinggi.

#### b. Jenis Kutub Silinder (Non Salient Pole)

Pada jenis non salient pole, konstruksi kutub magnet rata dengan permukaan rotor. Jenis rotor ini terbuat dari baja tempa halus yang berbentuk silinder yang mempunyai alur-alur terbuat di sisi luarnya. Belitan-belitan medan dipasang

pada alur-alur di sisi luarnya dan terhubung seri yang dienerjais oleh Eksiter.



Gambar 2.32. Rotor Kutub Silinder

Rotor silinder umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putar tinggi (1500 atau 3000 rpm) seperti yang terdapat pada pembangkit listrik tenaga uap. Rotor silinder baik digunakan pada kecepatan putar tinggi karena :

- a. Konstruksinya memiliki kekuatan mekanik yang baik pada kecepatan putar tinggi
- b. Distribusi di sekeliling rotor mendekati bentuk gelombang sinus sehingga lebih baik dari kutub menonjol.

### 2.7.1 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Adapun prinsip kerja dari generator sinkron secara umum adalah sebagai berikut :

1. Kumparan medan yang terdapat pada rotor dihubungkan dengan sumber eksitasi tertentu yang akan mensuplai arus searah terhadap kumparan medan. Dengan adanya arus searah yang mengalir melalui kumparan medan maka akan menimbulkan fluks yang besarnya terhadap waktu adalah tetap.
2. Penggerak mula (Prime Mover) yang sudah terkopel dengan rotor segera dioperasikan sehingga rotor akan berputar pada kecepatan nominalnya.
3. Perputaran rotor tersebut sekaligus akan memutar medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan. Medan putar yang dihasilkan pada rotor, akan diinduksikan pada kumparan jangkar sehingga pada kumparan jangkar yang terletak di stator akan dihasilkan fluks magnetik yang berubah-ubah besarnya terhadap waktu. Adanya perubahan fluks magnetik yang melingkupi suatu kumparan akan menimbulkan ggl induksi pada ujung-ujung kumparan tersebut, hal tersebut sesuai dengan Persamaan 2.2 dan Persamaan 2.3 berikut :

$$e = - N \frac{d\Phi}{dt} \dots\dots\dots ( 2.2 )$$

$$E_{eff} = Cn\Phi_m \dots\dots\dots(2.3 )$$

dimana :

$e$  = ggl induksi dalam keadaan transient (Volt)

$E_{eff}$  = ggl induksi efektif (Volt)

$N$  = jumlah lilitan ;

$C$  = konstanta ;

$n$  = putaran rotor (rpm)

$\phi_m$  = fluks magnetik maksimum (Weber)

Untuk generator sinkron tiga fasa, digunakan tiga kumparan jangkar yang ditempatkan di stator yang disusun dalam bentuk tertentu, sehingga susunan kumparan jangkar yang sedemikian akan membangkitkan tegangan induksi pada ketiga kumparan jangkar yang besarnya sama tapi berbeda fasa 120° satu sama lain. Setelah itu ketiga terminal kumparan jangkar siap dioperasikan untuk menghasilkan energi listrik.

### 2.7.2 Reaksi Jangkar generator Sinkron

Saat generator sinkron bekerja pada beban nol tidak ada arus yang mengalir melalui kumparan jangkar (stator), sehingga yang ada pada celah udara hanya fluksi arus medan rotor. Namun jika generator sinkron diberi beban, arus jangkar  $I_a$  akan mengalir dan membentuk fluksi jangkar. Fluksi jangkar ini kemudian mempengaruhi fluksi arus medan dan akhirnya menyebabkan berubahnya harga tegangan terminal generator sinkron.

