

## GENERATOR ARUS SEARAH

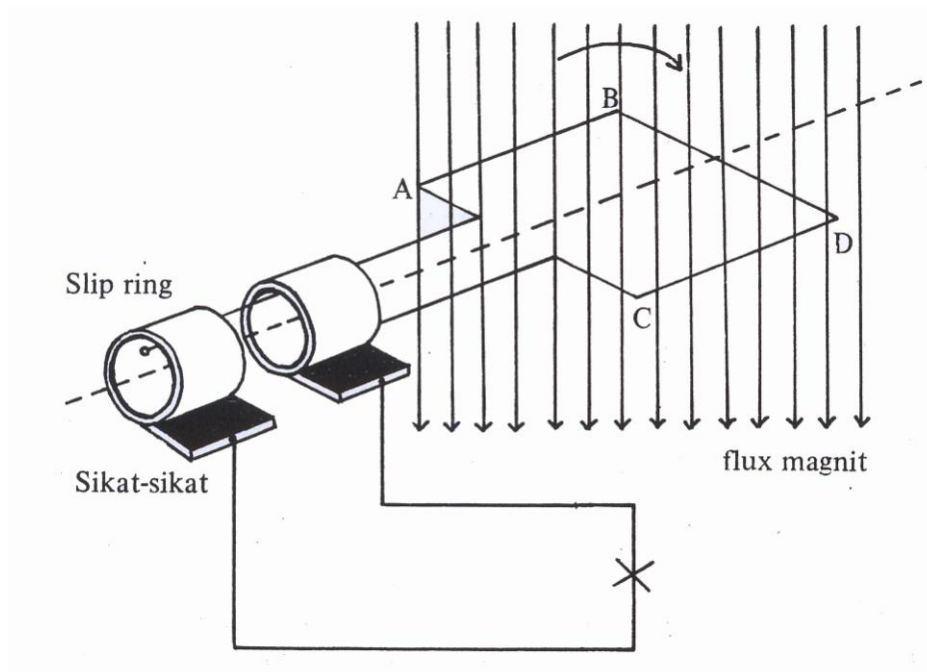
### 1. PRINSIP KERJA GENERATOR ARUS SEARAH

#### 1.1. TERBENTUKNYA GGL PADA KUMPARAN BERPUTAR

Generator adalah suatu mesin yang mengubah tenaga mekanik menjadi tenaga listrik. Tenaga mekanik di sini digunakan untuk memutar kumparan kawat penghantar dalam medan magnet ataupun sebaliknya memutar magnet diantara kumparan kawat penghantar. Tenaga mekanik dapat berasal dari tenaga panas, tenaga potensial air, motor diesel, motor bensin dan bahkan ada yang berasal dari motor listrik.

Bahwa terbentuknya GGL pada generator berdasarkan percobaan Faraday, yang mengatakan bahwa kumparan yang digerakkan dalam medan magnet, di dalam kawat kumparan tersebut akan terbentuk GGL.

Gambar 3-1, menggambarkan prinsip terbentuknya GGL pada kumparan yang berputar. Kumparan ABCD terletak dalam medan magnet serba sama, sedemikian rupa sehingga sisi AB dan CD terletak tegak lurus pada arah flux magnet.



GAMBAR 3-1

Kumparan berputar dalam medan magnet

Kumparan ABCD diputar dengan kecepatan sudut yang tetap terhadap sumbu putarnya yang sejajar dengan sisi AB dan CD. Sesuai dengan hukum Faraday GGL induksi yang terbentuk pada AB dan CD besarnya sesuai dengan perubahan flux magnet yang dipotong kumparan ABCD tiap detik yakni :

$$e(t) = -\frac{d\phi}{dt} \text{ volt} \dots\dots\dots 3-1$$

di mana :

$e(t)$  = GGL induksi sesaat yang terbentuk.

$d\phi$  = perubahan flux magnet yang dipotong – Weber

$dt$  = perubahan waktu – dalam satuan detik.

Bila kumparan berputar dengan kecepatan sudut yang tetap dalam medan magnet serba sama, maka besarnya flux magnet yang dipotong setiap saat adalah :

$$\phi(t) = \phi_{\max} \cos \omega t \dots\dots\dots 3-2$$

Bila persamaan 3-2 dimasukkan persamaan II-1 maka diperoleh besarnya GGL induksi sesaat.

$$e(t) = E_{\max} \sin \omega t \dots\dots\dots 3-3$$

di mana :

$e(t)$  = GGL induksi sesaat terbentuk : volt

$E_{\max}$  = GGL induksi maksimum terbentuk. : volt

$\phi(t)$  = flux magnet yang dipotong pada saat tertentu : Weber

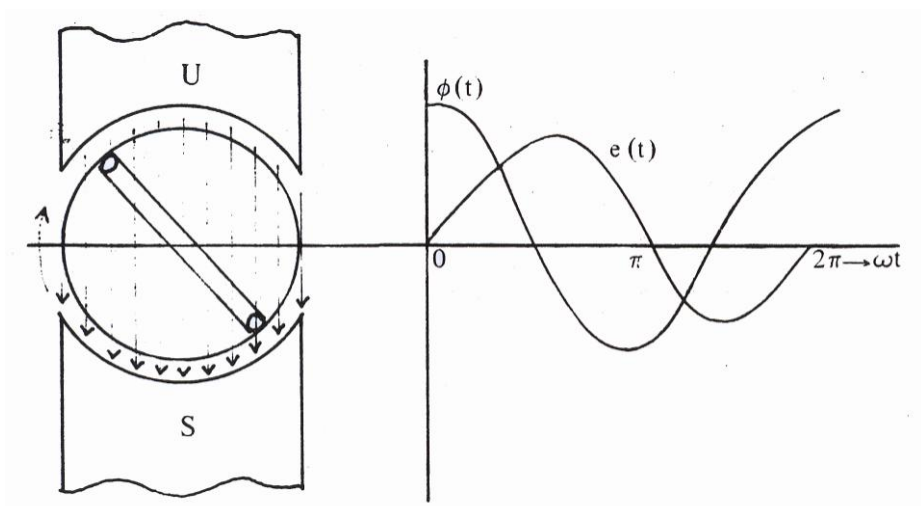
$\phi_{\max}$  = flux magnet maksimum yang dipotong : Weber

$\omega$  = kecepatan sudut berputarnya kumparan : rad/detik

$t$  = waktu tertentu : detik

Sesuai dengan hukum tangan kanan, maka GGL induksi yang terbentuk pada sisi kumparan di daerah utara dan selatan arahnya berlawanan. Sedangkan tepat pada kedudukan kumparan tegak lurus flux magnet, GGL induksi yang terbentuk pada masing-masing sisi kumparan adalah nol.

Dari persamaan 3-2 dan 3-3 maka penggambaran GGL induksi yang terbentuk pada setiap sisi kumparan akan terlihat seperti pada gambar 3-2.



GAMBAR 3-2  
Bentuk flux magnet dan GGL terbentuk pada sisi kumparan

## 1.2. PRINSIP PENYEARAHAN

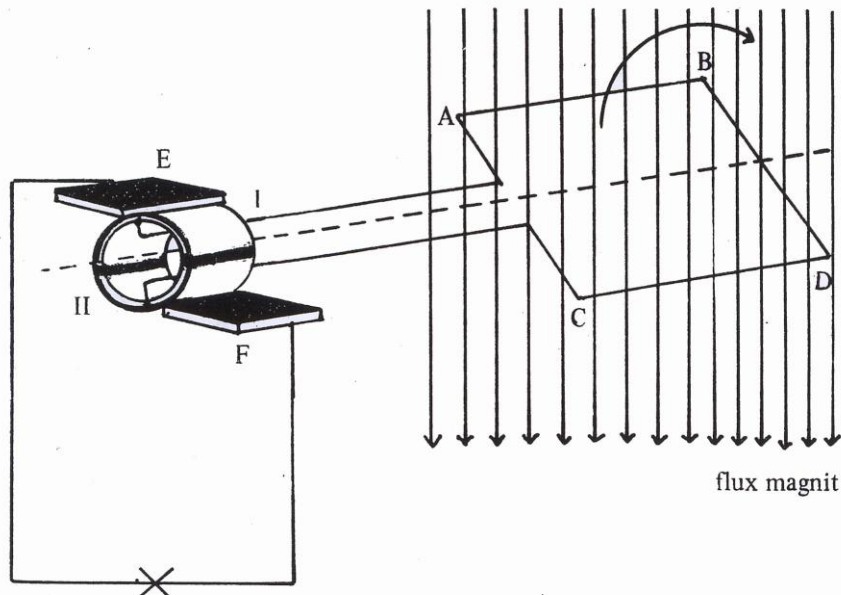
Pada generator arus searah, penyearahan dilakukan secara mekanis dengan menggunakan alat yang disebut komutator atau lamel. Komutator pada prinsipnya mempunyai bentuk yang sama dengan cincin seret, hanya cincin tersebut dibelah dua kemudian disatukan kembali dengan menggunakan bahan isolator.

Masing-masing belahan komutator dihubungkan dengan sisi kumparan tempat terbentuknya GGL. Komutator I dihubungkan dengan sisi AB dan komutator II dihubungkan dengan sisi CD.

Perhatikan gambar 3-3.

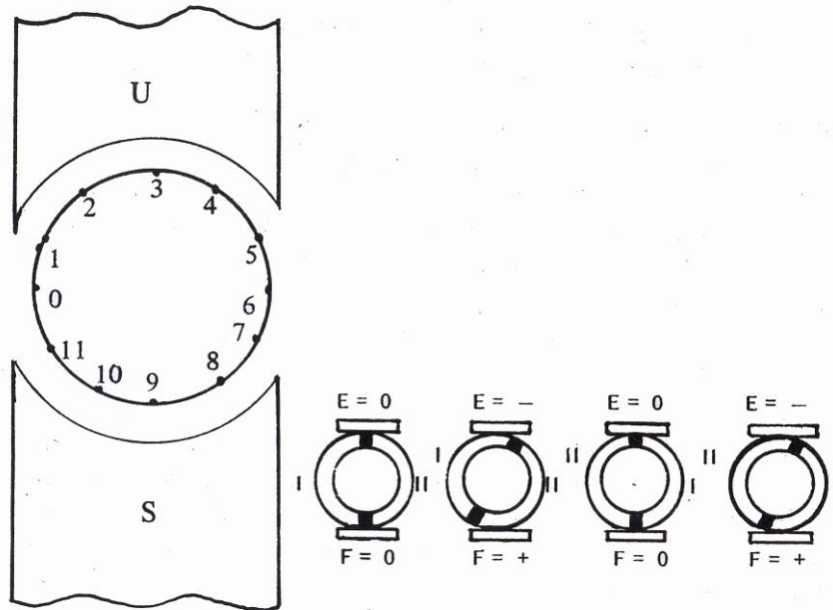
Jadi kalau kumparan ABCD berputar, maka sikat-sikat akan bergesekan dengan komutator-komutator secara bergantian. Peristiwa bergesekan/perpindahan sikat-sikat dari satu komutator ke komutator berikutnya disebut dengan istilah komutasi.

Peristiwa komutasi inilah yang menyebabkan terjadinya penyearahan yang prinsipnya adalah sebagai berikut :



GAMBAR 3-3  
Prinsip Penyearahan

- Mula-mula sisi AB berada pada kedudukan 0 dan sisi CD berada pada kedudukan yang berlawanan yaitu 6. Pada saat ini tentu saja pada sisi AB dan CD tidak terbentuk GGL. Pada saat ini pula sikat-sikat berhubungan dengan bagian kedua komutator. Ini berarti sikat-sikat berpotensi nol.
- Kumparan berputar terus yang dalam ini sisi AB bergerak di daerah utara (dari kedudukan 0 menuju 3) dan sisi CD bergerak di daerah selatan.

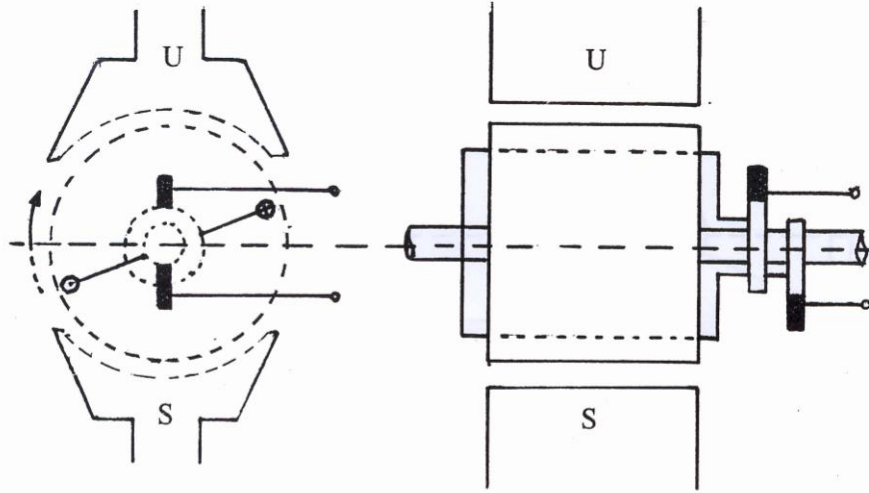


GAMBAR 3 – 4

Sesuai dengan hukum tangan kanan, maka GGL yang terbentuk pada sisi AB arahnya menjauhi kita ( $\otimes$ ), sedangkan pada sisi CD terbentuk GGL yang arahnya mendekati kita ( $\ominus$ ). Kalau dijanjikan bahwa arus listrik di dalam sumber mengalir dari negatif (-) ke positif (+), maka pada saat itu komutator I dan sikat E berpotensi positif. Sedangkan komutator II dan sikat F berpotensi positif.

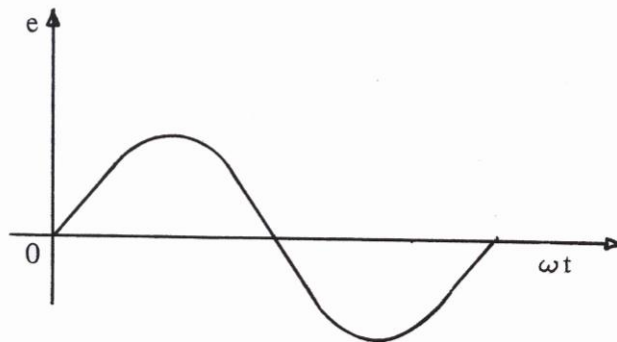
- c) Saat berikut sisi kumparan AB sampai pada kedudukan 6 dan CD pada kedudukan 12, maka pada saat ini sikat-sikat berpotensi nol karena GGL induksi yang terbentuk pada masing-masing sisi kumparan adalah nol, sikat-sikat hanya berhubungan dengan isolator.
- d) Kumparan ABCD bergerak terus, sisi AB bergerak di daerah selatan ( dari kedudukan 6 menuju 12 ) sehingga GGL yang terbentuk pada sisi kumparan AB arahnya mendekati kita ( $\ominus$ ) sebaliknya pada sisi CD yang bergerak di daerah utara terbentuk GGL yang arahnya menjauhi kita ( $\otimes$ ). Pada saat itu komutator I dan sikat F berpotensi positif sedangkan komutator II dan sikat E berpotensi negatif.

Dari keterangan-keterangan diatas, dapat diambil kesimpulan bahwa *walaupun GGL yang terbentuk pada sisi-sisi kumparan merupakan listrik arus bolak-balik, namun potensial sikat-sikat senantiasa tetap*. Kedudukan di mana GGL yang terbentuk sama dengan nol merupakan garis tegak lurus medan magnet dan melalui sumbu perputaran, disebut garis netral.



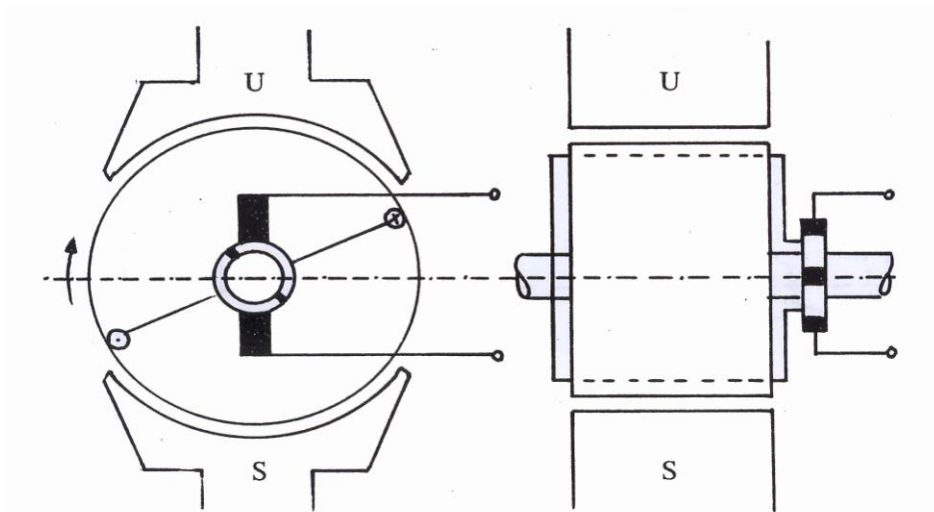
Gambar 3-5 Prinsip terjadinya listrik arus bolak-balik

Apabila rotor berputar, GGL yang timbul berbentuk gelombang sinus.

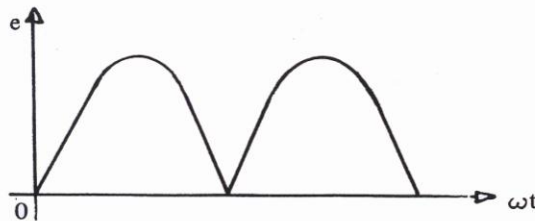


Gambar 3-6. GGL yang timbul pada gambar 3-5

Untuk prinsip terjadinya arus searah perhatikan gambar 3-7



Gambar 3-7. Prinsip terjadinya listrik arus searah dengan penyearah mekanik KOMUTATOR



Gambar 3-8. GGL yang timbul akibat adanya penyearah mekanik (meskipun Searah tetapi masih berpulsa

Untuk prinsip generator arus bolak-balik, pengertiannya lebih sederhana, karena di sini tidak terjadi penyearahan.

Perhatikan gambar 3 – 1.

Sisi–sisi kumparan dihubungkan dengan masing–masing cincin seretnya. Jadi setiap cincin seret senantiasa berhubungan dengan sisi kumparan dan sikat yang sudah tertentu, maka polaritas sikat/cincin seret akan mengikuti arah GGL induksi yang terbentuk. Jika kumparan berputar searah dengan arah putaran jarum jam (lihat gambar), sisi kumparan AB berada di daerah utara (U), maka GGL induksi yang terbentuk

pada sisi AB arahnya menjauhi kita (  $\otimes$  )

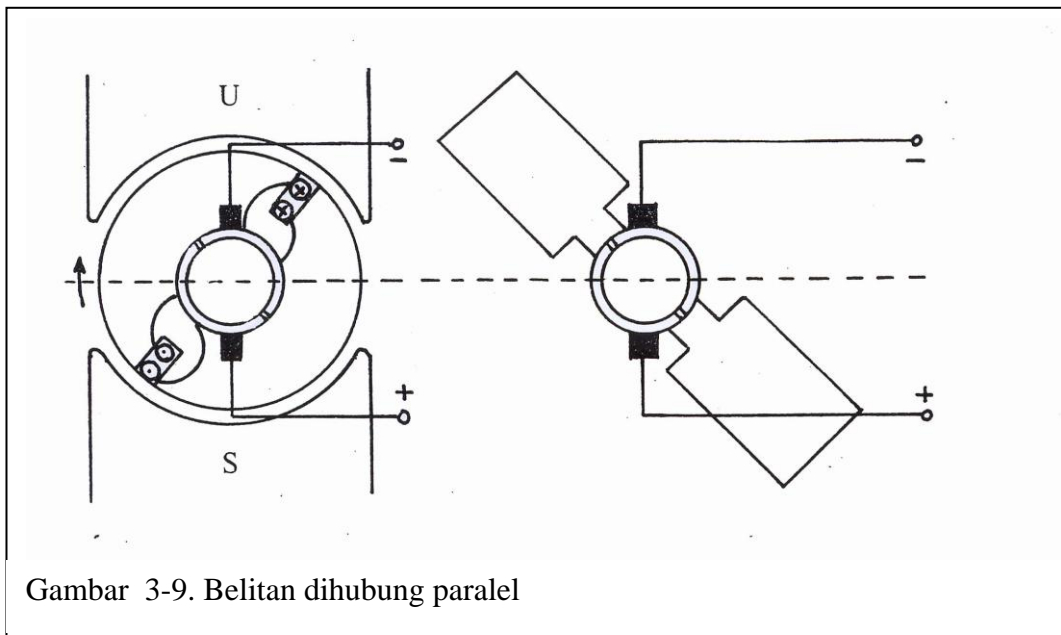
pada sisi CD arahnya mendekati kita (  $\odot$  )

Berarti pada saat itu sikat E berpotensi negatif, sikat F berpotensi positif.

Sebaliknya bila sisi AB berada di daerah selatan ( S ), maka sikat E berpotensi positif, sikat F berpotensi negatif. Ini semua berarti generator menghasilkan arus bolak-balik..Untuk lebih menyederhanakan pengertian perhatikan gambar-gambar berikut :

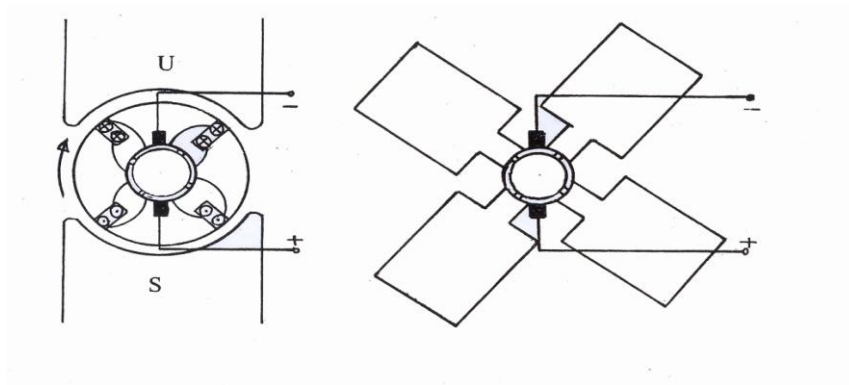
Pada gambar 3 – 9. Belitan dihubungkan paralel , hal ini tidak akan dapat merubah bentuk gelombang dari GGL yang terjadi. Bentuk gelombang dari GGL yang terjadi tetap sama dengan gambar 3 – 8. Dalam hal ini perbedaannya bahwa belitan yang dihubung paralel kemampuan arusnya lebih besar walau tegangan yang terjadi sama.

Untuk memperhalus pulsa dari GGL yang timbul, komutatornya diperbanyak. Gambar 3 – 10 adalah mesin sederhana dari generator arus searah yang komutatornya 4, belitan disambung seri.

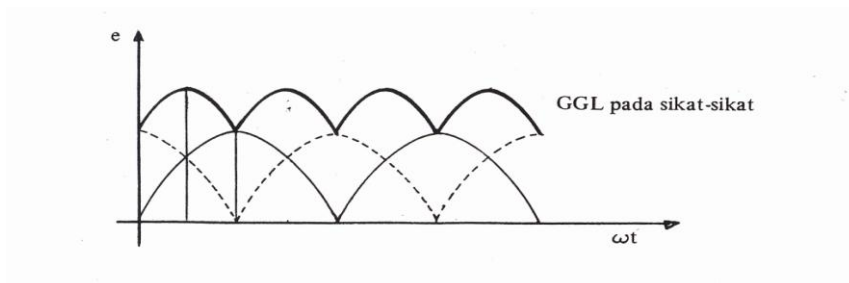


### 1.3. BAGIAN – BAGIAN TERPENTING DARI GENERATOR ARUS SEARAH

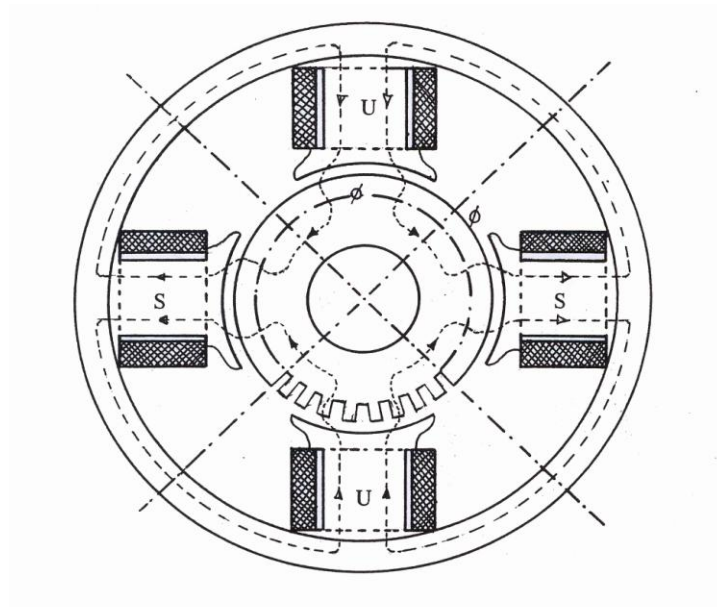
Pada mesin listrik ada bagian yang diam (stator) dan ada bagian yang berputar (rotor). Untuk generator arus searah yang termasuk *stator* adalah badan (body), magnet, sikat-sikat. Sedangkan *rotornya* jangkar & lilitannya.



Gambar 3-10. Mesin sederhana dari generator arus searah komutator = 4  
 Belitan dihubung seri  
 GGL yang timbul pulsanya lebih halus (riplanya lebih kecil)

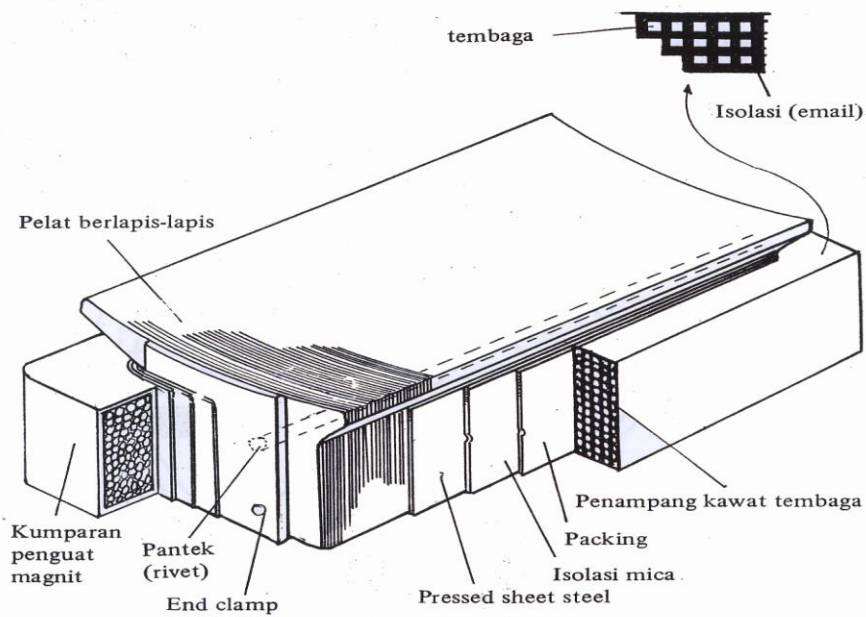


Gambar 3-11. Gikat dari sikat-sikat generator arus searah, komutator = 4,  
 Belitan dihubung seri

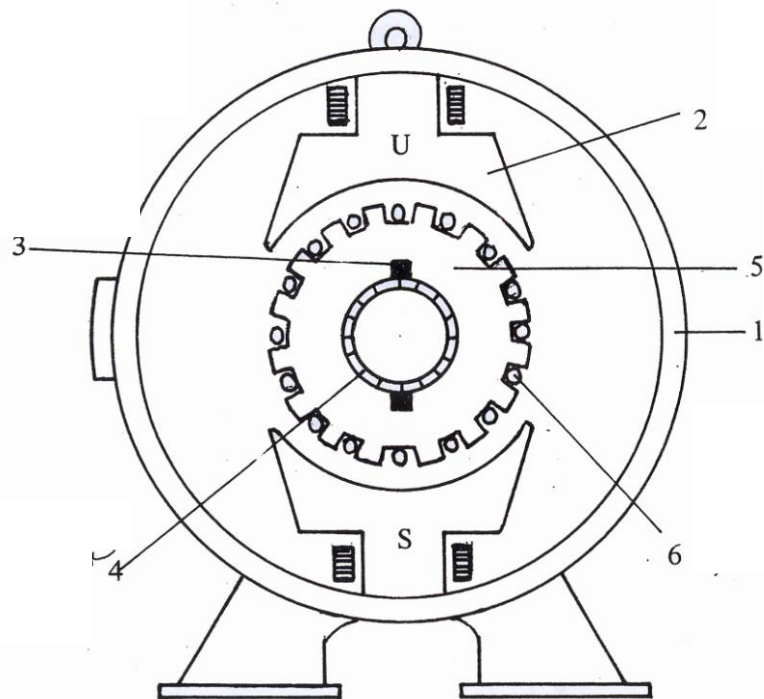


Gambar 3-12. Badan (body) generator arus searah.  
 Perhatikan jalannya garis-garis gaya magnet





Gambar 3-13. Inti kutub magnet dan kumparannya



Gambar 3-14. Bagian-bagian terpenting dari generator arus searah

### (1) **Badan generator**

Fungsi utama dari badan generator adalah sebagai bagian dari tempat mengalirnya flux magnet yang dihasilkan kutub–kutub magnet, karena itu badan generator dibuat dari bahan ferromagnetik. Disamping itu badan generator ini berfungsi untuk meletakkan alat–alat tertentu dan melindungi bagian–bagian mesin lainnya. Oleh karena itu badan generator harus dibuat dari bahan yang kuat. Untuk memenuhi kedua persyaratan pokok di atas, maka umumnya badan generator untuk mesin–mesin kecil dibuat dari besi tuang. Sedangkan generator yang besar umumnya dibuat dari plat–plat campuran baja. Biasanya pada generator terdapat “*papan nama*” ( name plate ) yang bertuliskan spesifikasi umum atau data–data teknik dari generator. Dengan adanya papan nama tersebut dapatlah diketahui beberapa hal pokok yang perlu diketahui dari generator tersebut. Selain papan nama tersebut pada badan generator juga terdapat “*Kotak ujung*” (terminal box) yang merupakan tempat–tempat ujung–ujung lilitan penguat magnet dan lilitan jangkar.

Ujung–ujung lilitan jangkar ini sebenarnya tidak langsung dari lilitan jangkar tetapi merupakan ujung kawat penghubung lilitan jangkar dengan melalui komutator dan sikat–sikat. Dengan adanya kotak ujung ini maka akan memudahkan dalam pergantian susunan lilitan penguat magnet dan memudahkan pemeriksaan kerusakan yang mungkin terjadi pada lilitan jangkar maupun lilitan penguat tanpa membongkar mesin.

Tanda–tanda dari ujung lilitan tersebut setiap pabrik atau negara mempunyai normalisasi huruf tertentu. Huruf–huruf pada terminal menurut sistem VEMET & VDE :

Bagian mesin/lilitan	VEMET	VDE
Lilitan jangkar	B - b	A - B
Lilitan shunt	F - f	C - D
Lilitan deret	S - s	E - F
Lilitan penguat asing	E - e	I - K

### (2) **Inti kutub magnet dan lilitan penguat magnet**

Sebagaimana diketahui bahwa flux magnet yang terdapat pada generator arus searah dihasilkan oleh kutub–kutub magnet buatan yang dibuat dengan prinsip elektromagnetisme. Lilitan penguat magnet berfungsi untuk mengalirkan arus listrik untuk terjadinya proses elektromagnetisme.

Untuk lebih jelasnya perhatikan gambar 3 – 13.

Adapun aliran flux magnet seperti ditunjukkan pada gambar 3 – 12. Dari kutub Utara melalui celah udara, terus mengalir ke jangkar, ke kutub Selatan (setelah lebih dahulu melalui celah udara ), kemudian kembali ke kutub Utara melewati badan generator.

### (3) **Sikat –sikat**

Fungsi dari sikat–sikat adalah untuk jembatan bagi aliran arus dari lilitan jangkar dengan beban. Disamping itu sikat–sikat memegang peranan penting

untuk terjadinya komutasi. Agar gesekan antara komutator–komutator dan sikat tidak mengakibatkan ausnya komutator, maka sikat harus lebih lunak daripada komutator. Biasanya dibuat dari bahan arang (coal).

#### (4) **Komutator**

Sebagaimana diketahui komutator berfungsi sebagai penyearah mekanik, yang bersama-sama dengan sikat-sikat membuat suatu kerja sama yang disebut komutasi. Supaya menghasilkan penyearahan yang lebih baik (lebih rata) maka komutator yang digunakan hendaknya dalam jumlah yang besar. Dalam hal ini setiap belahan (segmen) komutator tidak lagi merupakan bentuk separo dari cincin, tetapi sudah berbentuk lempeng–lempeng. Diantara setiap lempeng (segmen komutator) terdapat bahan isolator.

##### **Komutator terdiri dari :**

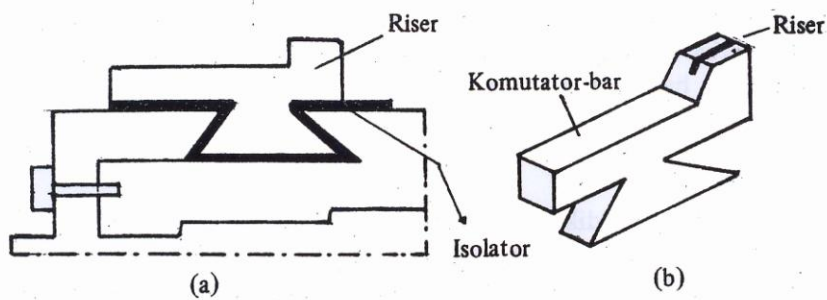
- a. *Komutator bar*, merupakan (tempat) terjadinya pergesekan antara komutator dengan sikat- sikat.
- b. *Riser*, merupakan bagian yang menjadi tempat hubungan komutator dengan ujung dari juluran lilitan jangkar.

Perhatikan Gambar 3 – 15.

Telah dijelaskan bahwa disamping sebagai penyearah mekanik maka komutator juga berfungsi untuk mengumpulkan GGL induksi yang terbentuk pada sisi-sisi kumparan. Oleh karena itu komutator dibuat dari bahan konduktor, dalam hal ini digunakan dari campuran tembaga.

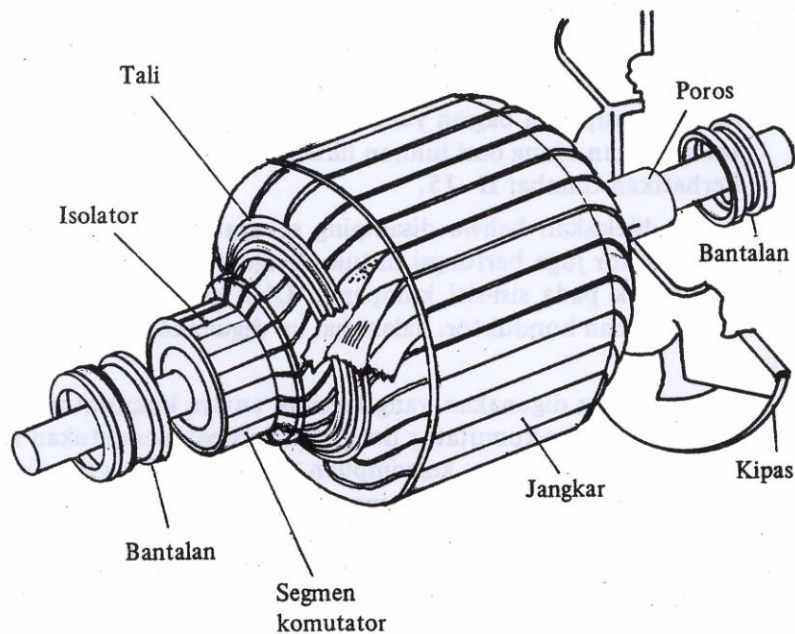
Isolator yang digunakan yang terletak antara komutator-komutator dan komutator-komutator dengan as (poros) menentukan kelas dari generator berdasarkan kemampuan terhadap suhu yang timbul dalam mesin tersebut. Jadi disamping sebagai isolator terhadap listrik, maka isolator yang digunakan harus mampu terhadap panas tertentu. Berdasarkan jenis isolator yang digunakan, dari kemampuan panas inidikenal kelas-kelas sebagai berikut :

- a) Kelas A : katun, sutera alam, sutera buatan, kertas
- b) Kelas B : serat asbes, serat gelas.
- c) Kelas C : mika, gelas, kwarsa, porselin, keramik.



Gambar 3 - 15

- a). Pemasangan komutator.      b). segmen komutator

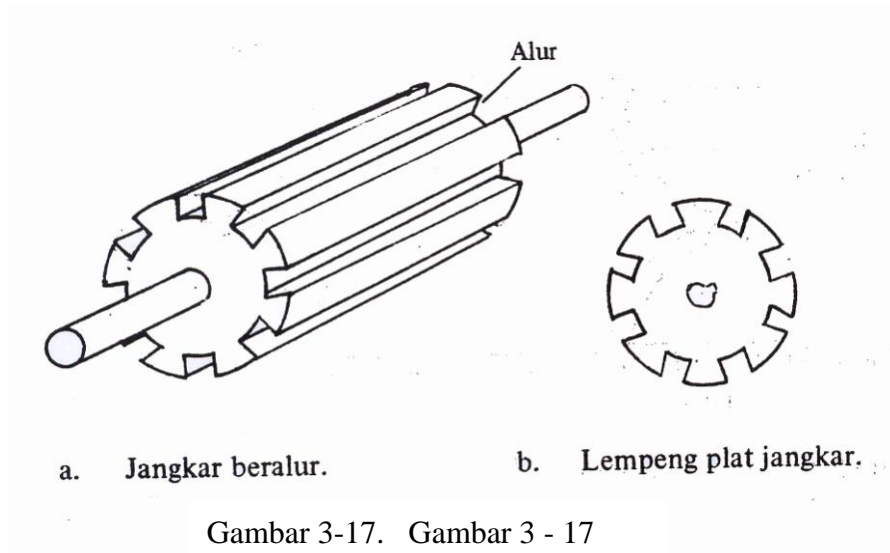


Gambar 3-16. Jangkar & Lilitannya

**(5) Jangkar**

Jangkar yang umum digunakan dalam generator arus searah adalah yang berbentuk silinder yang diberi alur-alur pada permukaannya untuk tempat melilitkan kumparan-kumparan tempat terbentuknya GGL induksi. Jangkar dibuat dari bahan ferromagnetik, dengan maksud agar kumparan-kumparan (lilitan jangkar) terletak dalam daerah yang induksi magnitnya besar, supaya GGL induksi yang terbentuk dapat bertambah besar. Seperti halnya inti kutub magnet, maka jangkar dibuat dari bahan berlapis-lapis tipis untuk mengurangi panas yang terbentuk karena adanya arus liar. Bahan yang digunakan untuk jangkar ini sejenis campuran baja silikon.

Pada umumnya alur tidak hanya diisi satu sisi kumparan, tetapi diisi lebih dari satu sisi kumparan yang disusun secara berlapis.



#### (6) Lilitan jangkar

Di muka telah dijelaskan bahwa lilitan jangkar pada generator arus searah berfungsi sebagai tempat terbentuknya GGL induksi

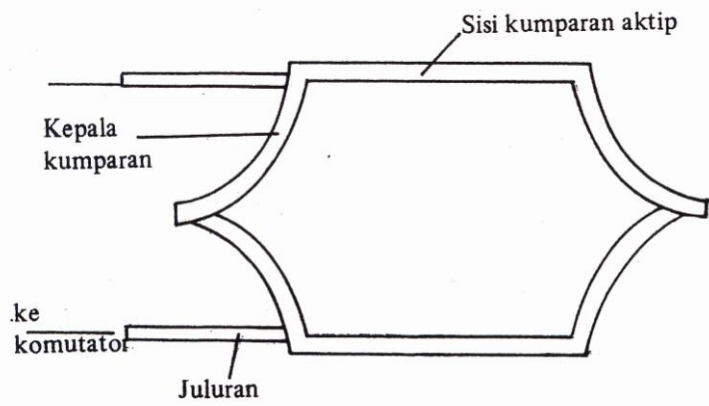
Pada prinsipnya kumparan terdiri dari :

- Sisi kumparan aktif*, yaitu bagian sisi kumparan yang terdapat dalam alur jangkar yang merupakan bagian yang aktif ( terjadi GGL induksi sewaktu generator bekerja ). Setiap sisi kumparan biasanya terdiri dari beberapa buah kawat.
- Kepala kumparan*, yaitu bagian dari kumparan yang terletak di luar alur yang berfungsi sebagai penghubung satu sisi kumparan aktif dengan sisi kumparan aktif lain dari kumparan tersebut.
- Juluran*, yaitu bagian ujung kumparan yang menghubungkan sisi aktif dengan komutator.

Perhatikan Gambar 3 – 18.

Sisi kumparan pada prinsipnya berhubungan dengan sebuah komutator pada bagian risernya.

Bahan yang digunakan sebagai kumparan adalah kawat email yaitu kawat yang berisolasi sejenis zat kimia.



Gambar 3-18. Kumparan jangkar

Sebagaimana telah dijelaskan bahwa pada lilitan jangkar akan terbentuk GGL induksi. Hal ini disebabkan lilitan jangkar tersebut nantinya akan berputar dalam medan magnet apabila generator bekerja.

GGL induksi yang terbentuk pada kumparan-kumparan jangkar dari suatu generator, biasa disebut dengan GGL jangkar dan dinyatakan dengan simbol  $E$ . Perhitungan besarnya GGL jangkar ( $E$ ) akan diuraikan pada bagian selanjutnya.

Apabila kita tinjau tegangan output ( tegangan jepit ), maka akan lebih rendah daripada GGL jangkar ( $E$ ). Waktu ada arus yang mengalir pada belitan jangkar ( $I_a$ ) maka tahanan jangkar ( $R_a$ ) akan mengakibatkan terjadinya kerugian tegangan dalam jangkar sebesar  $I_a R_a$  sehingga tegangan output ( tegangan jepit ) dapat ditulis :

$$E_k = E - I_a R_a \dots\dots\dots 3-4$$

Di mana :

- $E_k$  = adalah tegangan output ( tegangan jepit , tegangan terminal ).
- $E$  = adalah GGL jangkar
- $I_a$  = arus jangkar
- $R_a$  = tahanan jangkar

## 2. JENIS – JENIS GENERATOR ARUS SEARAH

Telah dijelaskan bahwa kutub magnet yang digunakan pada generator arus searah biasanya merupakan kutub magnet buatan, yang dibuat secara elektromagnetisme.

Berdasarkan sumber arus kemagnitan ( arus penguat ) bagi kutub magnet buatan tersebut generator arus searah dapat dibedakan.

1. Generator dengan penguat terpisah, bila arus kemagnitan diperoleh dari sumber tenaga listrik arus searah di luar generator tersebut.
2. generator dengan penguat sendiri, bila arus kemagnitan bagi kutub – kutub magnet berasal dari generator itu sendiri.

## 2.1. Generator dengan penguat terpisah

Generator dengan penguat terpisah hanya dipakai dalam keadaan tertentu dan jarang terjadi. Dengan terpisahnya sumber arus kemagnitan dari generator, berarti besar kecilnya arus kemagnitan tidak terpengaruh oleh nilai-nilai arus ataupun tegangan generator.

Prinsip rangkaian listrik generator dengan penguat terpisah diperlihatkan pada Gambar 3 – 19..