Pengaruh yang ditimbulkan oleh fluksi jangkar dapat berupa distorsi, penguatan (*magnetising*), maupun pelemahan (*demagnetising*) fluksi arus medan pada celah udara. Perbedaan pengaruh yang ditimbulkan fluksi jangkar tergantung kepada beban dan faktor daya beban, yaitu :

a. Untuk beban resistif ( $\cos\phi = 1$ )

Pengaruh fluksi jangkar terhadap fluksi medan hanyalah sebatas mendistorsinya saja tanpa mempengaruhi kekuatannya (*cross magnetising*).

b. Untuk beban induktif murni ( $\cos\phi = 0$  lag)

Arus akan tertinggal sebesar 90° dari tegangan. Fluksi yang dihasilkan oleh arus jangkar akan melawan fluksi arus medan. Dengan kata lain reaksi jangkar

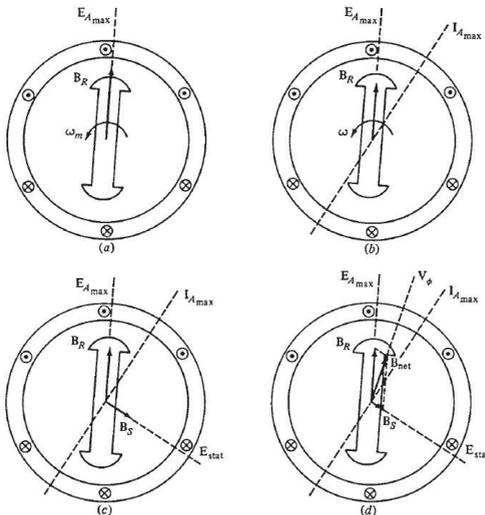
akandemagnetising artinya pengaruh raksi jangkar akan melemahkan fluksi arus medan.

c. Untuk beban kapasitif murni ( $\cos\phi = 0$  lead)

Arus akan mendahului tegangan sebesar 90°. Fluksi yang dihasilkan oleh arus jangkar akan searah dengan fluksi arus medan sehingga reaksi jangkar yang terjadi akan *magnetising* artinya pengaruh reaksi jangkar akan menguatkan fluksi arus medan.

d. Untuk beban tidak murni (induktif/kapasitif)

Pengaruh reaksi jangkar akan menjadi sebagian *magnetising* dan sebagian *demagnetising*. Saat beban adalah kapasitif, maka reaksi jangkar akan sebagian *distortif* dan sebagian *magnetising*. Sementara itu saat beban adalah induktif, maka reaksi jangkar akan sebagian *distortif* dan sebagian *demagnetising*. Namun pada prakteknya beban umumnya adalah induktif.



Gambar 2.33. Model Reaksi Jangkar

Keterangan gambar :

- a) Medan magnet yang berputar akan menghasilkan tegangan induksi  $E_{amax}$
- b) Tegangan resultan menghasilkan arus lagging saat generator berbeban induktif
- c) Arus stator menghasilkan medan magnet sendiri  $BS$  dan tegangan  $E_{stat}$  pada belitan stator
- d) Vektor penjumlahan  $BS$  dan  $BR$  yang menghasilkan  $B_{net}$  dan penjumlahan  $E_{stat}$  dan  $E_{amax}$  menghasilkan  $V\Phi$  pada outputnya.

Bentuk permukaan rotor silinder yang hampir rata membentuk celah udara yang seragam sehingga reluktansi yang terjadi akan sama besar di setiap arah. Oleh karena itu pengaruh reaksi jangkar dapat diasumsikan menjadi satu reaktansi saja yaitu reaktansi sinkron  $X_S$ .

Bila rotor generator diputar, tegangan induksi  $E_a$  akan dibangkitkan pada belitan statornya. Bila beban dihubungkan pada terminal generator, maka pada belitan stator akan mengalir arus jangkar  $I_a$ . Medan magnet stator (fluksi jangkar) akan mempengaruhi medan magnet yang berasal dari rotor (fluksi rotor) dan merubah tegangan fasanya. Oleh karena itu untuk mendapatkan tegangan terminal yang konstan medan magnet rotor harus diperbesar dengan meningkatkan arus medan  $I_f$ . Seiring bertambahnya arus medan  $I_f$  maka akan diperoleh fluksi resultan yang sama besar dengan fluksi awal.

Pada Gambar 2.33.a, dilukiskan rotor dua kutub yang berada didalam stator tiga fasa. Dalam hal ini tidak ada beban yang terhubung ke terminal generator. Medan magnet  $BR$  akan membangkitkan tegangan induksi  $E_{amax}$ . Pada saat generator beroperasi tanpa beban, tidak ada arus

jangkar yang mengalir sehingga  $E_{amax}$  akan sama dan sefasa dengan tegangan terminal  $\phi V$ .