Dari rangkaian listrik generator penguat terpisah diperoleh persamaan-persamaan :

$$\text{Persamaan arus} \quad : \quad I_m = \frac{E_m}{I_m} \dots\dots\dots 3-5$$

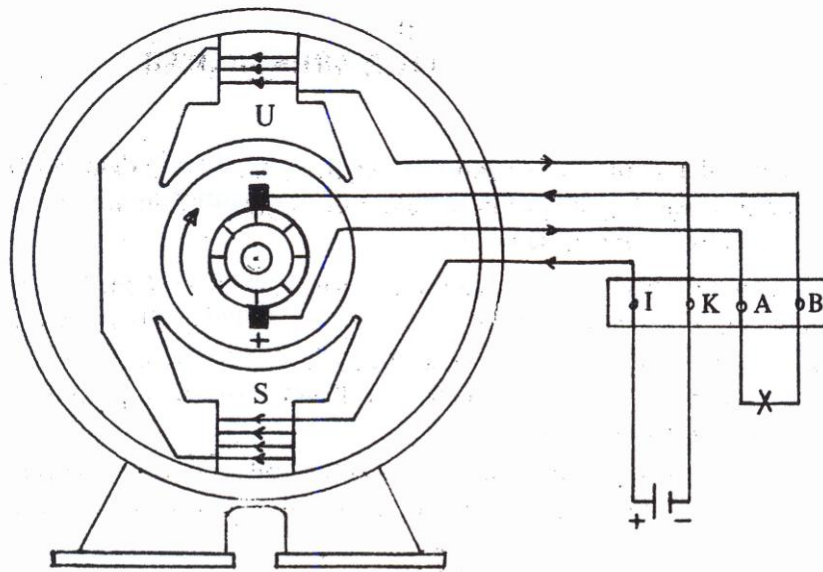
$$I_a = I_L \dots\dots\dots 3-6$$

$$\text{Persamaan tegangan} \quad : \quad E = E_k + I_a R_a + 2\Delta E \dots 3-7$$

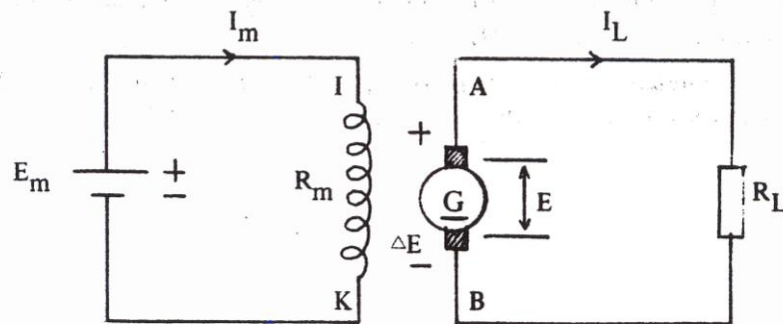
$$E_k = I_L R_L \dots\dots\dots 3-8$$

Dimana :

- E = GGL induksi yang terbentuk pada lilitan jangkar.
- Ek = tegangan jepit (u atau V).
- Em = tegangan sumber penguat magnit.
- AE = kerugian tegangan pada sikat.
- Im = arus kemagnitan (arus penguat magnit).
- Ia = arus jangkar.
- IL = arus beban.
- Ra = tahanan lilitan jangkar.
- Rm = tahanan lilitan penguat.



Gambar 3-19a.. Generator penguat terpisah



Gambar 3-19 b. Rangkaian listrik generator penguat terpisah

## 2.2. Generator penguat sendiri

Karena generator penguat sendiri memperoleh arus kemagnitan dari dalam generator itu sendiri, maka dengan sendirinya arus kemagnitan akan terpengaruh oleh nilai-nilai tegangan dan arus yang terdapat pada generator. Dalam hal ini medan magnet yang terdapat menimbulkan GGL mula-mula, ditimbulkan oleh adanya *remanensi magnet* (magnet tinggal) pada kutubnya-kutubnya.

Pengaruh nilai-nilai tegangan dan arus generator terdapat arus penguat tergantung cara bagaimana hubungan lilitan penguat magnet dengan lilitan jangkar.

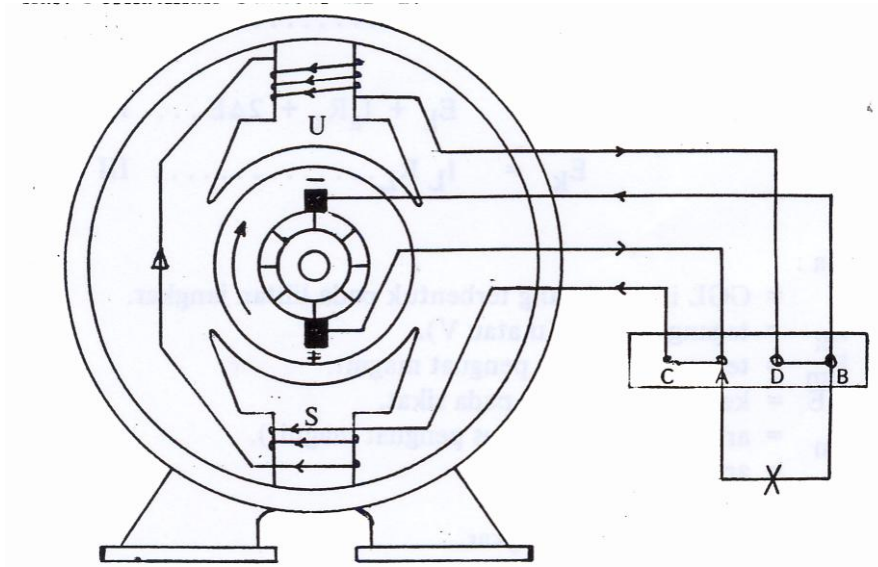


Karena itu berdasarkan hubungan lilitan penguat magnet dengan lilitan jangkar generator penguat sendiri ini dibedakan atas :

- a. Generator shunt.
- b. Generator seri.
- c. Generator kompon (campuran).

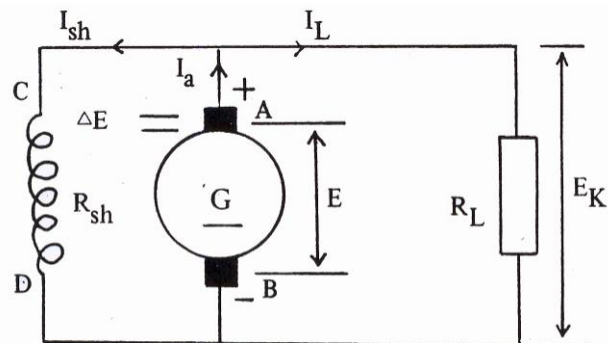
### 2.2.1. Generator shunt

Generator shunt yaitu generator penguat sendiri di mana lilitan penguat magnetnya dihubungkan shunt (pararel) dengan lilitan jangkar. Perhatikan Gambar 3-20.



Gambar 3 – 20 a. Generator Shunt

Prinsip rangkaian listrik generator shunt ditunjukkan pada gambar 3-20 b.



Gambar 3 – 20 b. Rangkaian listrik generator shunt

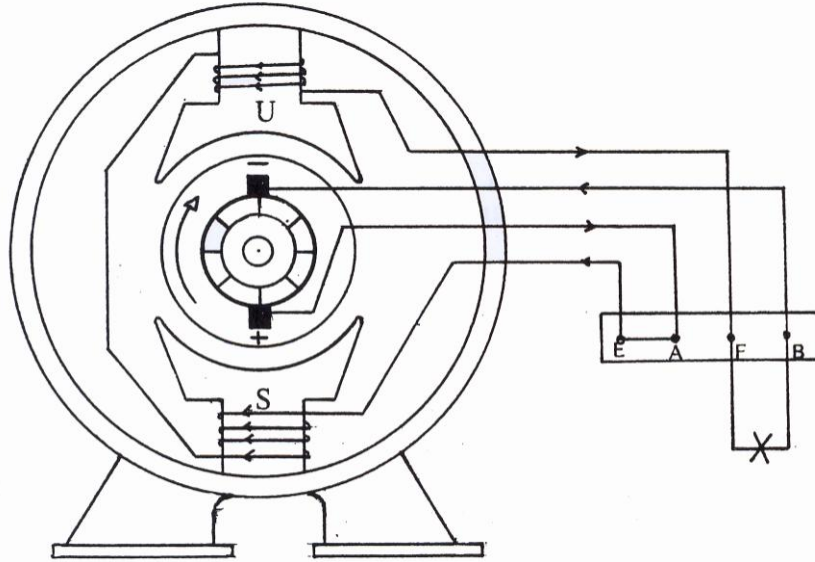
Karena lilitan penguat magnet ( $R_{sh}$ ) pararel dengan lilitan jangkar maka berdasarkan rangkaian listriknya diperoleh :

Persamaan arus	$I_a$	$= I_L + I_{sh}$ .....	3-9.
Persamaan tegangan	$E$	$= E_k + I_a R_a + 2 \Delta E$ .....	3-10.
	$E_k$	$= I_{sh} \cdot R_{sh}$ .....	3-11.

### 2.2.2. Generator seri

Generator seri, generator penguat sendiri di mana lilitan penguat magnet dihubungkan seri dengan lilitan jangkar.

Perhatikan Gambar 3-21 a.



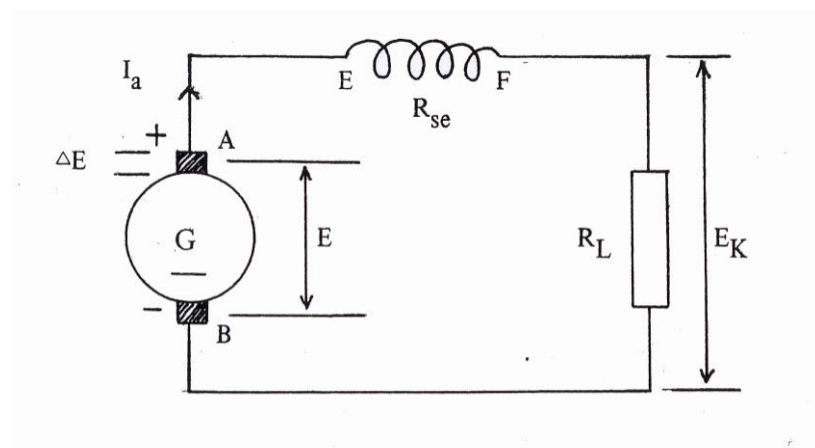
Gambar 3 – 21 a. Generator Seri

Berdasarkan rangkaian listrik didapatkan :

Persamaan arus  $I_a = I_{se} = I_L$  .....3-12.

Persamaan tegangan  $E = E_k + I_a R_a + I_{se} R_{se} + 2 \Delta E$  .....3-13

$E = E_k + I_a (R_a + R_{se}) + 2 \Delta E$  ..... 3-14



Gambar 3 – 21 b. Rangkaian listrik generator seri

### 2.2.3. Generator kompon (campuran)

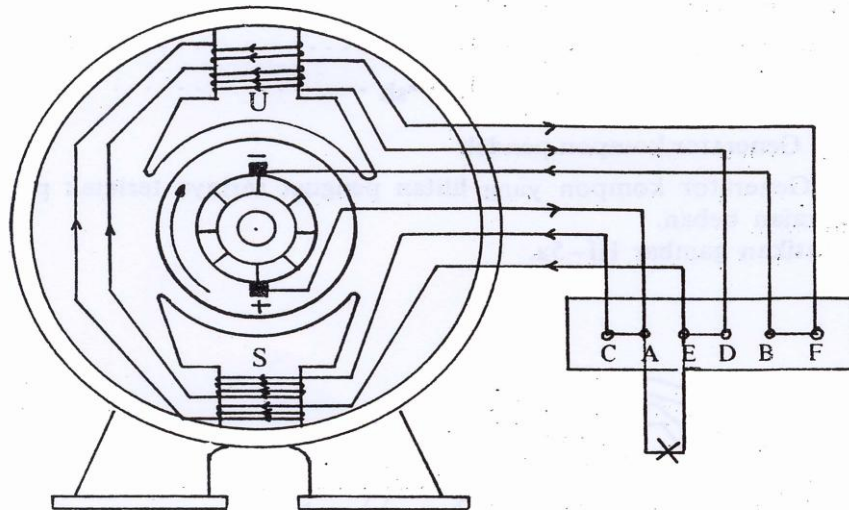
Generator kompon ialah generator arus searah yang lilitan penguat magnitnya terdiri dari lilitan penguat shunt dan lilitan penguat seri.

Karena ada 2 kemungkinan cara meletakkan lilitan penguat isinya, maka berdasarkan letak lilitan penguat seri, generator kompon dibedakan :

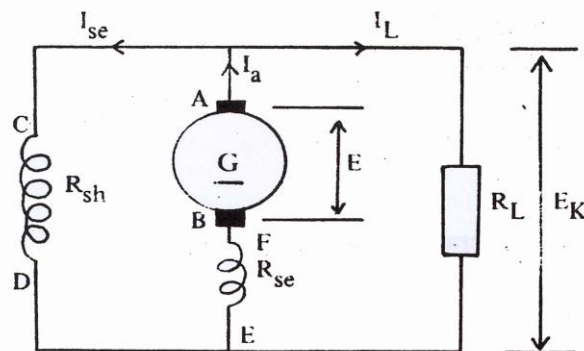
1. Generator kompon panjang.
2. Generator kompon pendek.

#### 2.2.3.1. Generator kompon panjang

Generator kompon yang lilitan penguat serinya terletak pada rangkaian Jangkar.



Gambar 3 – 22 a. Generator Kompon panjang



Gambar 3 – 22 b. Rangkaian listrik Generator kompon panjang

Perhatikan Gambar 22a.

Dari rangkaian listriknya diperoleh :

Persamaan arus  $I_{se} = I_a$  ..... 3-15

$I_a = I_L + I_{sh}$  ..... 3-16

Persamaan Tegangan  $E = E_k + I_a (R_a + R_{se}) + 2\Delta E$  ..... 3-17

$E = I_{sh}R_{sh} + I_a(R_a + R_{se}) + 2\Delta E$  ..... 3-18

Dari rangkaian listriknya diperoleh :

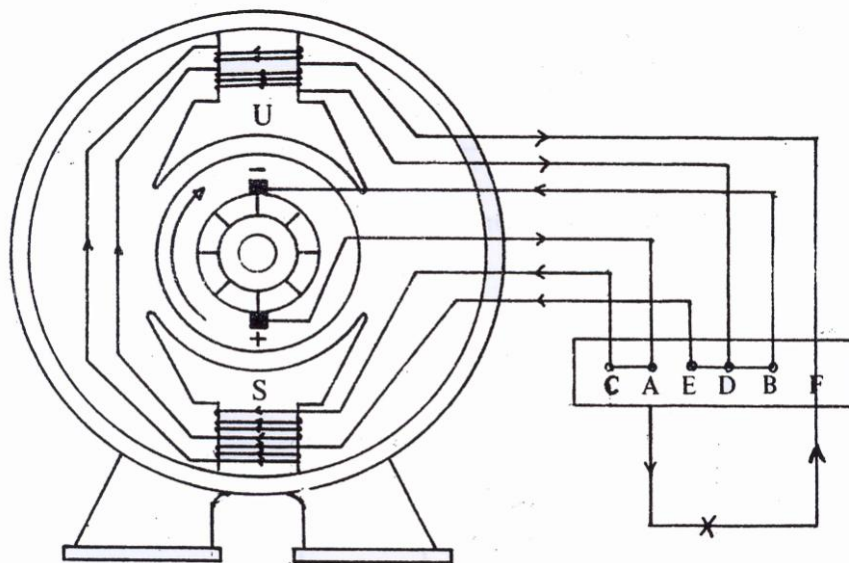
Persamaan  $I_{se} = I_L$  ..... 3-19

$I_a = I_L + I_{sh}$  ..... 3-20

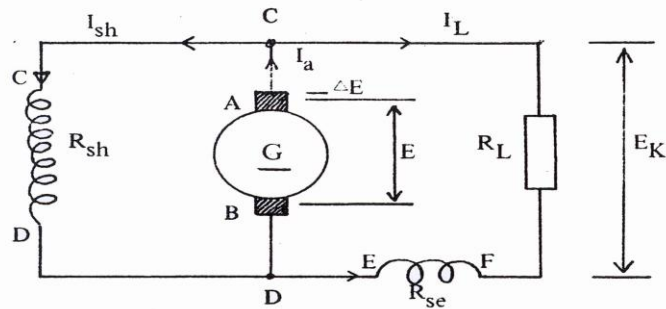
### 2.2.3.2. Generator kompon pendek

Generator kompon yang lilitan penguat serinya terletak pada rangkaian beban.

Perhatikan gambar 3-23a.



Gambar 3 – 23 a. Generator Kompon pendek



Gambar 3 – 23 b. Rangkaian listrik Generator kompon pendek

Dari rangkaian listrik diperoleh :

Persamaan arus	$I_{se} = I_L$ .....	3-21
	$I_a = I_L + I_{sh}$ .....	3-22
		3-23
Persamaan tegangan	$E = E_k + I_a R_a + I_{se} R_{se} + 2\Delta E$ .....	3-24
	$E = I_a R_a + I_{sh} R_{sh} + 2\Delta E$ .....	

### 3. LILITAN JANGKAR & PERHITUNGAN BESAR - BESARAN LISTRIK PADA GENERATOR ARUS SEARAH

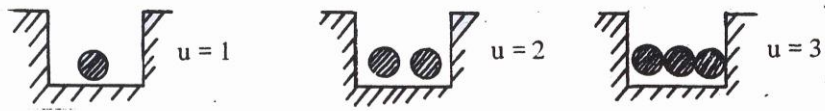
#### 3.1. PENGERTIAN – PENGERTIAN

Lilitan jangkar merupakan bagian yang penting pada mesin arus searah. Pada generator arus searah, lilitan jangkar merupakan *tempat terjadinya GGL*. Sedangkan pada motor arus searah berfungsi untuk *tempat timbulnya torsi*.

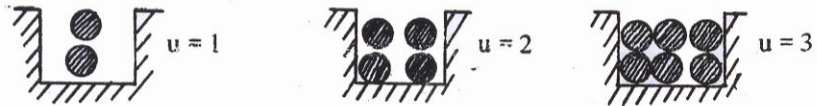
Sebuah kumparan jangkar didalamnya ada beberapa lilitan. Andaikata banyaknya kawat tiap sisi kumparan dinyatakan dengan  $Z_s$ , banyaknya sisi kumparan pada jangkar S, maka banyaknya kawat pada jangkar tersebut adalah :

$$Z = S Z_s \dots\dots\dots 3-25.$$

Biasanya tiap-tiap kutub mempunyai 8 sampai dengan 18 alur. Karena kumparan diinginkan yang banyak sedang jumlah alur sudah tertentu, maka kumparan – kumparan diletakkan di dalam alur *secara berlapis*. Di dalam tiap lapis biasanya diisi 1–3 sisi kumparan. Jumlah sisi kumparan tiap lapis dinyatakan dengan simbol U.



Gambar 3 – 24. Lilitan single layer (satu alur ditempati 1 lapis)



Gambar 3 – 25. Lilitan dobel layer (satu alur ditempati 2 lapis)

Andaikata jumlah sisi kumparan tiap – tiap lapis dinyatakan dengan U, jumlah alur dinyatakan dengan symbol G maka,

$$S = 2 UG \text{ untuk lilitan double layer.}$$

Tiap – tiap sisi kumparan dihubungkan dengan sisi kumparan dari kumparan yang lain melalui komutator, sehingga semua kumparan dihubungkan seri dan merupakan rangkain tertutup. Pada tiap – tiap komutator dihubungkan dua sisi kumparan. Apabila jumlah komutator dinyatakan dengan symbol K,

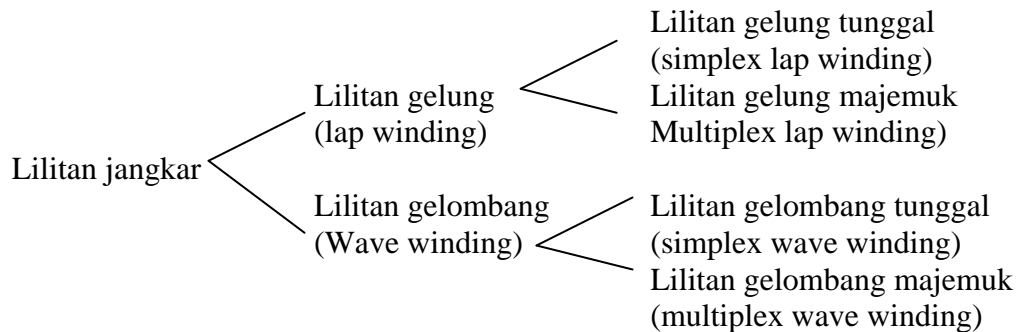
$$K = \frac{S}{2} \dots\dots\dots 3-27$$

$$\text{Untuk lilitan double layer} \quad K = U \cdot G .$$

### 3.2. MACAM – MACAM LILITAN JANGKAR

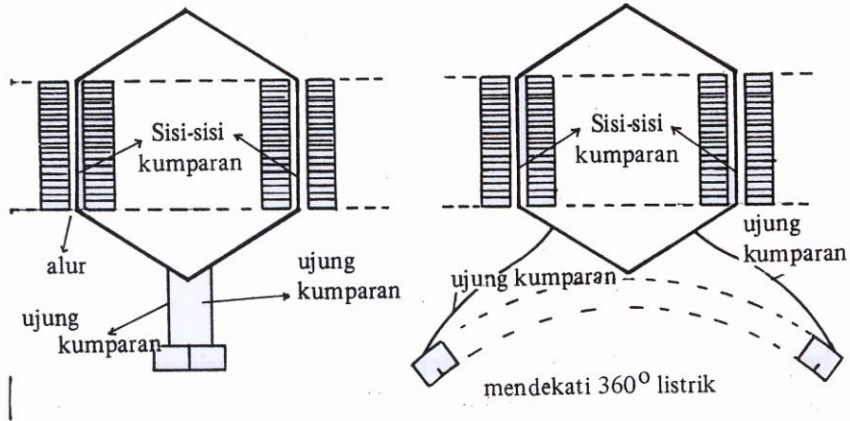
Pada pokoknya ada 2 macam lilitan jangkar yaitu *lilitan gelung* (lap winding) dan *lilitan gelombang* (wave winding).