Pada saat beban induktif dihubungkan ke terminal generator, arus jangkar  $I_a$  akan lagging secara vektoris dari tegangan terminal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.33.b. Arus yang mengalir pada stator akan menghasilkan medan magnet pada belitan tersebut, dimana arahnya ditentukan oleh kaidah tangan kanan seperti yang terlihat pada Gambar 2.33.c. Medan magnet stator  $B_S$  akan menghasilkan tegangan stator  $E_{stat}$ .

Dengan adanya dua tegangan ini  $E_{amax}$  dan  $E_{stat}$ , maka tegangan total pada fasa yang sama adalah penjumlahan dari tegangan induksi  $E_{amax}$  dan tegangan stator  $E_{stat}$  seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.33.d. Dalam persamaan dapat ditulis sebagai berikut :

$$V\phi = E_{A\ max} + E_{stat} [ \text{Volt} ] \dots\dots\dots ( 2.4 )$$

Dan besarnya medan magnet total  $B_{net}$  adalah penjumlahan dari medan magnet rotor  $B_R$  dengan medan magnet stator  $B_S$ , yaitu seperti yang ditunjukkan pada Persamaan berikut :

$$B_{net} = B_R + B_S [ \text{Tesla} ] \dots\dots\dots ( 2.5 )$$

Bila  $E_{amax}$  dan  $BR$  sefasa, maka medan magnet resultan  $B_{net}$  akan sefasa dengan  $V\phi$

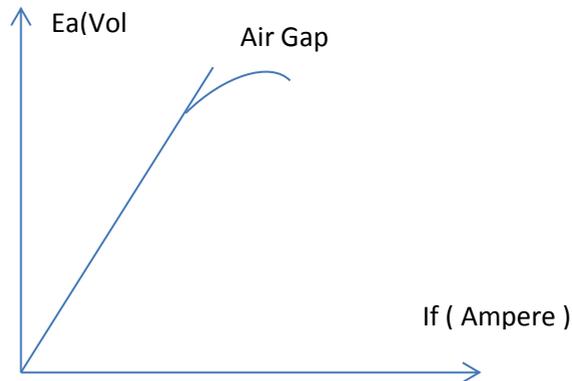
### 2.7.3 Identifikasi dan Penentuan Parameter Generator Sinkron

Parameter generator sinkron dibutuhkan pada dasarnya untuk menggambarkan rangkaian ekivalen beserta karakteristiknya. Parameter yang dibutuhkan pada penulisan

ini yaitu impedansi sinkron  $Z_s$ , reaktansi sinkron  $X_s$ , tahanan jangkar urutan positif  $r_{j1}$ , tahanan jangkar urutan negatif  $r_{j2}$  dan tahanan jangkar urutan nol  $r_{j0}$ . Sehingga untuk memperoleh parameter-parameter tersebut maka diperlukan identifikasi ataupun pengujian-pengujian sebagai berikut :

a. Pengujian Beban Nol

Pengujian beban nol terkait dengan karakteristik beban nol yaitu hubungan antara tegangan induksi  $E_a$  dengan arus penguat/eksitasi  $I_f$ . Pada pengujian beban nol, rotor generator diputar pada kecepatan nominal dan terminal jangkar dalam keadaan terbuka. Arus medan  $I_f$  diatur bertahap dari nol hingga diperoleh harga tegangan induksi  $E_a$  berkisar kurang lebih 125% dari tegangan nominal generator. Pada kondisi ini arus jangkar  $I_a=0$  dan tegangan induksi  $E_a=V_t$ .



Gambar 2.34. Karakteristik Beban Nol

Dari gambar diatas tampak bahwa kurva tersebut memiliki garis linear sampai diperoleh harga saturasi dari arus medan. Pada keadaan belum jenuh (unsaturated), rangka (frame) besi mesin sinkron memiliki reluktansi yang

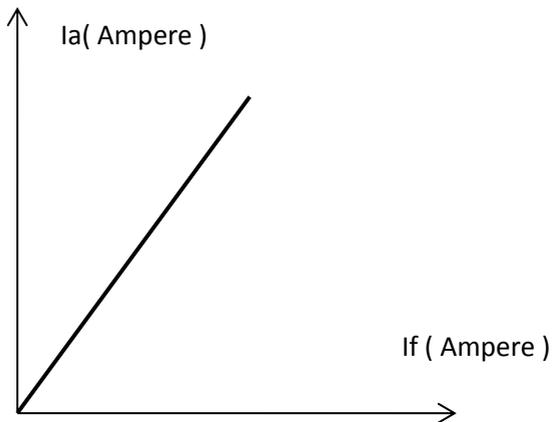
besarnya beberapa ribu kali lebih kecil dibandingkan dengan reluktansi celah udara, sehingga pada mulanya hampir semua ggl melalui celah udara, sebagai akibatnya fluksmeningkat secara linear. Ketika pada akhirnya inti besi tersebut jenuh, reluktansinya meningkat secara dramatis, sehingga peningkatan fluks jauh lebih lambat daripada peningkatan ggl (hal ini yang digambarkan oleh kurva melengkung). Garis linear pada kurva tersebut disebut juga sebagai karakteristik celah udara (air gap).

#### b. Pengujian Hubung Singkat

Pengujian hubung singkat terkait dengan karakteristik hubung singkat yaitu hubungan antara arus jangkar  $I_a$  dengan arus penguat/eksitasi  $I_f$ . Pada pengujian hubung singkat, mula-mula arus medan dibuat menjadi nol dan terminal jangkar dihubung singkat melalui amperemeter. Lalu arus jangkar diperbesar dengan menaikkan secara bertahap arus medan hingga tercapai nilai arus jangkar maksimum yang masih aman sekitar 125% - 150% dari arus nominal jangkar. Karakteristik hubung singkat merupakan garis lurus. Pada kondisi hubung singkat, tegangan terminal  $V_t = 0$  dan arus jangkar sama dengan arus hubung singkat ( $I_a = I_{sc}$ ), sehingga dapat dirumuskan :

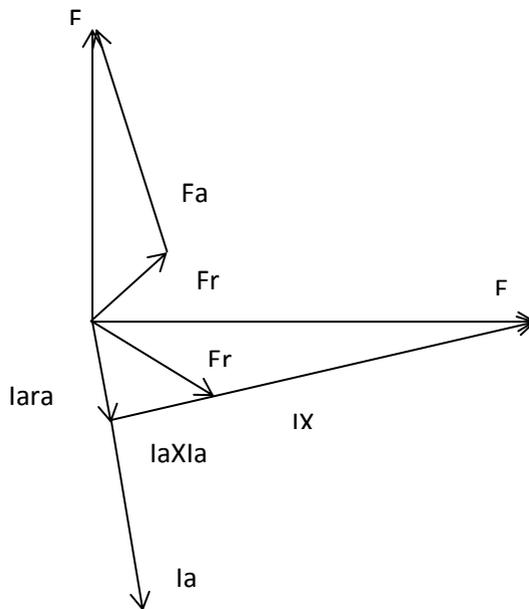
$$I_a = I_{sc} = \frac{E_a}{r_a + jX_s} \dots\dots\dots (2.6)$$

Pembacaan arus jangkar atau arus hubung singkat dengan pengaruh variasi medan eksitasi digambarkan dalam sebuah kurva yang ditunjukkan oleh Gambar 2.34.



Gambar 2.34. Karakteristik Hubung Singkat

Kurva tersebut merupakan kurva linier karena tidak adanya efek saturasi. Saat tegangan terminal sama dengan nol, lebih dari 90% tegangan jatuh muncul akibat reaktansi sinkron. Pada Gambar 2.8 terlihat fasor untuk kondisi hubung singkat dimana terlihat arus jangkar  $I_a$  tertinggal dari tegangan induksi  $E_a$  hampir 90°, dengan kata lain reaksi jangkar yang dihasilkan  $I_a$  hampir sepenuhnya melawan fluks medan yang menghasilkan tegangan induksi  $E_a$ . Kedua fluksi yang berlawanan tersebut menjaga fluksi resultan celah udara pada tingkat yang rendah sehingga tidak terjadi efek saturasi.