Perbedaan lilitan gelung dan lilitan gelombang terletak pada *penyambungan* ujung kumparan pada komunator.

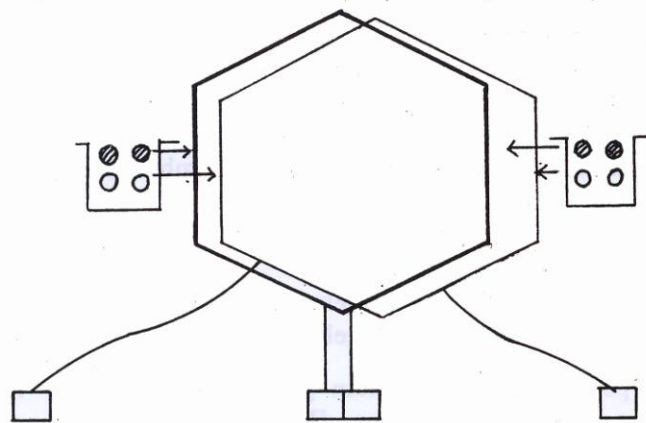


Selain kedua macam lilitan tersebut ada konstruksi lain yang merupakan kombinasi lilitan gelung dan lilitan gelombang, yaitu *lilitan kaki katak* (frog leg winding).

Pada lilitan gelung tunggal, ujung – ujung kumparan disambung pada segment komutator yang berdekatan. Pada lilitan gelombang tunggal ujung – ujung kumparan dihubungkan pada segmen komutator dengan jarak *mendekati 360°* listrik.



Gambar 3 – 26. Lilitan gelung      Gambar 3-27. Lilitan gelombang



Gambar 3 – 28. Lilitan kaki katak

### 3.2.1. LEBAR KUMPARAN

Lebar kumparan dapat dihitung berdasar banyaknya alur yang dilalui oleh kumparan. Jika lebar kumparan dengan banyak alur (slot) yang dilalui oleh kumparan diberi symbol  $Y_G$ .

Lebar kumparan itu kurang atau sama dengan jarak kutub utara ke kutub selatan.

$$Y_G \leq \frac{G}{P} \dots\dots\dots 3-28$$

Dimana  $Y_G$  : Lebar kumparan yang dinyatakan dengan banyaknya alur.



G : jumlah alur  
P : jumlah kutub

Ini berlaku baik pada mesin arus searah dan mesin-mesin arus bolak balik, jarak antara dua sisi kumparan (lebar kumparan) harus sama atau kurang sedikit dengan jarak kutub U dan kutub S terdekat.

**3.2.2. LANGKAH KOMTATOR LILITAN GELUNG**

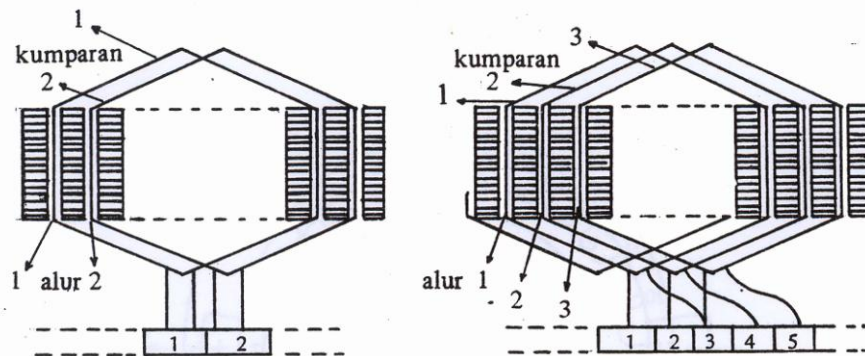
Pada lilitan gelung tunggal ujung-ujung kumparan pertama disambungkan pada komutator yang berdekatan. Ini berarti kumpatan pertama disambungkan pada segment komutator 1 dan 2. Ujung-ujung kumparan kedua disambungkan pada segment komutator 2 dan 3 dan seterusnya, sehingga kumparan terakhir ujungnya kembali pada segment komutator 1.

Oleh sebab itu untuk lilitan gelung tunggal  $Y_c = 1$ .  $Y_c$  adalah langkah komutator.

Bila  $Y_c = 2$ , disebut lilitan gelung duplex

$Y_c = 3$ , disebut lilitan gelung triplex dan seterusnya.

Perhatikan perbedaan antara lilitan gelung tunggal ( $Y_c = 1$ ) dan lilitan gelung duplex pada gambar 3-29 dan 3-30.



Gambar 3 – 29. Lilitan gelung tunggal      Gambar 3-30. Lilitan gelung duplex

**3.2.3. CABANG PARALEL PADA LILITAN GELUNG**

Arus yang mengalir pada lilitan jangkar selalu terbagi pada cabang paralel yang jumlahnya selalu genap. Pada lilitan gelung tunggal, arus yang mengalir pada jangkar terbagi menjadi P cabang paralel (dimana P adalah jumlah kutub)

Pada lilitan gelung duplex, arus terbagi menjadi (2 x P) cabang.

Pada lilitan gelung triplex, arus terbagi menjadi (3 x P) cabang

Pada lilitan gelung quadruplex, arus terbagi menjadi (4 x P) cabang.

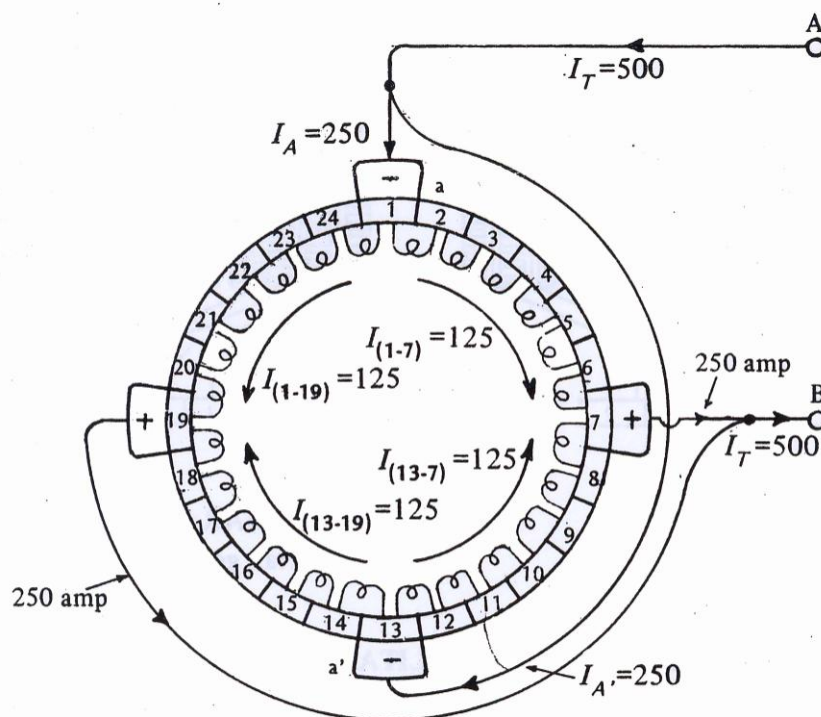
Jadi untuk lilitan gelung  $a = mP$  ..... 3-29

Dimana a : jumlah cabang paralel



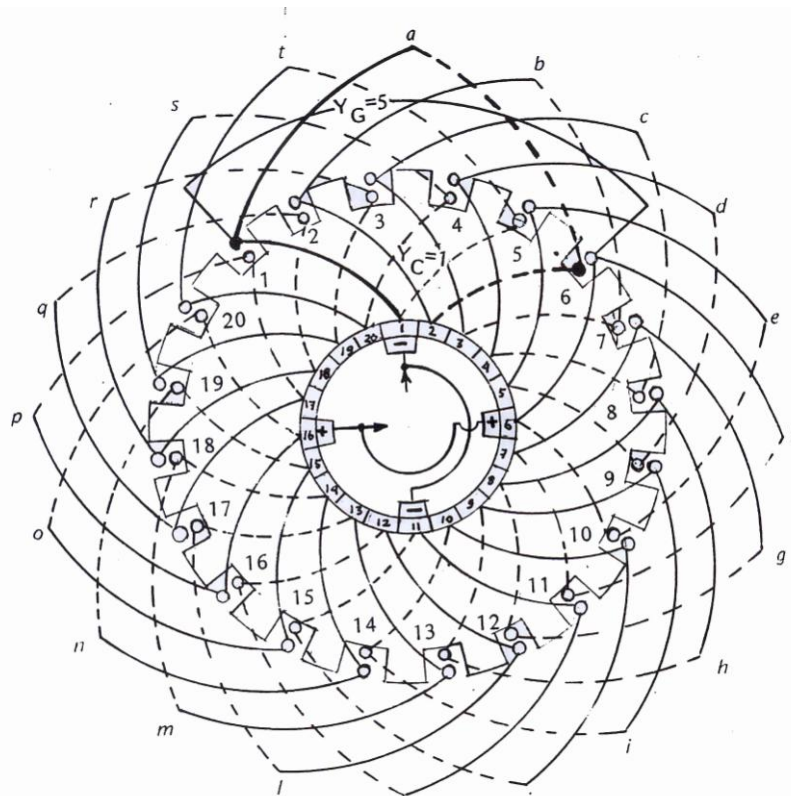
M : majemuknya

Lilitan gelung majemuk untuk menghindari adanya arus yang besar, sehingga komutasi menjadi lebih baik. Agar lebih jelas perhatikan gambar 3-31.



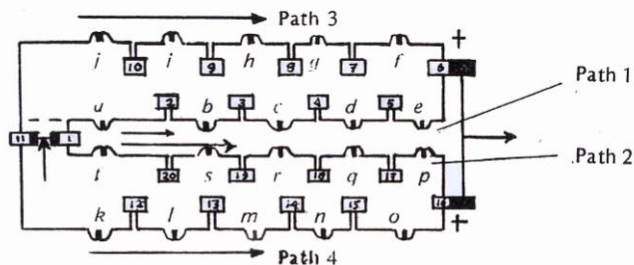
Gambar 3 – 31. Arus terbagi pada 4 cabang paralel, pada lilitan gelung Tunggal dari mesin berkutub 4

GAMBAR 3-31 menggambarkan lilitan gelung tunggal dari mesin berkutub 4 ( $P=4$ ), segmen komutator 20 ( $K=20$ ). Pada gambar tersebut semua segment komutator diberi nomor, dan semua kumparan diberi tanda huruf. Kumparan a diberi garis tebal,  $Y_G=5$ ,  $Y_c=1$ . Perhatikan bagaimana letak dan hubungan sikat-sikatnya.



Gambar 3 – 32. Diagram lilitan dari mesin  $P=4, K=20$

Gambar IV-10 adalah skema arus dari mesin gambar IV-9, menggambarkan kumparan-kumparan disambungkan pada segment-segment komutator dan arah arusnya.



Gambar 3 – 33. Skema arus dari mesin gambar 3-32

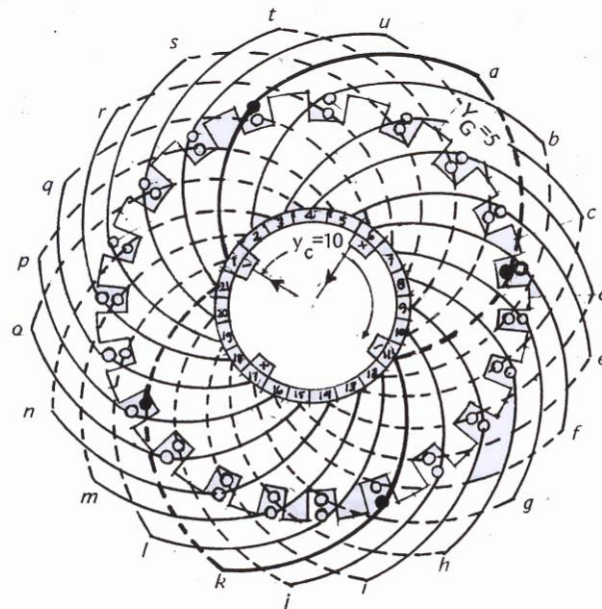
### 3.2.4. LILITAN GELOMBANG TUNGGAL

Pada lilitan gelung ujung-ujung kumparan dihubungkan dengan segment-segment komutator jaraknya relatif dekat (missal 1, 2, 3). Sedangkan pada lilitan gelombang  $Y_c$  relative besar, sebab ujung-ujung kumparan harus dihubungkan dengan segment-segment komutator yang berjarak hamper  $360^\circ$  listrik.

$$Y_c = \frac{K \pm 1}{p/2} \dots\dots\dots 3-30$$

Dimana  $Y_c$  : langkah komutator  
 $K$  : jumlah komutator  
 $P$  : jumlah kutub

Apabila  $\frac{K \pm 1}{p/2}$  hasilnya adalah bilangan bulat, maka dapat dibuat lilitan gelombang tunggal.  
 Pada lilitan gelombang tunggal banyaknya cabang paralel jangkar sama dengan jumlah kutubnya.



Gambar 3 – 34. Diagram lilitan dari mesin  $P = 4$ ,  $K = 21$  lilitan Gelombang tunggal

Perbedaan yang penting antara lilitan gelung tunggal & lilitan gelombang tunggal adalah:

1. Pada lilitan gelung tunggal banyaknya cabang paralel sama dengan jumlah kutubnya. (Lihat gambar 3-32). Sedangkan jumlah cabang paralel pada lilitan gelombang tunggal adalah 2, meskipun jumlah kutubnya lebih dari 2.
2. Pada lilitan gelung tunggal, penghantar-penghantar (sisi-sisi kumparan) terbagi dua bagian, yaitu yang terletak dihadapan kutub U dan dihadapkan kutub S. Pada lilitan gelombang tunggal penghantar-penghantar pada masing-masing cabang (yang jumlahnya 2), diletakan terbagi rata pada seluruh permukaan dihadapkan semua kutub-kutubnya.

Untuk lilitan *gelombang tunggal selalu mempunyai 2 cabang paralel*, dimana masing-masing cabang mempunyai penghantar-penghantar yang terbagi rata pada seluruh permukaan jangkar sehingga hanya membutuhkan sepasang sikat, meskipun kadang-kadang dipasang sikat-sikat yang jumlahnya sama dengan jumlah kutubnya. Hal ini untuk mengatasi kalau ada sikat yang kontakannya terhadap komutator kurang baik.

*Pada lilitan gelombang loncatan bunga api* pada saat komutasi relatif *lebih kecil*. Alasan untuk itu adalah karena masing-masing cabang paralel (yang jumlahnya dua) penghantar-penghantarnya terbagi rata pada seluruh permukaan sedangkan P cabang paralel pada lilitan gelung penghantar-penghantarnya hanya terletak di bawah dua kutub. Jika flux magnet yang dihasilkan kutub-kutub magnet tidak sama kuat diseluruh permukaan (tidak homogen) pada lilitan gelombang akan menghasilkan GGL induksi yang sama besarnya.

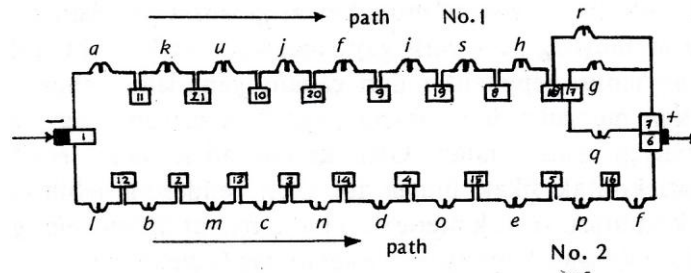
Tetapi pada lilitan gelung mungkin penghantar-penghantar pada satu cabang memotong garis-garis gaya magnet yang lebih kuat dibandingkan penghantar-penghantar dari cabang lain, dengan demikian arus akan mengalir dari cabang yang bertekanan tinggi ke cabang yang bertekanan rendah. Oleh karena aliran arus tersebut harus melewati kontak sikat, bunga api akan cenderung lebih besar pada waktu komutasi. Untuk mengatasi hal tersebut *lilitan gelung* biasanya dilengkapi dengan *hubungan penyeimbang (equalizer)*.

Untuk lebih memperjelas mengapa lilitan gelombang tunggal hanya membutuhkan 2 sikat, mengapa hanya mempunyai 2 cabang paralel dan mengapa tiap cabang terdiri dari penghantar-penghantar yang terbagi rata diseluruh permukaan jangkar perhatikan gambar 3-34 Gambar 3-34 menggambarkan diagram lengkap lilitan gelombang tunggal mesin arus searah  $P = 4$ ,  $K = 21$ ,  $G = 21$ .

Pada gambar 3-34 dapat dilihat bahwa kumparan a dihubungkan ke segment komutator 1 dan 11, kumparan b ke segment 2 dan 12, kumparan c ke segment 3 dan 13 dan seterusnya sampai akhirnya kumparan terakhir (u) dihubungkan ke segment komutator 21 dan 10. Kita tahu bahwa untuk generator, di dalam generator arus mengalir dari sikat (-) dan (+). Oleh karena itu satu sikat negatif (dari segment 1) akan memberi arus pada satu ujung dari kumparan 1. Sikat negatif yang lain (yang letaknya berhadapan) memberi arus pada kumparan yang sama (1) melalui kumparan a.

Itulah sebabnya sikat negatif yang kedua digambar dengan garis putus-putus (sebetulnya bisa dihilangkan). Juga sebuah sikat positif akan menarik arus dari salah satu ujung kumparan f, sementara sikat positif yang kedua akan menarik arus dari kumparan f melewati kumparan q. Oleh sebab itu sikat positif yang kedua tersebut dapat dihilangkan. Sebab itulah maka pada lilitan gelombang hanya memerlukan sepasang sikat meskipun jumlah kutubnya lebih dari 2.

Gambar 3-35 adalah skema arus untuk lilitan gelombang tunggal  $P = 4$ ,  $K = 21$ ,  $G = 21$ . kumparan  $g$  dan  $q$  dihubungkan singkat pada segment komutator 6 dan 7 oleh sikat positif. Cabang jangkar pertama terdiri dari 9 kumparan yang disambung seri, sementara itu cabang kedua terdiri 10 kumparan yang disambung seri.



Gambar 3 – 35. Skema arus dari mesin gambar 3-34

### 3.2.5. LILITAN GELOMBANG MAJEMUK

Pada lilitan gelombang tunggal hanya mempunyai 2 cabang paralel. Pada mesin arus searah yang besar, arus jangkar akan menjadi besar dan timbul bunga api yang relatif besar pada waktu komutasi. Agar lilitan jangkar tidak dialiri arus yang terlalu besar maka dibuat lilitan majemuk. Untuk lilitan gelombang majemuk duplex, jumlah cabang jangkar adalah  $2 \times 2$ . Sehingga untuk triplex dan quadruplex masing-masing 6 dan 8.

Untuk lilitan gelombang majemuk  $a = 2m \dots \dots \dots$  3-31

Dari gambar IV-11 dapat dilihat bahwa untuk membuat lilitan gelombang tunggal  $Y_c$  nya dibuat sedemikian sehingga kalau kita urut kumparannya hanya satu keliling lingkaran komutator, ujung akhir kumparan terakhir berjarak 1 segment dibelakang ujung awal kumparan pertama.

Sedangkan pada lilitan gelombang duplex kalau kita urut kumparannya untuk satu keliling pada lingkaran komutator, ujung akhir kumparan terakhir berjarak 2 segment di belakang atau di depan ujung awal kumparan pertama.

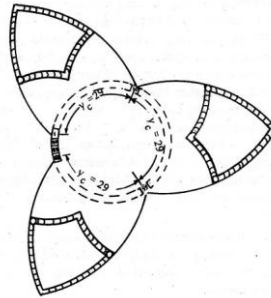
Pada lilitan gelombang triplex ujung akhir kumparan terakhir berjarak 3 segment di belakang atau di depan ujung awal kumparan pertama.

Sehingga untuk lilitan gelombang majemuk

$$Y_c = IV-9$$

Di mana  $m$  : adalah majemuknya  
( $m = 2$ , lilitan gelombang duplex).

Pada gambar 3-36, kalau kita urut kumparannya satu lingkaran komutator maka sisi akhir kumparan terakhir (segment no. 88) berjarak 3 segment dari sisi awal kumparan pertama (segment komutator no. 1)



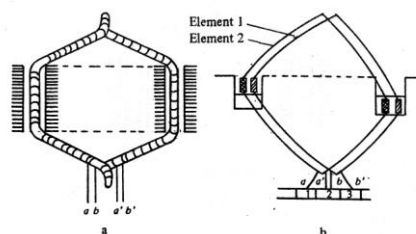
Gambar 3 – 36. Lilitan gelombang triplex  $K = 90, P = 6$

### 3.2.6. JANGKAR DENGAN SEGMENT KOMUTATOR LEBIH BANYAK DIBANDINGKAN ALUR ( $K > G$ )

Jangkar dengan segmen komutator lebih banyak dibandingkan alurnya, akan memperbaiki komutasi sehingga memperkecil loncatan bunga api pada saat komutasi.

Alasan lain ialah kalau jumlah alur sedikit, gigi-gigi dari jangkar menjadi lebih besar dan kuat selain itu jumlah kumparan menjadi berkurang & mengurangi biaya. Jika jangkar mempunyai jumlah segmen komutator dua kali jumlah alur (lihat pada gambar 3-37a), kumparan mempunyai 4 ujung. Perhatikan bahwa ujung-ujung kumparan a dan a' merupakan satu element, sementara itu ujung-ujung b dan b' adalah element kedua.

Hubungan ujung-ujung kumparan terhadap segment-segmen komutator pada lilitan gelung tunggal dapat dilihat pada gambar IV-14b.

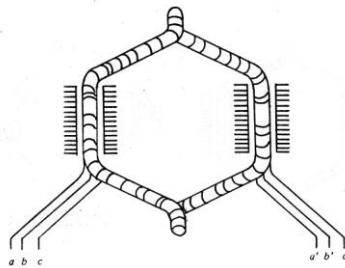


Gambar 3 – 37.

- Kumparan double element
- Hubungan kumparan double element, untuk lilitan gelung tunggal.

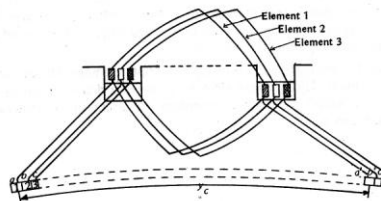
Kumparan dengan konstruksi seperti di atas dimungkinkan untuk lilitan gelung majemuk. Apabila a dan a' dihubungkan dengan segment komutator 1 dan 3, sementara b dan b' dihubungkan dengan segment 2 dan 4 lilitan yang akan menjadi lilitan gelung duplex. Dalam hal ini langkah alur ( $Y_G$ ) nya tak berubah.

Gambar 3-38, menggambarkan kumparan triple element. Di sini ada 6 ujung element. Ujung-ujung element 1 adalah a dan a', ujung-ujung element 2 adalah b dan b', sementara itu ujung-ujung element 3 adalah c dan c'.



Gambar 3 – 38. Kumparan triple element

Gambar 3-39 menggambarkan hubungan ujung-ujung elemen pada segment-segment komutatornya.  $Y_c$  dinyatakan dengan jarak antara a ke a' atau b ke b' atau c ke c'.



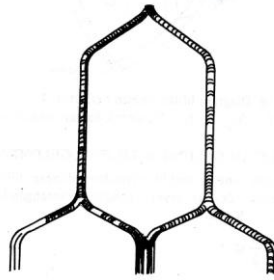
Gambar 3 – 39. Hubungan kumparan triple element dengan segment-segment komutator untuk lilitan gelombang tunggal

### 3.2.7. LILITAN KAKI KATAK

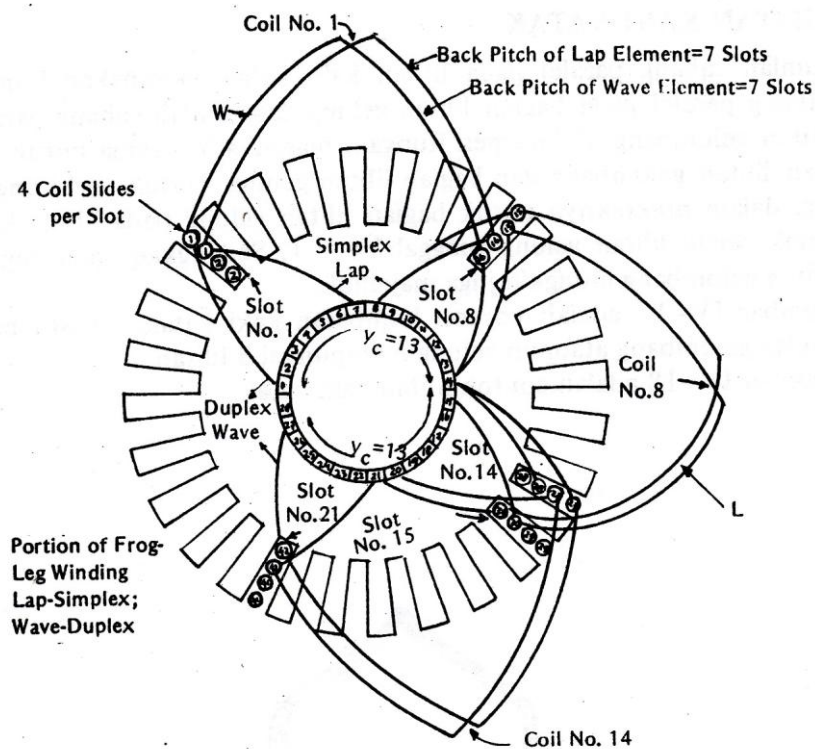
Jumlah cabang paralel pada lilitan kaki katak merupakan jumlah cabang paralel pada bagian lilitan gelung dan jumlah cabang paralel lilitan gelombang. Dalam perhitungan, biasanya  $Y_G$  sama untuk bagian lilitan gelombang dan bagian lilitan gelung. Untuk perhitungan  $Y_c$ , dalam prakteknya untuk bagian lilitan gelung pada lilitan kaki katak selalu gelombang tunggal  $Y_c = 1$ . Sedangkan pada bagian lilitan gelombang mungkin juga majemuk.

Gambar 3-40 adalah contoh kumparan kaki katak. Di situ baik bagian gelombang ataupun gelung mempunyai 3 lilitan.

Gambar 3-41 adalah contoh lilitan kaki katak.



Gambar 3 – 40. Kumparan kaki katak



Gambar 3 – 41. Diagram lilitan, mesin berkutub 4  
 $K = 28, G = 28, YG = 7, Y_c$  untuk bagian gelombang 13

#### 4. CONTOH LILITAN GELOUNG & LILITAN GELOMBANG

Bila data-data untuk melilit generator dengan lilitan gelung tunggal dua lapis (double layer) dengan keterangan-keterangan  $P = 2, G = 8, K = 8$ .

Rumus

$Y_G$  diperpendek misal 1 alur  $\longrightarrow Y_G = 3$

Jadi lebar kumparan  $Y_1$  dapat dihitung.

$$Y_1 = C_s YG + 1$$

$$= 2 \cdot 3 + 1 = 7$$



$$Y_2 = 2 Y_C - Y_1, \text{ di mana untuk lilitan gelung tunggal } Y_C = 1.$$

Sehingga  $Y_2 = 2 \cdot 1 - 7$   
 $Y_2 = -5.$

Untuk memudahkan, diperlukan suatu daftar lilitan yang berisikan urutan hubungan antara komutator dan sisi kumparan yang masing-masing diberi bernomor.

Menurut persamaan hubungan antara jumlah sisi kumparan dan komutator

:

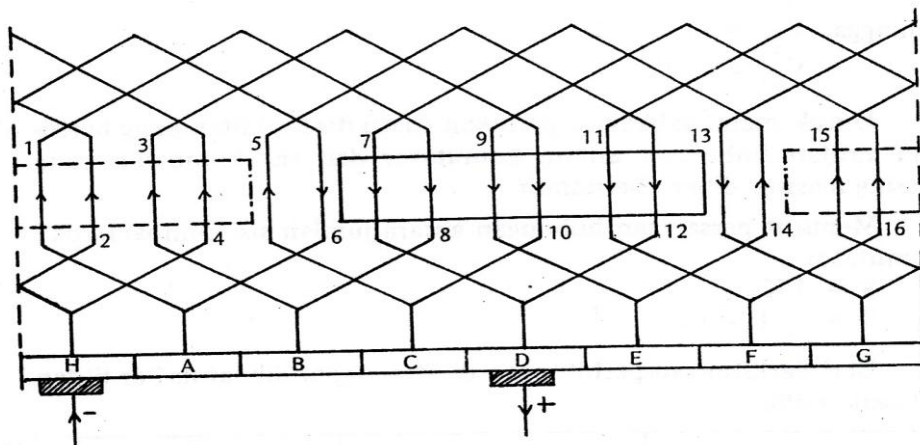
$$S = 2 K$$

$$S = 2 \cdot 8 = 16$$

Dari perhitungan-perhitungan di atas, dapat dibuat daftar lilitan sebagai berikut :

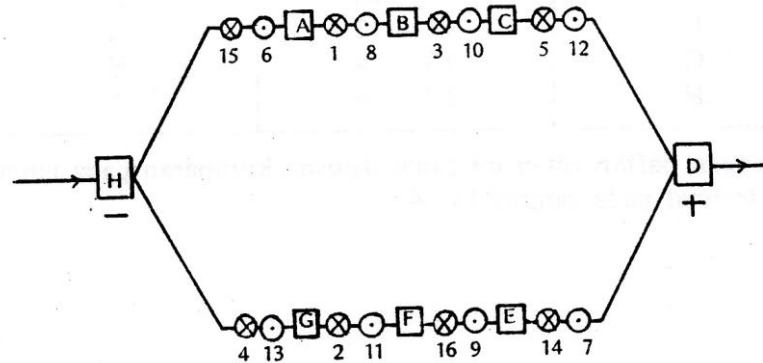
KOMUTATOR	SISI KUMPARAN	KOMUTATOR
A	1 - 8	C
B	3 - 10	D
C	5 - 12	E
D	7 - 14	F
E	9 - 16	G
F	11 - 2	H
G	13 - 4	A
H	15 - 6	B

Dengan daftar lilitan ini dapat disusun kumparan pada jangkar seperti terlihat pada gambar 3-42.



Gambar 3 - 42. Bentangan lilitan

Berdasarkan gambar bentangan lilitan di atas dapat pula kita buat diagram arusnya seperti yang terlihat pada gambar 3-43.



Gambar 3 – 43. Skema (diagram) arus

Bila data-data untuk melihat generator dengan lilitan gelombang tunggal dua lapis (double layer) dengan keterangan-keterangan yang berupa angka.

$$P = 2$$

$$G = 8$$

$$K = 8$$

Lilitan gelombang tunggal, maka (rumus)

Dalam hal ini YG diambil 3.

$$Y1 = Cs \cdot YG + 1$$

$$Y1 = 2 \cdot 3 + 1 \quad \rightarrow Y1 = 7$$

$$Y2 = 2 \cdot Yc - Y1$$

$$Y2 = 2 \cdot 7 - 7 \quad \rightarrow Y2 = 7$$

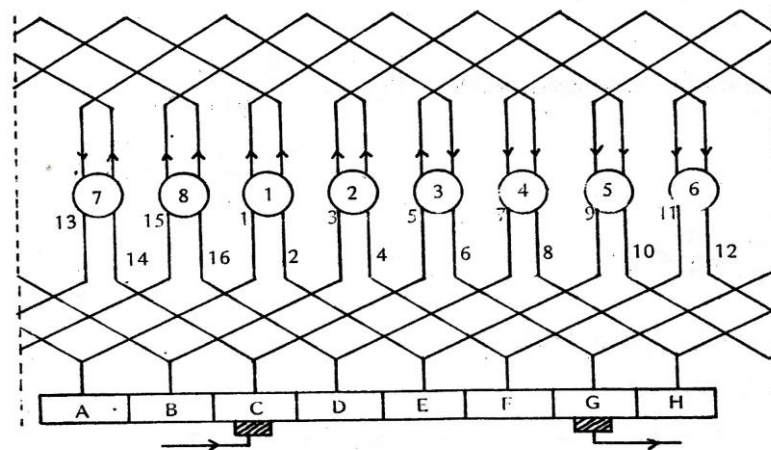
$$S = 2K$$

$$S = 2 \cdot 8 \quad \rightarrow S = 16$$

Dari hasil perhitungan di atas dapat dibuat suatu daftar lilitan sebagai berikut :

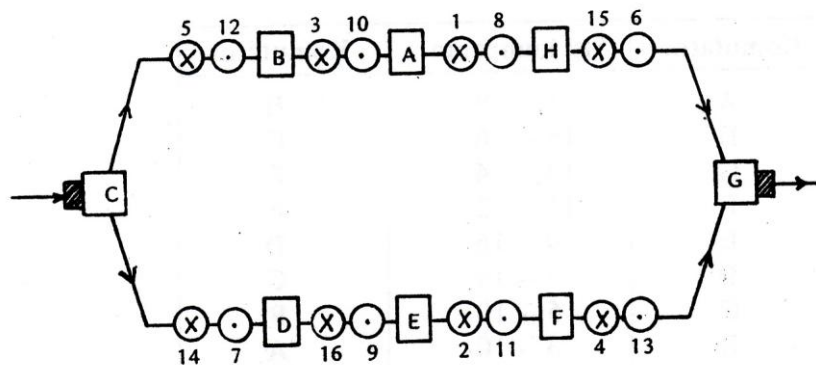
KOMUTATOR	SISI KUMPARAN	KOMUTATOR
A	1 - 8	H
H	15 - 6	G
G	13 - 4	F
F	11 - 2	E
E	9 - 16	D
D	7 - 14	C
C	5 - 12	B
B	3 - 10	A

Berdasarkan daftar lilitan tersebut di atas digambarkan bentangan lilitan seperti dapat dilihat pada gambar 3-44.



Gambar 3 – 44

Berdasarkan bentangan lilitan gambar IV-6 dapat dilukiskan skema aliran arus seperti gambar 3-45



Gambar 3 – 45.

#### 4. MENGHITUNG BESARAN-BESARAN LISTRIK GENERATOR ARUS SEARAH

GGL induksi jangkar adalah GGL yang dibangkitkan pada kumparan-kumparan jangkar dari suatu generator. Oleh karena cabang jangkar merupakan cabang kumparan-kumparan yang dihubungkan paralel, maka besarnya GGL jangkar adalah sama dengan GGL yang dibangkitkan satu cabang jangkar.

Tiap cabang jangkar juga terdiri dari belitan-belitan yang terhubung seri maka untuk memudahkan perhitungan dapat kita cari rata-rata dalam satu belitan, kemudian dikalikan dengan jumlah belitan yang terhubung seri tersebut.

Menurut persamaan II-2, maka besarnya GGL induksi maksimum dalam satu belitan adalah :

a.  $E_m = \Phi_m \omega$  Volt .....3-32

Harga rata-ratanya adalah  $e_r$

$e_r = 2/\pi E_m$

b.  $e_r = 2/\pi \Phi_m \omega$  Volt..... 3-33.

Pada suatu putaran jangkar berkutub 2, GGL melalui satu periode. Jika jangkar itu mengadakan n putaran/menit, atau n putaran/60 detik, maka bagi satu periode lamanya T.

$T = 60/n$  detik ..... 3-34

Sedangkan untuk jangkar berkutub P, maka  $T = 60/(P/2 \times n)$  ..... 3-35

Dalam satu periode dilalui sudut yang besarnya  $2\pi$  radial, sehingga

$\omega = 2\pi/T$  ..... 3-36

Dari persamaan IV-14 diperoleh :

$E = 2/\pi \times 2\pi/T \Phi_m$  volt

$= 4 \times 1/T \Phi_m$  Volt

$= 4 \times (P/2 \times n)/60 \Phi_m$  Volt

Jangkar memuat N belitan yang terdiri a cabang paralel (cabang jangkar), sehingga tiap cabang jangkar akan mempunyai..... buah belitan yang tersambung seri :

$E = 4 \times N/a (P/2 \times n)/60 \Phi_m$  Volt

Seperti telah kita ketahui bahwa setiap belitan mempunyai 2 batang penghantar.

Jika jumlah batang penghantar Z, maka  $N = Z/2$ .

Diperoleh persamaan :

$E = 4 \times Z/2a (P/2 \times n)/60 \Phi_m$  Volt

$= P/a \times n/60 \times Z Q_m$  Volt ..... 3-37

Oleh karena  $P/a \times Z/60$ , merupakan harga yang konstan,

Maka  $E = C n \Phi_m$  Volt. ....3-38

Sesuai dengan rumus  $E = C n Q$  Volt, polaritas GGL induksi yang terbentuk tergantung oleh :

- a. arah  $\Phi$
- b. arah putaran jangkar

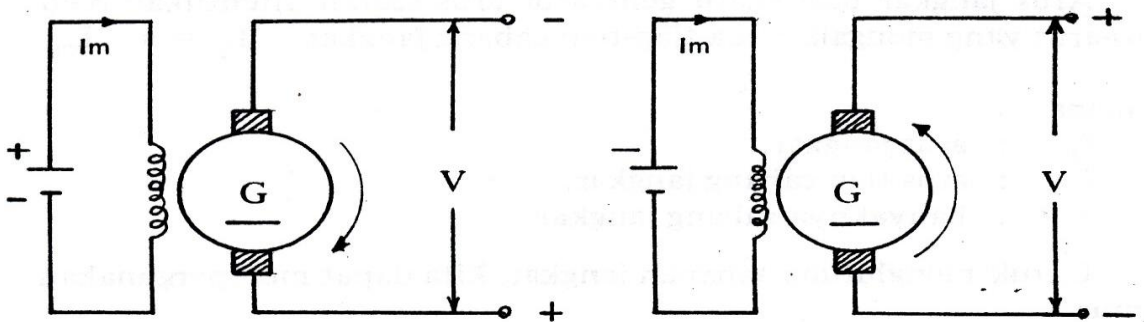
Dari persamaan,  $E = C n \Phi_m$  Volt

Jika n negatip  $\rightarrow$  harga E menjadi negatip.

Jika... negatip  $\rightarrow$  harga E menjadi negatip.

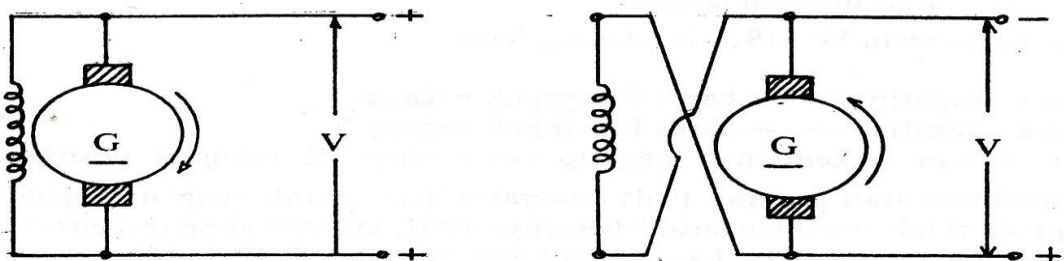
Jika n dan .... keduanya negatip  $\rightarrow$  harhga E menjadi positip.

Pembalikan arah putaran pada generator arus searah dengan penguat terpisah tidak mempengaruhi besarnya GGL induksi yang terbentuk, tetapi akan mengakibatkan terbaliknya polaritas GGL induksi tersebut. Pengaruh pembalikan arah putaran generator terhadap polaritas GGL induksi dapat dilihat seperti gambar 3-46.



GAMBAR IV-8

Pembalikan arah putaran pada generator dengan penguat sendiri, akan menghilangkan magnet tinggalnya, mengingat arus putaran magnet yang diambil dari generator sendiri, maka jika putaran generator dibalik arus yang mengalir pada lilitan penguat magnet akan memperlemah/menghilangkan magnet tinggalnya sehingga GGL induksi tidak akan timbul. Jadi pada generator dengan penguat sendiri arah putaran sudah ditentukan. Apabila akan dilakukan pembalikan arah putaran, maka penyambung ujung-ujung lilitan penguat magnet harus dibalik lihat gambar,



Gambar 3 – 46.

Arus jangkar dari suatu generator arus ditentukan oleh arus-arus yang mengalir pada tiap-tiap cabang jangkar  $I_a = a \cdot I_{ca}$

Dimana :

$I_a$  : arus jangkar.

$I_{ca}$  : arus tiap cabang jangkar.

$a$  : banyaknya cabang jangkar.

Untuk menghitung tahanan jangkar, kita dapat mempergunakan rumus :

$$R = \rho L/A \quad \text{Ohm} \dots\dots\dots 3-39$$

Dalam hal ini cabang jangkar terdiri dari..... batang penghantar yang 1 (meter) dan penampangnya  $q$  ( $\text{mm}^2$ ) dengan hantaran jenis ..., maka didapat tahanan tiap cabang itu adalah :

$$R_{ca} = \frac{Z}{a} \times \frac{\rho L}{A} \text{ Ohm} \dots\dots\dots 3-40$$

Dengan demikian tahanan jangkar seluruhnya (terdiri dari a cabang jangkar yang dihubungkan paralel).

$$R_a = \frac{(Z \rho L)}{a^2 A} \text{ Ohm} \dots\dots\dots 3-41$$

Dimana

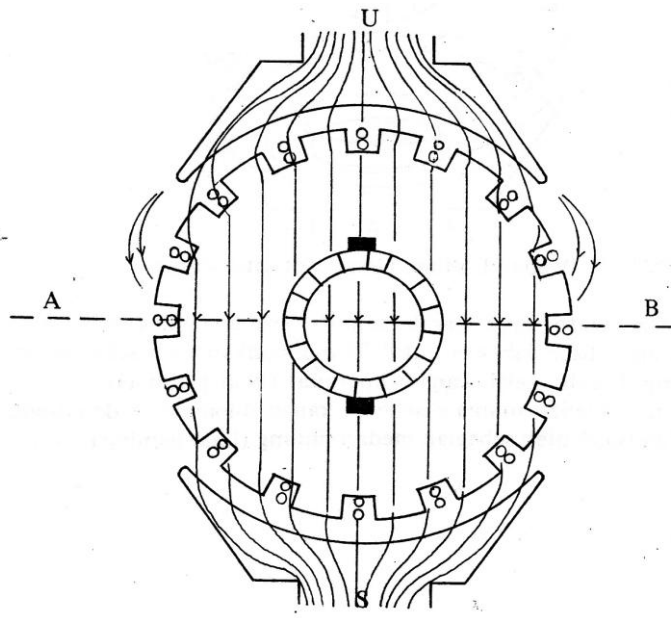
$R_{ca}$  : tahanan tiap cabang jangkar.

$R_a$  : tahanan jangkar.

## 5. REAKSI JANGKAR DAN KOMUTASI

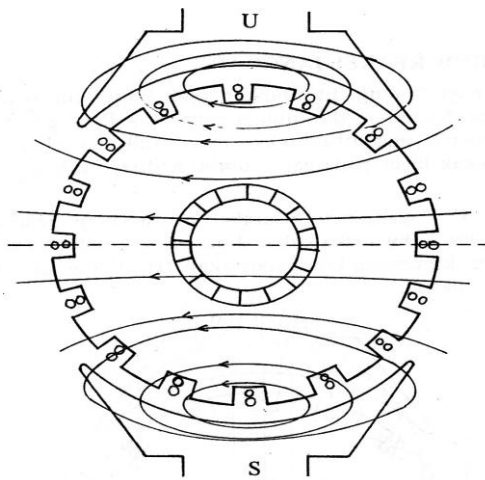
### 5.1. PENGARUH REAKSI JANGKAR

Medan magnet yang ditimbulkan oleh kutub-kutub utama sebuah generator disebut medan utama generator. Pada generator berkutub dua seperti yang ditunjukkan pada gambar 3-47, garis netral B terletak tegak lurus pada garis sumbu kedua kutub, disebut *garis netral teoritis*.