Gambar 2.35. Diagram Fasor Saat Hubung Singkat

### c. Menentukan Impedansi dan Reaktansi Sinkron

Jika tidak terjadi saturasi, impedansi sinkron  $Z_s$  akan bernilai tetap. Secara aktual  $Z_s$  bervariasi saat terjadi saturasi. Untuk menghitung voltage regulation, hanya satu nilai  $Z_s$  yang digunakan. Umumnya nilai  $Z_s$  yang digunakan tersebut diperoleh dari arus hubung singkat  $I_{sc}$  yang terbesar dan besar tegangan induksi beban nol  $E_{bn}$  saat terjadi saturasi dengan arus medan penguat/eksitasi  $I_f$  yang sama. Nilai impedansi sinkron  $Z_s$  dan reaktansi sinkron  $X_s$  per fasa dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.7 dan Persamaan 2.8 berikut ini :

$$Z_s = \frac{E_{bn}}{I_{sc}} \dots\dots\dots (2.7)$$

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - r_a^2} \dots\dots\dots (2.8)$$

dimana :

$E_{bn}$  = Tegangan induksi beban nol saat terjadi saturasi pada arus medan tertentu (Volt)

$I_{sc}$  = Arus hubung singkat pada arus medan yang sama saat saturasi (A)

$Z_s$  = Impedansi sinkron (ohm)

$X_s$  = Reaktansi sinkron (ohm)

$r_a$  = Tahanan jangkar (ohm)

#### d. Pengukuran Tahanan Jangkar Arus Searah

Pengukuran tahanan jangkar arus searah (rdc) biasanya menggunakan metode voltmeter-ampere-meter. Dimana kumparan jangkar dihubungkan kepada sumber tegangan arus searah (dc) ketika mesin dalam keadaan diam lalu diukur besar arus yang mengalir pada kumparan jangkar. Pengukuran dengan menggunakan sumber tegangan dc dimaksudkan bahwa reaktansi kumparan jangkar akan menjadi nol selama proses pengukuran. Arus yang mengalir pada kumparan jangkar diatur pada nilai nominalnya supaya kumparan berada pada temperatur operasi normal. Jika kumparan jangkar terhubung bintang dan netral tidak tersedia maka besar tahanan jangkar arus searah (rdc) per fasa dapat dihitung dengan Persamaan 2.9. Sedangkan jika kumparan jangkar terhubung delta maka tahanan jangkar arus searah (rdc) per fasa dapat dihitung dengan Persamaan 2.10 seperti berikut :

$$R_{dc} = \frac{V_{dc}}{2I_{dc}} \dots\dots\dots (2.9)$$

$$R_{dc} = \frac{3V_{dc}}{2I_{dc}} \dots\dots\dots (2.10)$$

dimana :

$V_{dc}$  = Tegangan arus searah pada kedua terminal jangkar (Volt)

$I_{dc}$  = Arus searah yang mengalir pada kumparan jangkar (A)

$r_{dc}$  = Tahanan jangkar arus searah (ohm)

Nilai tahanan jangkar arus searah ( $r_{dc}$ ) merupakan nilai pendekatan karena saat kumparan jangkar mengalirkan arus bolak-balik maka nilai tahanan jangkar akan meningkat karena adanya efek kulit. Sehingga perlu diketahui nilai tahanan jangkar efektif yang dapat dihitung dengan Persamaan 2.11 berikut ini :

$$r_{\text{aefektif}} = k.r_{dc} \dots\dots\dots (2.11)$$

dengan  $k = 1,2$  s/d  $1,3$

#### e. Pengukuran Impedansi Jangkar Urutan Negatif

Saat generator dialiri arus urutan negatif, perilaku putaran medan stator akan mempunyai arah yang berlawanan dengan putaran rotor tetapi jumlah putaran tetap sama dengan jumlah putaran rotor (kecepatan sinkron) sehingga terdapat slip sebesar 200 % atau  $s = 2$ . Atau dikatakan bahwa arus urutan negatif yang mengalir pada kumparan jangkar akan menghasilkan medan putar dengan kecepatan sinkron relative terhadap kumparan jangkar

dengan arah putar berlawanan dengan medan putar yang dihasilkan dari arus urutan positif. Dan medan putar ini berputar pada dua kali kecepatan sinkronnya relatif terhadap kumparan medan sehingga akan menyebabkan arus dengan frekuensi dua kali lipat dari frekuensi semula terinduksi pada kumparan kumparan medan (eksitasi). Dimana arus induksi ini akan cenderung mengalir pada kumparan rotor terus melalui damper winding dimana reaktansi paling rendah. Jika dibiarkan terus meningkat maka akan menyebabkan pemanasan berlebihan pada rangka rotor.

Dimana untuk mendapatkan arus urutan negatif yaitu dengan cara menukar dua fasa kumparan jangkar generator uji dengan dua fasa kumparan jangkar generator injeksi sementara itu arus medan tidak diberikan pada generator uji. Dari rangkaian pengukuran pada impedansi jangkar urutan negatif per fasa  $Z_{j2}$  dapat dihitung dengan Persamaan 2.12 berikut :

$$Z_{j2} = \frac{V_t}{I_a \sqrt{3}} \dots\dots\dots (2.12)$$

dimana :

$V_t$  = Tegangan terminal line to line (Volt)

$I_a$  = Arus jangkar (A)

$Z_{j2}$  = Impedansi jangkar urutan negatif (ohm)

Sedangkan reaktansi jangkar urutan negatif per fasa  $X_{j2}$  dan tahanan jangkar urutan negatif per fasa  $r_{j2}$  dapat dihitung dengan Persamaan 2.13 dan Persamaan 2.14 berikut :

$$X_{j2} = Z_{j2} \cdot \sin \varphi_2 \dots\dots\dots (2.13)$$

$$r_{j2} = Z_{j2} \cdot \cos \varphi_2 \dots\dots\dots (2.14)$$

dimana :

$X_{j2}$  = Reaktansi jangkar urutan negatif (ohm)

$r_{j2}$  = Tahanan jangkar urutan negatif (ohm)

$\cos 2\phi$  = Faktor daya kumparan jangkar urutan negatif

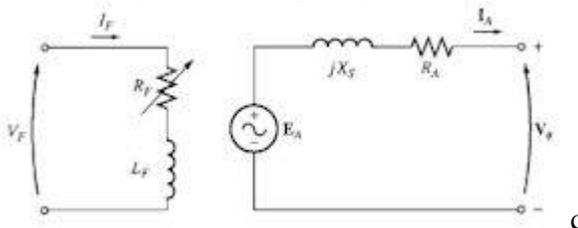
f. Pengukuran Impedansi Jangkar Urutan Nol

Saat generator dialiri arus urutan nol, medan putar akan sama dengan nol dan dapat dikatakan tidak ada fluksi yang terinduksi ke kumparan rotor sehingga dianggap tidak ada arus yang terinduksi pada kumparan rotor.

Dimana untuk menghasilkan medan putar sama dengan nol maka kumparan jangkar generator uji dihubungkan secara seri dan disuplai dari salah satu fasa sumber tegangan tiga fasa injeksi sementara itu rotor generator yang uji tidak diputar dan eksitasi tidak diberikan.

### 2.7.4 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron

Rangkaian ekuivalen per fasa dari suatu generator sinkron dapat dilihat seperti pada Gambar 2.9.



Gambar 2.36. Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron  
dimana :

$E_a$  = Tegangan induksi (Volt)

$V_t$  = Tegangan terminal generator (Volt)

$V_f$  = Tegangan Eksitasi (Volt)

$R_f$  = Tahanan belitan medan (ohm)

$L_f$	= Induktansi belitan medan (H)
$R_{adj}$	= Tahanan variabel (ohm)
$R_a$	= Tahanan jangkar (ohm)
$X_{ar}$	= Reaktansi reaksi jangkar (ohm)
$X_{la}$	= Reaktansi bocor belitan jangkar (ohm)
$I_a$	= Arus jangkar (Ampere)

Karena tegangan yang dibangkitkan generator sinkron adalah tegangan bolak-balik, maka biasanya diekspresikan dalam bentuk fasor.

### 2.7.5 Diagram Fasor Generator Sinkron

Karena tegangan yang dibangkitkan pada generator sinkron adalah tegangan arus bolak-balik, maka tegangan tersebut biasanya digambarkan dalam bentuk fasor. Fasor terdiri atas dua bagian yaitu besaran skalar (*magnitude*) dan besar sudut, dimana hubungan keduanya digambarkan dalam dua dimensi. Bila  $E_a$ ,  $V_t$ ,  $jX_{s}I_a$  dan  $I_a R_a$  digambar dalam satu gambar yang menunjukkan hubungan antara besaran-besaran tersebut, maka hasil dari gambar ini dinamakan Diagram Fasor.