Gambar 3 – 47. Medan utama generator arus searah

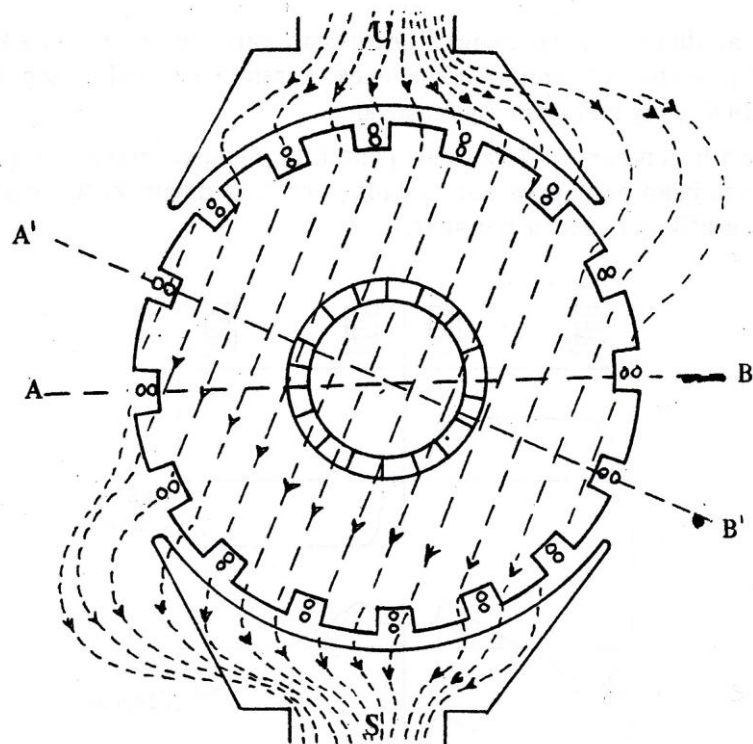
Bila generator bebahan, arus ini pada lilitan jangkar membangkitkan suatu gaya gerak magnet (GGM) yang disebut medan jangkar. *Medan jangkar* ini terletak tegak lurus medan utama, karena itu disebut juga *medan lintang*.



Gambar 3 – 48. Medan Lintang Denerator arus searah

Pada generator arus searah, seperti terlihat pada gambar 3-49. medan utama disebelah kiri kutub U dilemahkan oleh sebagian medan lintang dan disebelah kanan diperkuat (lihat gambar).

Pada kutub S medan utama disebelah kanan dilemahkan dan disebelah kiri diperkuat oleh sebagian medan lintang (lihat gambar)



Gambar 3 – 49. Medan paduan generator

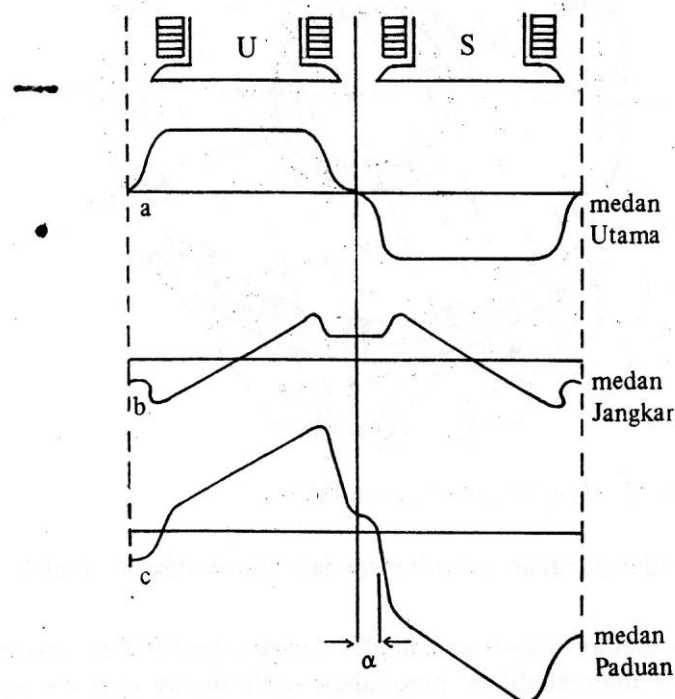
Pengaruh medan jangkar terhadap medan utama disebut reaksi jangkar.

Karena medan utama dan medan jangkar timbul bersama-sama. Hal ini akan menyebabkan perubahan arah medan utama seperti terlihat pada gambar 3-49. garis netral A'B' tegak lurus dengan medan paduan, berkisar sebesar sudut.... dari garis teoritis. Pada generator penggeseran ini mengikuti arah putaran.

Bila diperhatikan kawat-kawat yang terletak pada garis netral AB, diwaktu jangkar berputar, maka kawat-kawat yang sampai ditempat ini tidak memotong suatu garis gaya. Akan tetapi sesudah terjadi reaksi jangkar garis netral bergeser letaknya, kawat-kawat yang melampaui garis netral AB sekarang memotong garis gaya.

Sikat generator yang dipasang pada komutator yang terletak pada garis netral AB harus dipindah letaknya agar tidak timbul bunga api. Sikat digeser sesuai dengan pergeseran garis netral. Kalau sikat tidak dipindahkan komutasi akan jelek, karena sikat terhubung dengan kawat yang mengandung tegangan.

Dalam gambar 3-50 tampak pada kita jalannya medan utama. Andaikata jalan garis gaya hanya pada daerah di dalam kutub maka gambar grafiknya akan segi empat.



Gambar 3 – 50. Lengkung medan dari generator arus searah



Penghamparan garis-garis gaya menyebabkan pula medan yang lemah dalam ruang antara kedua kutub itu sehingga mengakibatkan jalan medan utama yang landai.

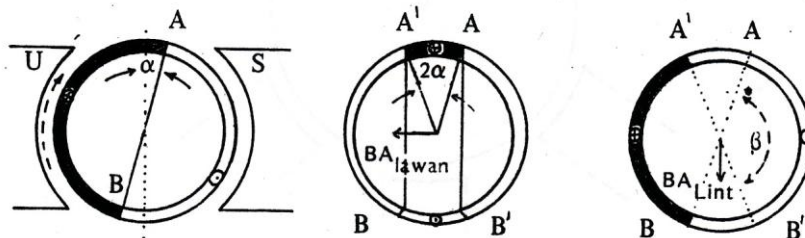
Dalam gambar 3-50b, menggambarkan jalan medan jangkar tidak dengan medan utama. Medan utama dan medan jangkar bersama-sama menghasilkan medan paduan (gambar 3-50c).

Garis netral bergeser meliputi sudut  $\alpha$ .

## 5.2. BELITAN AMPERE LINTANG DAN BELITAN AMPERE LAWAN

Dalam gambar 3-51, menunjukkan bahwa akibat adanya reaksi jangkar maka membagi jumlah lilitan jangkar menjadi dua bagian yaitu :

1. Belitan-belitan yang mengakibatkan terbentuknya medan lintang.  
(cross magnetizing ampere turns = BA lintang)
2. Belitan belitan yang mengakibatkan terbentuknya medan lawan.  
(demagnetizing ampere turns =BA lawan).



Gambar 3 – 51. Belitan ampere lintang dan belitan ampere lawan

Pada mesin berkutub banyak seperti GB V-6, penghantar-penghantar yang mengakibatkan terjadinya medan lawan setiap kutub.

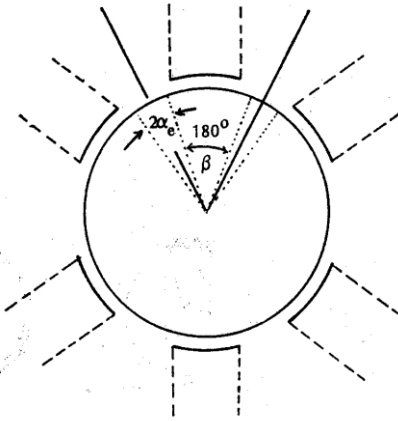
Adalah sebanyak  $2 \alpha e Z / 180 P$

Sehingga jumlah belitan lawan setiap kutub  $BA_{Lw} = \frac{1}{2} (2 \alpha e / 180 \times Z/P) Ia/a$   
 $BA_{Lw} = \alpha e Z Ia / 180 Pa$  .....3-42

Dimana :

- $\alpha e$  : derajat listrik.
- $Z$  : jumlah kawat penghantar pada jangkar.
- $Ia$  : arus jangkar.
- $a$  : jumlah cabang jangkar.
- $P$  : jumlah kutub.

$\alpha e = (P/2) \alpha$ , maka didapatkan  $BA_{Lw} = \alpha Z Ia / 360 a$   
 ( $\alpha =$  derajat ruang)



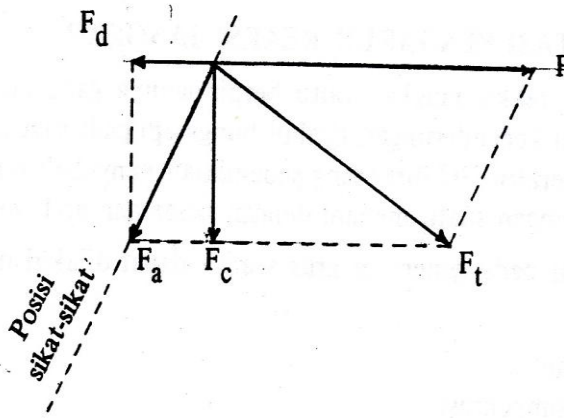
Gambar 3 – 52. Belitan ampere lawan setiapkutub

Belitan ampere lintang setiap kutub  $\beta = 180 - 2 \alpha e$  (dinyatakan dengan sudut).

Belitan ampere lintang setiap kutub ialah :

$$BA_{Lintang} = Z Ia / 2Pa - \alpha Z Ia / 3600 a \dots\dots\dots 3-43$$

Seperti kita telah ketahui bahwa  $BA_{Lw}$  menyebabkan terjadinya medan lawan, demikian pula  $BA_{Lin}$  menyebabkan terjadinya medan lintang. Untuk memudahkan pemahaman medan-medan tersebut dilukiskan dengan Vektor. Gambar V-7, melukiskan vektor medan paduan yang ditimbulkan medan utama dan medan jangkar.



Gambar 3 – 53. Medan paduan

F adalah vektor medan utama.  
Fa adalah vektor medan jangkar.  
Medan jangkar dapat diuraikan menjadi 2 :  
Fd (medan lawan) dan  
Fc (medan lintang).

Medan paduan (Ft) adalah jumlah dari medan jangkar dan medan utama.

Sebuah generator P = 4, Z = 288, lilitan gelung, arus jangkar 120 A  $\alpha = 15^\circ$  ruang  
Hitunglah BA lawan, BA lintang.

**JAWAB :**

2  $\alpha = 30^\circ$  ruang. Ada 4 sikat  $\rightarrow$  bagian sudut yang menimbulkan medan lawan ialah  $30^\circ \times 4 = 120^\circ$  ruang (1/3 bagian).

Jumlah penghantar yang menimbulkan medan lawan  $1/3 \times 288 = 96$  penghantar.

Lilitan gelung  $\rightarrow 2a = 4 \rightarrow$  arus tiap cabang =  $120/4 = 30$  Ampere

BA lawan =  $30 \times 96/2 = 1440$ .

Jumlah penghantar yang menimbulkan medan lintang  $2/3 \times 288 = 192$  penghantar.

BA lintang =  $30 \times 192/2 = 2880$ .

## 6. MENGATASI PENGARUH REAKSI JANGKAR

Pengaruh reaksi jangkar yaitu berpindahnya garis netral yang mengakibatkan kecenderungan timbul bunga api pada saat komutasi. Untuk itu generator DC dirancang sedemikian penyebab reaksi jangkar lawan dengan suatu medan, dengan besar dan arah yang tepat.

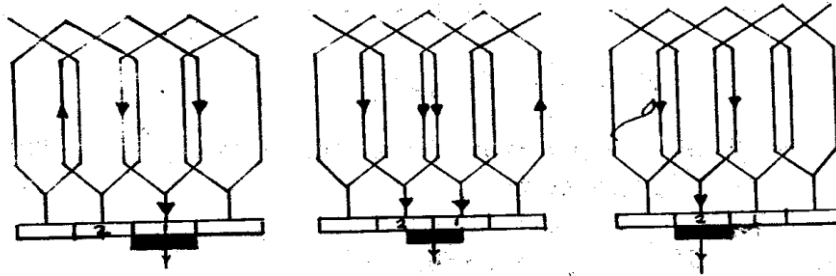
Untuk ini pada generator arus searah dapat dilakukan dengan dua cara :

- Kutub bantu.
- Lilitan kompensasi.

Kutub bantu adalah kutub kecil yang terletak tepat pada pertengahan antara kutub utara dan selatan, ditengah-tengah garis netral teoritis. Lilitan penguat kutub ini dihubungkan seri dengan lilitan jangkarnya. Selain cara itu untuk mengatasi pengaruh medan lintang ini pada generator arus searah dilengkapi dengan kumparan yang terdiri dari sekumpulan penghantar yang terletak didalam alur pada permukaan kutub utama sehingga dengan demikian akan menimbulkan medan lintang yang langsung melawan medan arus jangkar. Lilitan ini disebut dengan *lilitan kompensasi*. Lilitan kompensasi dihubungkan seri dengan lilitan jangkar.

## 7. MASALAH KOMUTASI

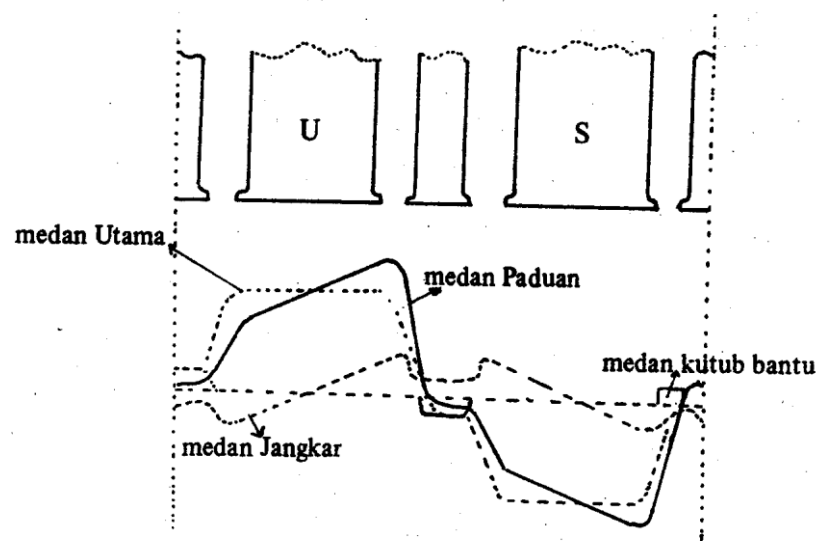
Komutasi adalah saat dimana terjadi pergantian arah arus pada harga positif ke negatif pada suatu kumparan yang menghasilkannya. Peristiwa ini akan terjadi bila kumparan melewati garis netral pada waktu kumparan-kumparan tersebut bergerak dari daerah antara permukaan kutub U dan S atau sebaliknya. Pada gambar V-8 dapat dilihat pergantian arah arus dari suatu kumparan.



Gambar 3 – 54. Kumparan komutasi

Telah dijelaskan di muka bahwa untuk mengatasi pengaruh reaksi jangkar mengakibatkan kecenderungan untuk timbul bunga api pada saat komutasi yaitu dengan kutub bantu atau lilitan kompensasi. Pada gambar 3-55 digambarkan distribusi medan generator arus searah yang dilengkapi dengan kutub bantu.

Dengan adanya kutub bantu atau lilitan kompensasi, sikat-sikat tidak perlu di geser-geser lagi meskipun terjadi reaksi jangkar. Jadi meskipun reaksi jangkar, pada saat komutasi tidak akan timbul bunga api.



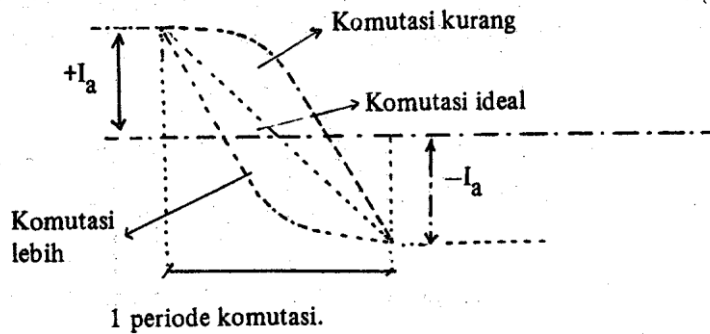
Gambar 3 – 55. Distribusi medan dengan kutub bantu

Bila pergantian arus selama waktu komutasi, waktu hubung singkat, tidak uniform dikatakan komutasi lebih atau komutasi kurang.

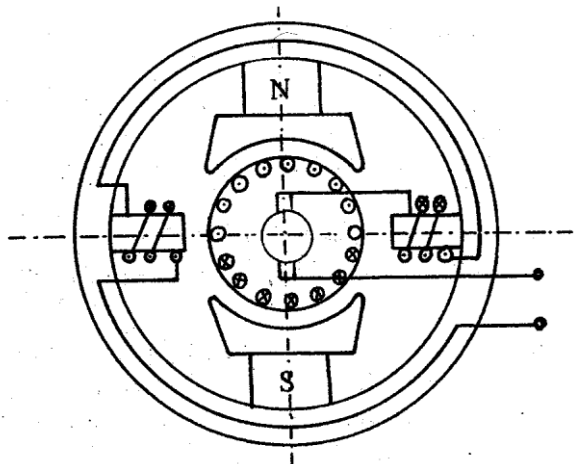
Pada gambar 3-56 ketiga bentuk umum dari komutasi, diperlihatkan bahwa komutasi tidak berjalan sepanjang kurve yang lurus. Arus pada lilitan hubung singkat sesungguhnya sangat tidak teratur.

Pada komutasi kurang, pergantian arus sangat perlahan selama periode hubung singkat, kemudian untuk mengejar ketinggalan waktu arus menjadi sangat besar sampai mendekati komutasi lengkap. Arus sangat tinggi yang timbul di bawah ujung-ujung singkat menimbulkan panas setempat.

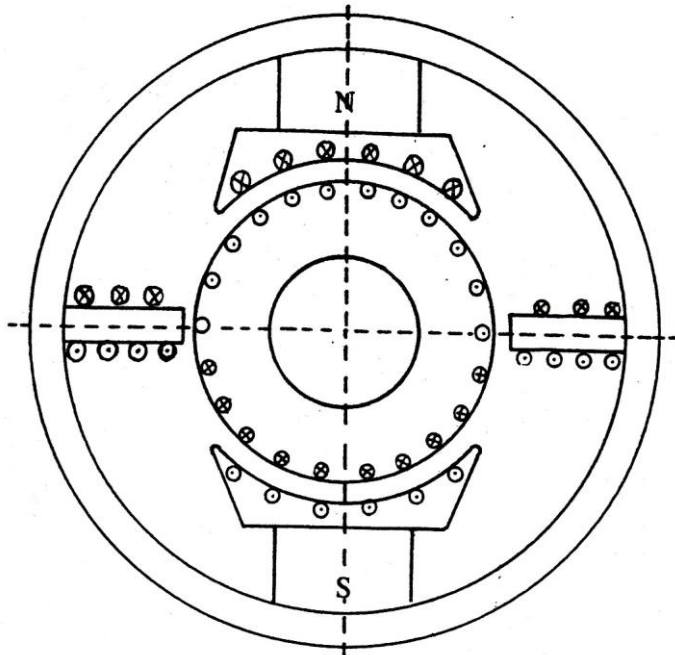
Pada komutasi lebih yang merupakan suatu keadaan komutasi yang dipercepat, pergantian arus sedemikian cepat pada tingkat awal.



Gambar 3 – 56. Kurve arus dan waktu untuk 3 keadaan komutasi



Gambar 3 – 57. Mengatasi pengaruh reaksijangkar dengan kutub bantu



Gambar 3-58. Mengatasi pengaruh reaksi jangkar dengan lilitan kompensasi

## 8. Karakteristik Generator Arus Searah

Karakteristik adalah grafik yang menyatakan hubungan antara dua besaran listrik yang menentukan sifat sebuah mesin. Besaran yang mempengaruhi kerja dari generator arus searah adalah :

- a. Tegangan jepit  $E_k$  / tegangan yang ditimbulkan  $E$
- b. Arus jangkar  $I_a$
- c. Arus penguat magnet  $I_m$
- d. Kecepatan putar  $n$

Pada umumnya generator berputar dengan putaran yang tetap ( $n$  konstan)

Karakteristik generator arus searah yang terpenting adalah :

### a. Karakteristik beban nol

Merupakan grafik yang menggambarkan hubungan antara tegangan jepit ( $E_o$ ) sebagai fungsi arus penguat magnet ( $I_m$ ) pada putaran konstan dan generator tanpa beban (beban nol).

Dalam keadaan ini, tegangan terminal sama dengan GGI yang dibangkitkan, sehingga :

$$E_o = f(I_m) \text{ pada } I_L = 0 \text{ dan } n = \text{konstan}$$

### b. Karakteristik beban

Bila generator dibebani, maka akan mengalir arus beban sebesar  $I_L$ . Pada karakteristik beban generator diberi beban konstan. Karakteristik beban menggambarkan hubungan antara tegangan jepit ( $E_k$ ) sebagai fungsi arus penguat magnet ( $I_m$ ) pada pembebanan dan kecepatan konstan.

$$E_k = f(I_m) \text{ pada beban konstan dan } n = \text{konstan.}$$

**c. Karakteristik Luar**

Karakteristik luar menggambarkan hubungan antara tegangan jepit ( $E_k$ ) sebagai fungsi arus beban ( $I_L$ ) pada tahanan penguat magnet dan kecepatan konstan.

$$E_k = f(I_L) \text{ pada } R_m = \text{konstan dan } n = \text{konstan.}$$

**d. Karakteristik pengatur**

Karakteristik pengatur menggambarkan hubungan antara arus penguat magnet ( $I_m$ ) sebagai fungsi arus beban ( $I_L$ ) pada tegangan jepit konstan dan kecepatan konstan.

$$I_m = f(I_L) \text{ pada } E_k \text{ konstan dan } n = \text{konstan.}$$

**e. Karakteristik hubung singkat**

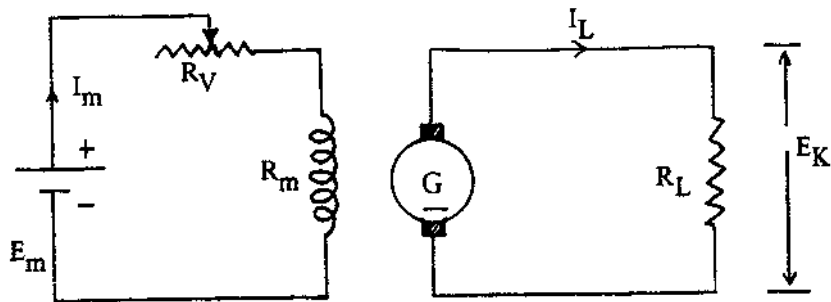
Karakteristik hubung singkat menggambarkan hubungan antara arus jangkar ( $I_a$ ) sebagai fungsi arus penguat magnet ( $I_m$ ) pada mesin yang dihubungkan singkat dan kecepatan konstan.

$$I_a = f(I_m) \text{ pada } R_L = 0 \text{ dan } n = \text{konstan.}$$

**8.1. Karakteristik Generator Berpenguat Terpisah**

**a. Karakteristik Beban Nol**

Bila generator diputar dalam kecepatan konstan maka GGL yang dibangkitkan adalah berbanding lurus dengan flux perkutubnya. Karena lilitan magnet yang menghasilkan flux tersebut konstan, maka berarti flux sebagai arus penguat magnet, tetapi tidak berbanding lurus karena persamaan  $E = C n Q_o$ , sedangkan  $Q_o$  besarnya sebagai fungsi arus penguat magnet terpengaruh oleh permeabilitas. Oleh karena itu jelas bahwa hubungan GGL induksi sebagai fungsi arus penguat magnet akan berbentuk lengkung kemagnetan. Dalam gambar 3-59. diperlihatkan skema rangkaian untuk karakteristik beban nol generator penguat terpisah.

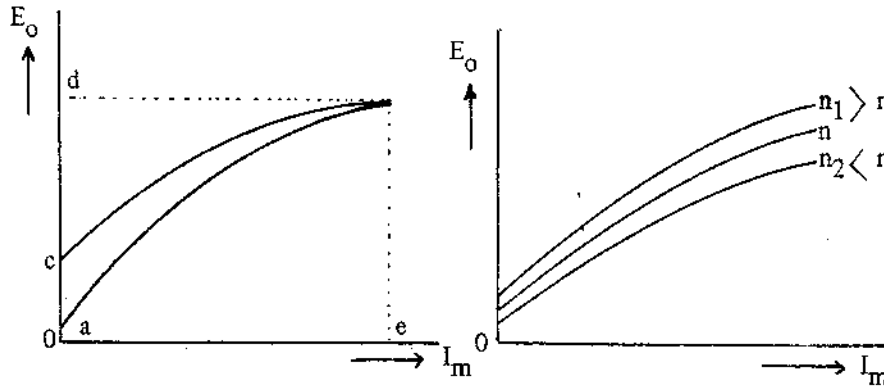


Gambar 3-59 Skema rangkaian untuk membuat karakteristik beban nol generator berpenguat terpisah

Pada gambar 3-60, karakteristik beban nol generator berpenguat terpisah; dapat dilihat bahwa pada suatu arus penguat magnet  $I_m$  masih nol, GGL induksi  $E_o$  sudah terbangkit sebesar  $O_a$ . GGL ini dihasilkan oleh magnet remanen dari kutub-kutub generator. Kemudian bila arus medan diperkuat GGL yang dibangkitkan akan bertambah besar, sehingga untuk mendapatkan GGL sebesar  $O_d$  maka diperlukan arus penguat magnet sebesar  $O_e$ . Bilamana arus penguat magnet

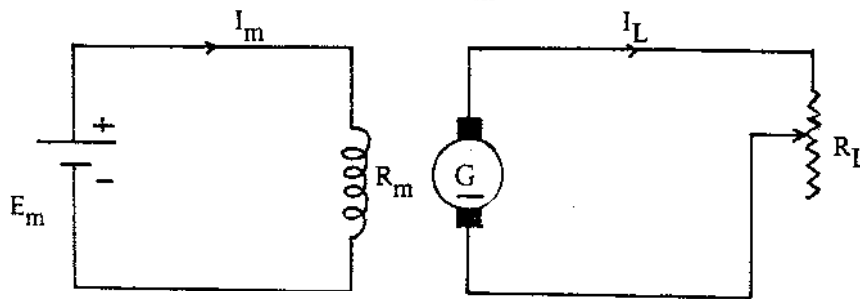
diperkecil kembali sampai nol maka GGL juga akan turun membentuk kurve seperti lengkungkemagnetan.

Besar kecilnya arus penguat magnet tersebut dapat diatur melalui tahanan pengatur  $R_v$  (lihat gambar 3-59) atau bisa juga agar  $I_m$  bisa diatur,  $E_m$  diganti dengan  $E$  yang dapat diatur (variabel).



Gambar 3-60,. Karakteristik beban nol generator penguat terpisah

**b. Karakteristik Beban**



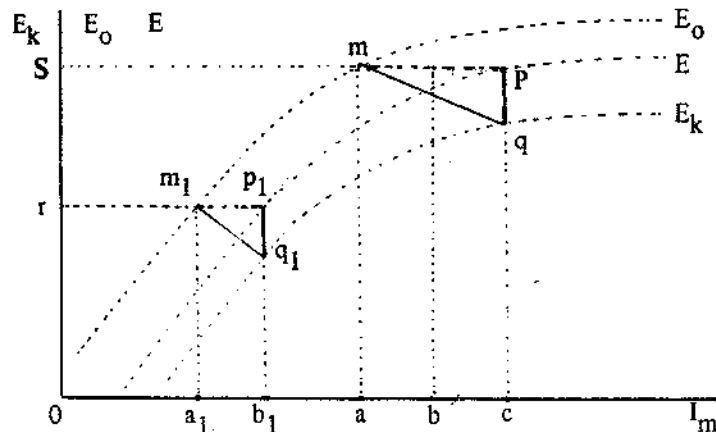
Gambar 3-61. Skema rangkaian untuk membuat karakteristik beban generator berpenguat terpisah.

Pada Gambar 3-62, grafik  $E_o$  menggambarkan karekteristik beban nol. Untuk membangkitkan GGL  $O_s$  maka beban nol diperlukan arus penguat magnet  $O_a$ . Pada keadaan berbeban belitan ampee lawan mengakibatkan pengurangan medan utama (penglemahan), oleh karena itu arus penguat magnet harus diperbesar dengan  $ab$ . Belitan ampere lintang juga menyebabkan penglemahan medan utama di daerah jenuh. Untuk melenyapkan penglemahan ini, arus penguat magnet diperbesar lagi sampai  $bc$ . Jadi untuk mendapat GGL yang sama dengan beban nol, haruslah pada keadaan berbeban yang sudah diketahui arus penguat magnet itu diperkuat dengan suatu jumlah  $ac$ .



Menurut persamaan III-3, maka  $E_k = E - I_a \sum R - 2 \Delta E$  kalau pada pembebanan yang sudah diketahui kerugian tegangan  $I_a \sum R + 2 \Delta E$  sama dengan  $pq$ , maka  $q$  merupakan titik karakteristik beban, artinya pada arus penguat magnet  $Oe$  harus ada tegangan jepit  $cq$ .

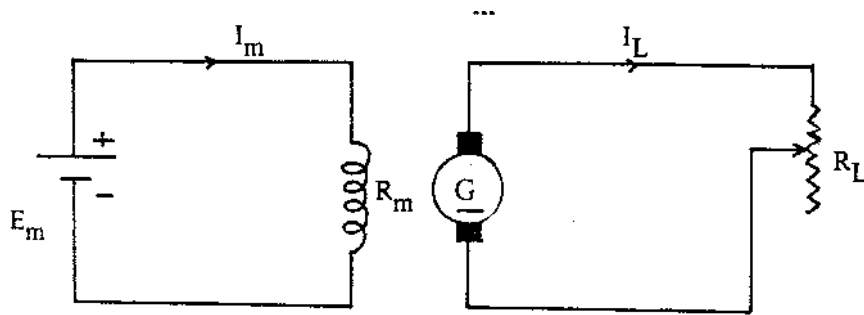
Diluar daerah jenuh (dalam bagian garis lurus karakteristik), pengaruh belitan ampere lintang diabaikan. Pada  $E_o = Oe$  maka ( $I_m = Oa$ ), dan oleh karena belitan ampere lintang sama dengan nol, maka arus penguat magnet menghasilkan reaksi jangkar, sama dengan  $a_1 b_1 = ab = m_1 p_1$ . Pada pembebanan yang sudah diketahui, kerugian tegangan tetap. Kalau dibuat  $p_1 q_1$  sama dengan  $pq$ , maka  $q_1$  merupakan titik kedua dari karakteristik beban. Garis yang melalui  $q$  dan  $q_1$  menggambarkan karakteristik beban. Garis yang melalui  $p$  dan  $p_1$  menggambarkan GGL sebagai fungsi arus penguat magnet pada mesin yang dibebani. Apabiladisebut-sebut karakteristik beban, itu pada umumnya karakteristik pada beban penuh.



Gambar 3-62. Karakteristik beban generator penguat terpisah

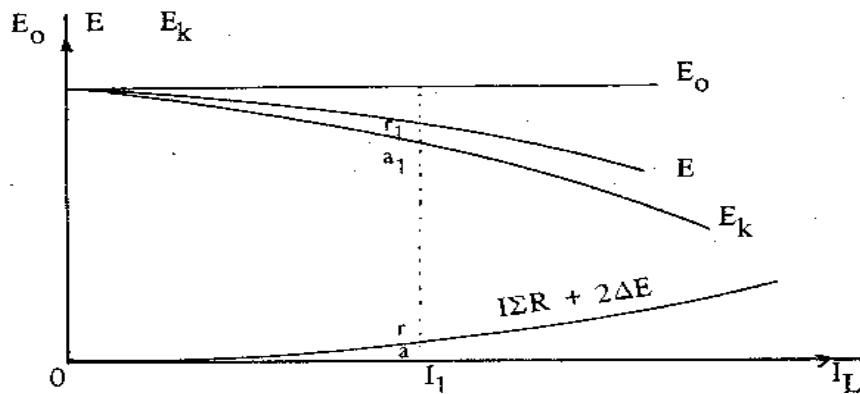
### c. Karakteristik Luar

Generator-generator kebanyakan tak berbeban tetap. Tahanan lilitan penguat magnet ( $R_m$ ) tetap maka pada generator penguat terpisah ini arus penguat magnet ( $I_m$ ) juga tetap.



Gambar 3-63. Skema rangkaian untuk membuat karakteristik luar generator penguat terpisah.

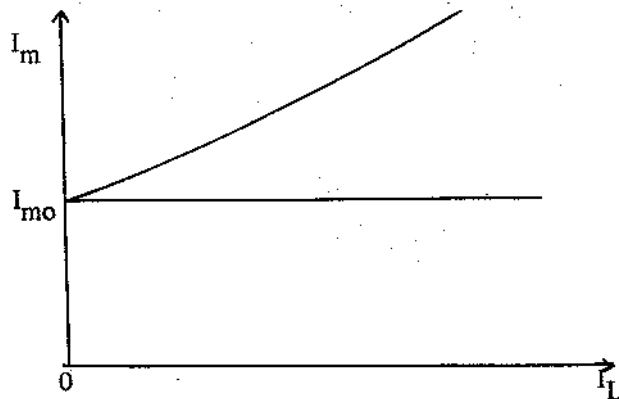
Kalau tidak terdapat reaksi jangkar dan kerugian tegangan, maka pada tiap-tiap pembebanan  $E_k = E_o = E$ . Kenyataannya kalau beban bertambah, reaksi jangkar juga bertambah yang mengakibatkan GGL turun sampai  $E$ . Kerugian tegangan pada beban  $I_a \sum R + 2 \Delta E$  dianggap bertambah memanjang. Kerugian tegangan pada beban untuk arus beban sbesar  $I_1 = ar$  ( $ar = a_1 r_1$ ), maka  $a_1$  merupakan titik pada karakteristik luar.



Gambar 3-64. Karakteristik luar generator berpenguat terpisah

#### d. Karakteristik Pengatur

Pada generator penguat terpisah tegangan jepit turun sesuai dengan beban. Untuk membuat tegangan jepit konstan maka arus medan harus diperkuat. Gambar 3-65. menggambarkan karakteristik pengatur dari generator penguat terpisah.

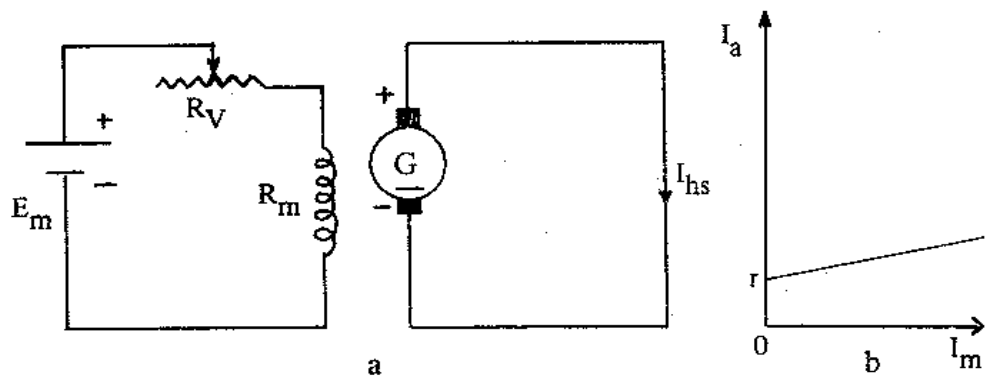


Gambar 3-65. Karakteristik pengatur generator penguat terpisah

**e. Karakteristik Hubung singkat**

Pada mesin yang dihubungkan singkat beban dari generator sama dengan nol. Jadi sesuai dengan persamaan  $E_k = E - I_a R_a - 2 \Delta E$  dalam hal ini  $R_L = 0$ , sehingga untuk memperoleh arus hubung singkat yang besar hanya dibutuhkan GGL yang rendah.

Kurve karakteristik hubung singkat generator penguat terpisah merupakan garis lurus. Hal ini disebabkan pada hubung singkat ini generator membangkitkan GGL ketika fluxnya bekerja pada saat di luar daerah jenuh. Pada gambar 3-66 b, pada saat arus penguat magnet sama dengan nol, ternyata sudah mengalir arus hubung singkat sebesar  $I_{hs}$ . Hal ini disebabkan oleh GGL yang dibangkitkan magnet sisa kutub-kutub magnet.



Gambar 3-66. Karakteristik hubung singkat



Sebelum kita menyelidiki bagaimana terbentuknya GGL tersebut, kita tinjau terlebih dahulu bentuk grafik dari tahanan lilitan penguat magnetnya. Dengan memakai hukum ohm, diperoleh bahwa untuk harga tahanan lilitan penguat magnet yang konstan, maka arus penguat magnet akan selalu sebanding dengan tegangan. Jadi bila tegangan dilukiskan sebagai fungsi arus penguat magnet maka grafik tahanan lilitan penguat magnet  $R_{sh}$  akan berbentuk garis lurus. Lihat gambar 3-68.

Menurut hukum ohm maka tahanan lilitan penguat magnet.

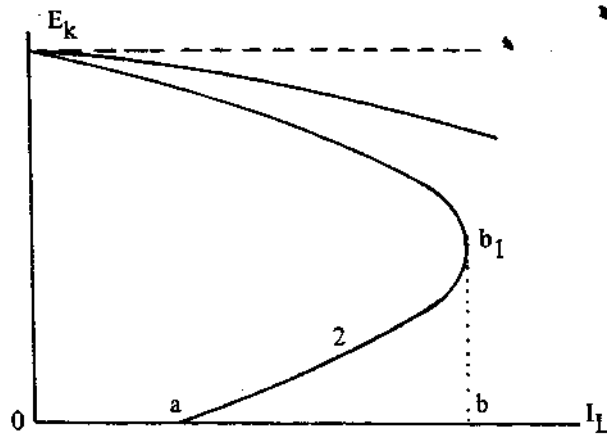
$$R_m = \frac{E_k}{I_m}$$

Perbandingan ini bagi  $R_m$  konstan merupakan garis lurus melalui 0. Untuk tahanan  $R_m$  yang sudah diketahui garis OP merupakan fungsi tersebut. Pada  $I_m = 0$  magnet tinggal sudah membangkitkan GGL = 0r. GGL ini mengadakan arus penguat magnet  $I_{0a}$  yang menyebabkan GGL naik lagi sampai 0S. Hal ini terus begitu sampai tercapai titik P pada karakteristik beban nol. Untuk membangkitkan GGL  $O_t$  pada titik ini diperlukan arus penguat magnet  $I_{0b}$ . Jadi generator itu akan memperkuat sendiri sampai tegangan  $O_t$ .

Karakteristik beban dari generator shunt hampir sama dengan pada generator penguat terpisah.

Dalam gambar 3-69 digambarkan karakteristik luar generator shunt. Kurve 1 dibuat pada penguatan terpisah, dan kurve 2 dibuat pada penguat sendiri hubungan shunt. Disini ternyata, bahwa karakteristik yang di bawah lebih lekas membengkok ke sumbu I dari pada kurve yang di atas. Ini disebabkan karena arus penguat magnet pada generator penguat terpisah tetap besarnya, sedang pada generator dengan penguat sendiri ini arus penguat magnet berkurang sebanding dengan tegangan jepit. Oleh karena itu E menjadi lebih kecil, hal ini mengakibatkan tegangan jepit yang lebih rendah dan arus medan yang lebih kecil. Medan jadi lebih lemah lagi dan tegangan jepit makin bertambah rendah.

Bilamana tahanan luar RL selalu diperkecil, pada suatu ketika  $E_k$  berkurang lebih cepat daripada RL, sehingga  $I = \dots$  berkurang, yang semestinya harus bertambah besar; artinya lengkung  $E_k = f(I)$  membelok kembali, sampai pada terjadinya hubung singkat  $E_k = \text{nol}$ , ( jadi  $I_m = 0$  ). Lewat b1 keadaan menjadi berubah,  $E_k$  berkurang lebih cepat daripada RL. Arus  $I_{0a}$  ini disebut arus hubung singkat. Arus ini diberikan oleh GGL yang di bangkitkan oleh magnet tinggal. Lihat gambar 3-69.



GAMBAR 3-69. Karakteristik luar generator shunt

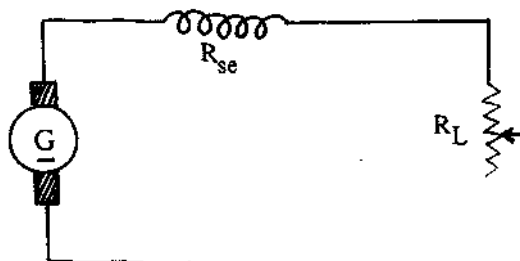
### 8.3. KARAKTERISTIK GENERATOR SERI

Seperti diketahui bahwa pada generator seri, lilitan penguat magnet dihubungkan seri terhadap lilitan jangkar, sehingga arus penguat magnet sama dengan arus jangkar maupun arus beban. Dalam keadaan tanpa beban, berarti arus penguat magnet sama dengan nol. Oleh karena itu karakteristik beban nol.

$E = f ( I_m )$  pada  $I = 0$  dan  $n$  konstan tidak dapat dibuat dengan penguatan sendiri ini. Begitu pula dengan karakteristik beban dan karakteristik pengatur, juga tidak dapat dibuat karena arus beban tidak dapat dipisahkan dengan arus penguat magnetnya. Karakteristik hubung singkat pada generator seri juga tidak dapat dibuat, karena dalam keadaan hubung singkat arus penguat magnet menjadi tak terhingga besarnya dan ini dapat mengakibatkan generator terbakar.

$$E = f ( I ) \text{ pada } R_m \text{ dan } n \text{ konstan}$$

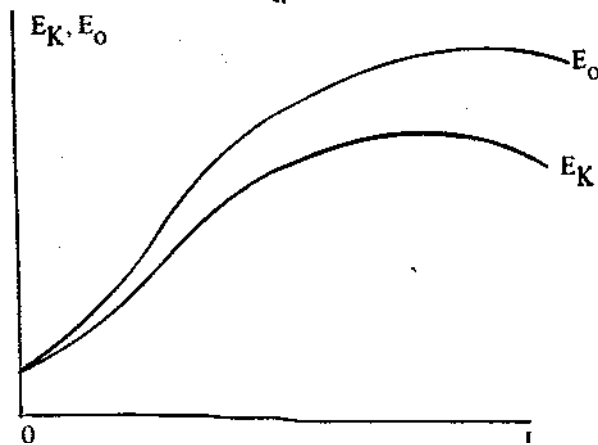
Skema rangkaian untuk menentukan karakteristik ini seperti pada gambar 3-70.



GAMBAR 3-70. Skema rangkaian untuk menentukan karakteristik generator seri.

Oleh karena arus beban juga merupakan arus medan, maka karakteristik luar daripada generator seri akan serupa dengan karakteristik beban nol, jadi seperti lengkung permagnitan.

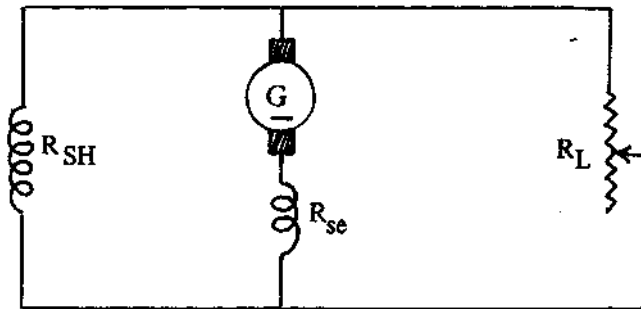
Dalam gambar 3-71 digambarkan karakteristik beban nol ( dibuat pada penguat terpisah ) dan karakteristik luar daripada generator seri. Sebagai akibat reaksi jangkar dan kerugian tegangan dalam jangkar dan lilitan penguat magnet, maka karakteristik luar letaknya lebih rendah daripada karakteristik beban nol. Dalam daerah jenuh bertambahnya GGL yang disebabkan oleh penambahan arus penguat magnet, tidak dapat lagi mengimbangi berkurangnya tegangan akibat reaksi jangkar dan kerugian tegangan. Oleh karena itu karakteristik luar itu akan selalu bertambah menyimpang dari karakteristik beban nol dan membengkok ke sumbu I.



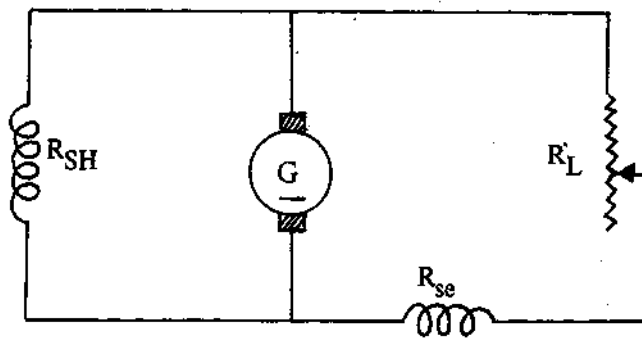
Gambar 3 – 71. Karakteristik luar generator seri

#### 8.4. KARAKTERISTIK GENERATOR KOMPON

Skema rangkaian untuk menentukan karakteristik pada generator kompon dengan kompon panjang dan kompon pendek adalah seperti gambar 3-72 dan gambar 3-73. Untuk generator kompon panjang maka lilitan penguat seri terletak pada rangkaian jangkar, sedangkan untuk generator kompon pendek lilitan penguat seri terletak pada rangkaian beban. Perhatikan gambar 3-72 dan 3-73.



Gambar 3 – 72. Skema rangkaian untuk menentukan karakteristik Generator kompon panjang



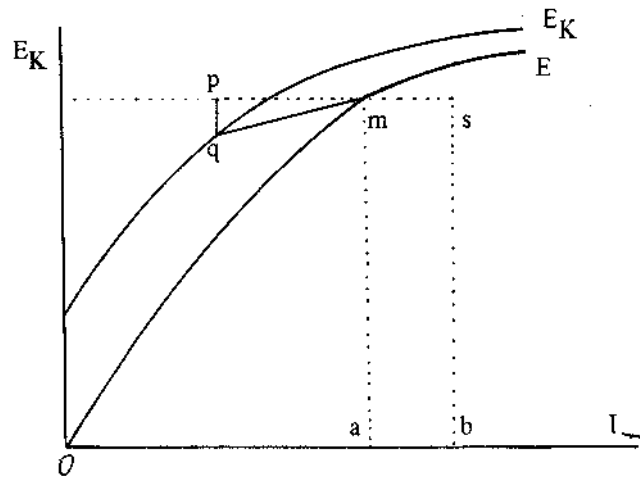
Gambar 3 – 73. Skema rangkaian untuk menentukan karakteristik Generator kompon pendek

Bila generator kompon pendek tidak dibebani maka lilitan penguat magnet seri tidak dialiri arus, sehingga generator hanya bekerja dengan lilitan penguat magnet shunt saja, dari itu karakteristik tanpa beban sama seperti pada generator shunt.

Bentuk karakteristik beban generator kompon adalah mirip karakteristik generator shunt, tetapi letaknya agak lebih tinggi karena generator ini mempunyai lilitan penguat magnet seri.

Pada gambar 3-74. dapat dilihat karakteristik beban generator kompon. Seperti diketahui pada generator penguat terpisah bila generator dibebani maka untuk mengimbangi penurunan tegangan, arus penguat magnet harus diperkuat. Lain halnya dengan generator kompon yang mana arus beban juga mengalir pada lilitan penguat magnet seri yang berarti akan memperkuat medan. Jadi besar arus penguat magnet yang seharusnya sebesar  $I_b$  pada generator penguat terpisah, tetapi pada generator kompon hanya dibutuhkan sebesar  $I_a$ .



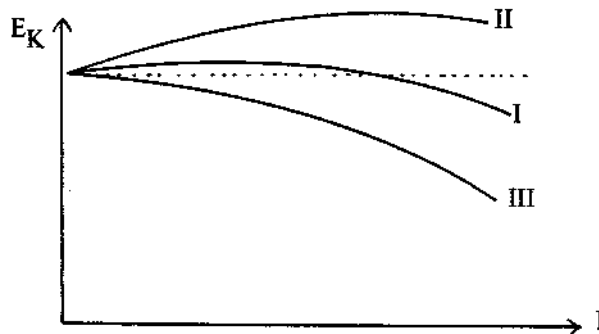


Gambar 3 – 74. Karakteristik beban generator kompon

Untuk GGL  $E_0$  pada beban nol diperlukan arus penguat magnet  $0a$ . Untuk menghilangkan reaksi jangkar, arus penguat magnet  $ab$  diperkuat. Dengan adanya lilitan penguat seri, arus penguat magnet dapat diperkecil dengan jumlah sp. Kalau kerugian tegangan diumpamakan sama dengan  $pq$ , maka  $q$  merupakan titik karakteristik beban.

Lilitan penguat magnet seri memperkuat mesin sebanding dengan beban. Kalau jumlah belitan lilitan penguat magnet seri itu bangi dan GGL ditambah sebanding dengan penurunan  $IaRa$ . Oleh karena itu tegangan generator kompon dalam batas-batas beban yang lebar hampir selalu tetap (curve I ). Perhatikan gambar 3-75.

Kalau belitan-belitan lilitan penguat magnet seri cukup banyak, maka jika beban bertambah, tegangan jepit akan naik ( curve II )



GAMBAR 3-75. Karakteristik-karakteristik luar generator kompon pendek.

## 9. RENDAMEN

Untuk mengubah daya mekanik menjadi daya listrik dari suatu generator arus searah mengalami proses-proses sebagai berikut :

- a. Daya mekanik yang digunakan untuk memutar generator, (dinyatakan dengan  $P_{mk}$ ) berubah menjadi daya alam ( dinyatakan dengan  $P_d = E I_a$  ).

Pada proses perubahan  $P_{mk} \rightarrow P_d$  mengalami kerugian daya yaitu kerugian daya akibat gesekan (gesekan as dengan bantalan, jangkar dengan udara, sikat dengan komutator). Kerugian akibat gesekan ini dinyatakan dengan simbol  $P_g$ .

Dari proses  $P_{mk} \rightarrow P_d$  diperoleh persamaan

$$P_{mk} = P_d + P_g$$

$P_{mk}$  : Daya mekanik yang digunakan untuk memutar generator

$P_d$  : Daya listrik dalam  $E I_a$

$P_g$  : Kerugian karena gesekan

- b. Daya listrik dalam ( $P_d$ ) berubah menjadi daya listrik luar  $P$ . Pada proses perubahan  $P_d \rightarrow P$  mengalami kerugian-kerugian akibat adanya rugi-rugi tembaga pada lilitan jangkar, lilitan medan seri/shunt ( $P_{tb}$ ) dan kerugian karena adanya rugi-rugi inti besi ( $P_b$ ).

Dari proses  $P_d \rightarrow P$  diperoleh persamaan

$$P_d = P + P_{tb} + P_b$$

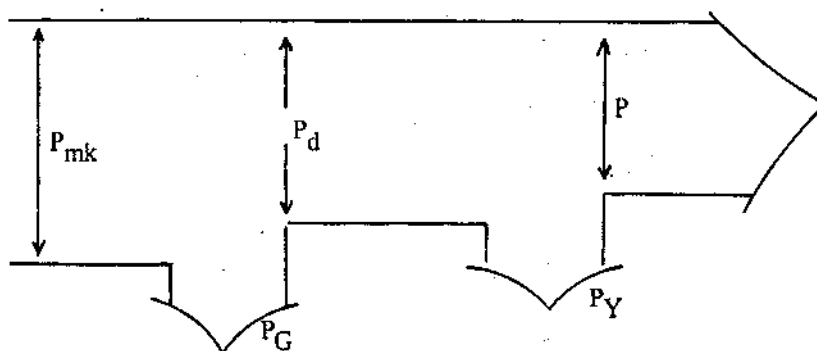
$P_d$  : Daya listrik dalam  $P_d = E I_a$

$P$  : Daya listrik yang dihasilkan  $P = E_k I_L$

$P_{tb}$  : Kerugian daya karena lilitan jangkar, lilitan shunt dan seri  
( $P_{tb} = I_a^2 R_a + I_{se}^2 R_{se} + I_{sh}^2 R_{sh}$ )

$P_b$  : Kerugian daya akibat adanya rugi-rugi inti besi

Rugi-rugi tembaga dan rugi-rugi inti besi keduanya menimbulkan panas, disebut juga kerugian Joule ( $P_j$ ) sehingga  $P_j = P_{tb} + P_b$



Gambar 3-76. Diagram Proses perubahan  $P_{mk} \rightarrow P$

Oleh karena dalam proses untuk mengubah daya mekanik menjadi daya listrik mengalami bermacam-macam kerugian, maka dalam hal ini pula terdapat beberapa macam daya guna atau rendemen (efisiensi).

Macam-macam daya guna :

- a. Daya guna bruto yang dinyatakan  $\eta_b$ , yaitu perbandingan dalam prosen antara daya listrik dalam dengan daya mekanik yang digunakan

$$\eta_b = \frac{Pd}{Pmk} \times 100 \%$$

- b. Daya Guna listrik yang dinyatakan dengan  $\eta_{lt}$ , yaitu perbandingan dalam prosen antara daya generator dengan daya listrik dalam

$$\eta_p = \frac{P}{Pd} \times 100 \%$$

- c. Daya Guna total yang dinyatakan dengan  $\eta$ , yaitu perbandingan dalam prosen antara daya generator dengan daya mekanik yang digunakan

$$\eta = \frac{P}{Pmk} \times 100 \%$$

## 10. Contoh Soal

1. Generator shunt 100 KW, 250 Volt. Pada rated load 250 volt, tegangan yang diinduksikan pada jangkar sebesar 285 Volt, arus pada lilitan penguatnya 6 A. Tentukan besarnya tahanan jangkar ( $R_a$ )

Jawab :

Gambar

$$P = V \times I$$

$$I = 100.000/250 = 400 \text{ Ampere}$$

$$I_a = I + I_{sh} = 400 + 6 = 406 \text{ Ampere}$$

$$E_a = V + I_a R_a$$

$$285 = 259 + 406 R_a$$

$$R_a = (285 - 259) / 406 = 0,0862 \text{ Ohm}$$

2. Sebuah generator dengan penguat terpisah mempunyai harga-harga sebagai berikut :

$$\text{Tegangan jepit } V = 234 \text{ Volt}$$

$$\text{Tahanan beban } = 117 \text{ Ohm}$$

$$\text{Tahanan Lilitan jangkar } = 1 \text{ Ohm}$$

Hitunglah besarnya :

a. Arus jangkar ( $I_a$ )

b. Besarnya GGL induksi  $E$ , jika kerugian tegangan pada sikat-sikat diabaikan.

Jawab :

$$V = 234 \text{ Volt} \quad R_L = 117 \text{ Ohm} \quad R_a = 1 \text{ Ohm}$$

$$E = V + I_a R_a + 2 \Delta e$$

$$I_a = I_L \quad \rightarrow \quad I_L = V / R_L$$

$$\text{a. } I_a = 234 / 117 = 2 \text{ Ampere}$$

$$\text{b. } E = 234 + 2 \cdot 1 + 0 = 236 \text{ Volt}$$

3. Sebuah generator dengan penguat shunt mempunyai data-data sebagai berikut :

$$\text{Tegangan jepit (klem)} = 240 \text{ volt}$$

$$\text{Tahanan lilitan penguat magnet shunt} = 240 \text{ Ohm}$$

$$\text{Tahanan lilitan Jangkar} = 1 \text{ Ohm}$$

$$\text{Tahanan beban} = 10 \text{ Ohm}$$

Hitunglah besarnya :

a. Arus jangkar

b. GGL induksi  $E$  jika kerugian tegangan pada sikat diabaikan

Jawab :

$$V = I_{sh} \cdot R_{sh} \quad \rightarrow \quad I_{sh} = V / R_{sh} = 240 / 240 = 1 \text{ A}$$

$$V = I_L \cdot R_L \quad \rightarrow \quad I_L = V / R_L = 240 / 10 = 24 \text{ A}$$

$$\text{a. } I_a = I_L + I_{sh} = 24 + 1 = 25 \text{ A}$$

$$\text{b. } E = V + I_a R_a + 2 \Delta e$$

$$= 249 + 25 \cdot 1 + 0 = 265 \text{ volt}$$

4. Sebuah generator seri diperoleh beberapa data yaitu :

$$\text{Tegangan jepit (klem)} = 240 \text{ volt}$$

$$\text{Tahanan lilitan penguat magnet seri} = 0,24 \text{ Ohm}$$

$$\text{Tahanan lilitan Jangkar} = 1 \text{ Ohm}$$

$$\text{Tahanan beban} = 10 \text{ Ohm}$$

Hitunglah besarnya :

a. Arus jangkar

b. GL induksi E jika kerugian tegangan pada sikat diabaikan

Jawab :

$$V = 240 \text{ volt} \quad R_a = 1 \text{ Ohm} \quad R_s = 0,24 \text{ Ohm} \quad R_L = 10 \text{ Ohm}$$

$$V = I_L \cdot R_L \quad \rightarrow \quad I_L = V/R_L = 240/10 = 24 \text{ A}$$

a.  $I_a = I_L = I_s = 24 \text{ A}$

b.  $E = V + I_a R_a + I_s R_s + 2 \Delta e$

$$= 240 + 24 \cdot 1 + 0,24 \cdot 24 + 0 = 269,76 \text{ volt}$$

5. Sebuah generator shunt dengan data-data sebagai berikut :

Tegangan jepit (klem)	= 240 volt
Tahanan lilitan penguat magnet	= 240 Ohm
Tahanan lilitan Jangkar	= 1 Ohm
Beban penuh yang dapat dilayani	= 5.000 watt
Rugi-rugi gesek	= 476 watt
Rugi tegangan sikat $2 \Delta e$	= 0

Hitunglah besarnya :

a. Efisiensi listrik

b. Efisiensi brutto

c. Efisiensi generator

Jawab :

$$V = 240 \text{ Volt} \quad R_{sh} = 240 \text{ volt} \quad R_a = 1 \text{ Ohm}$$

$$2 \Delta e = 0 \quad P_L = 5.000 \text{ watt} \quad P_g = 476 \text{ watt}$$

$$V = I_L \cdot R_L \quad \rightarrow \quad I_L = V/R_L = 5000/240 = 20,8 \text{ A}$$

$$V = I_{sh} \cdot R_{sh} \quad \rightarrow \quad I_{sh} = V/R_{sh} = 240/240 = 1 \text{ A}$$

$$I_a = I_L + I_{sh} = 20,8 + 1 = 21,8 \text{ A}$$

$$E = V + I_a R_a + 2 \Delta e$$

$$= 240 + 21,8 \cdot 1 + 0 = 261,8 \text{ volt}$$

$$P_d = E \cdot I_a = 261,8 \cdot 21,8 = 5707,24 \text{ watt}$$

$$P_m = P_d + P_g$$

$$= 5707,24 / 6183,24 \times 100 \%$$

$$= 6183,24 \text{ watt}$$

$$\eta_L = P_d / P_m \times 100 \%$$

$$= 5707,24/6183,24 \times 100 \% = 92,30 \%$$

$$\eta_b = P_L / P_d \times 100 \%$$

$$= 5000 / 5707,24 \times 100 \% = 87,60 \%$$

$$\eta_g = P_L / P_m \times 100 \%$$

$$= 5000 / 6183,24 \times 100 \% = 80,86 \%$$

5. Sebuah generator kompond pendek, lilitan penguat magnet seri mempunyai tahanan 0,018 ohm. Untuk mendapatkan tegangan output yang dikehendaki dipasang tahanan diverter paralel terhadap lilitan penguat magnet seri. Apabila beban penuhnya 120 A perlu disimpangkan arus sebesar 36 A melalui diverter tersebut agar tegangan outputnya sesuai dengan yang dikehendaki.

Hitunglah :

- a. Besarnya tahanan diverter
- b. Panjang kawat jika diverter tersebut digunakan kawat manganin (tahanan jenisnya = 265 dan luas penampangnya  $15.616 \text{ mm}^2$  )

Jawab :

$$a. I_{se}/I_d = R_d/R_{se}$$

$$I L = I_{se} + I_d \rightarrow I_{se} = 120 - 36 = 84 \text{ A}$$

$$84/36 = R_d/0,018 \rightarrow R_d = 84/36 \times 0,018 = 0,042 \text{ ohm.}$$

$$b. R = \rho L/A \rightarrow L = R \times A/\rho \\ = (0,042 \times 15616)/256 = 2,48 \text{ A}$$

## 11. SOAL-SOAL LATIHAN

1. Sebuah generator 20 KW, 220 volt mempunyai tahanan jangkar 0,07 ohm dan tahanan kumparan shunt 200 ohm. Hitunglah tenaga yang dibangkitkan pada jangkar pada saat generator bekerja pada rated outputnya 20,83 KW.
2. Generator kompond panjang 100 KW, 120 volt, 870 rpm. Tahanan jangkar 0,008 ohm. Tahanan kumparan seri 0,01 ohm, tahanan kumparan shunt 30 ohm. Penurunan tegangan pada sikat-sikat 1,5 volt. Rugi gesekan 250 watt. Rugi beban linier 1 % dari beban, rugi besi 125 watt. Tentukan GGL dan efisiensi pada beban penuh.
3. Generator kompond panjang 250 KW, 230 volt, tahanan jangkar 0,007 ohm, arus penguat medan shunt 12 A, Tahanan penguat seri 0,002 ohm. Jika arus beban 800 A pada tegangan 230 volt dan rugi beban linier 5500 watt. Tentukan efisiensi dari generator tersebut.

## MOTOR ARUS SEARAH ( MOTOR DC )

### 1. PENGERTIAN MOTOR ARUS SEARAH

Motor arus searah ialah suatu mesin yang berfungsi mengubah tenaga listrik arus searah (listrik DC) menjadi tenaga gerak atau tenaga mekanik, di mana tenaga gerak tersebut berupa putaran daripada rotor.

Dalam kehidupan kita sehari-hari motor DC dapat kita lihat pada motor starter mobil, pada tape recorder, pada mainan anak-anak dan sebagainya. Sedangkan pada pabrik-pabrik motor DC kita jumpai pada traksi, elevator, conveyer, dan sebagainya.

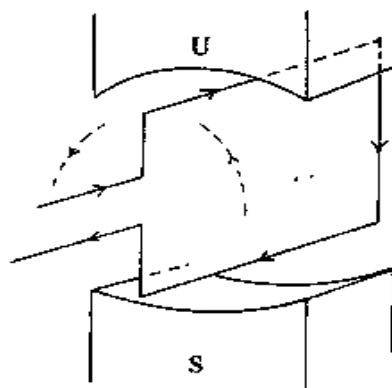
Antara motor DC dan generator DC tak ada perbedaan konstruksi. Pada *prinsipnya* motor DC bisa dipakai sebagai generator DC, sebaliknya generator DC dapat dipakai sebagai motor DC.

Dengan sendirinya generator DC yang dimaksudkan di atas bukanlah generator DC yang penyearah (rectifier) nya penyearah silicon/dioda, tetapi dengan penyearah mekanik (komutator). Generator DC yang berdasarkan prinsip generator AC yang dilengkapi rangkaian penyearah silicon/dioda tidak dapat dioperasikan sebagai motor DC.

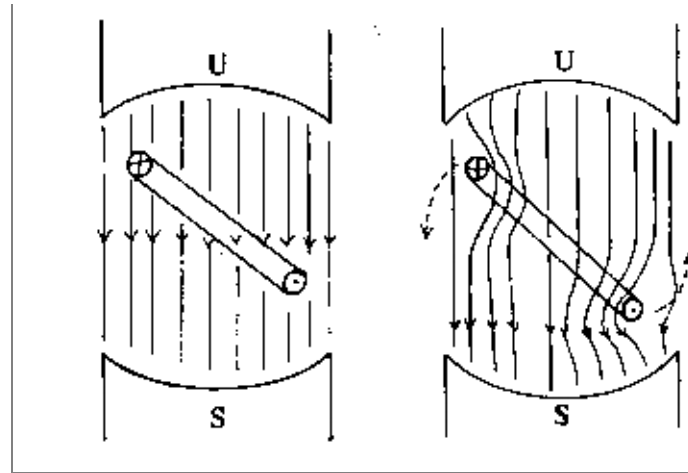
### 2. DASAR - DASAR MOTOR ARUS SEARAH

Pada Generator arus searah, telah kita pelajari bahwa disekitar kawat berarus listrik terdapat medan-medan magnet (*Percobaan Oersted*).

Bilamana arus listrik yang mengalir dalam kawat arahnya menjauhi kita (maju), maka medan-medan yang terbentuk disekitar kawat arahnya searah dengan putaran jarum jam. Sebaliknya bilamana arus listrik yang mengalir dalam kawat arahnya mendekati kita (mundur) maka medan-medan magnet yang terbentuk disekitar kawat arahnya berlawanan dengan arah putaran jarum jam. (*Percobaann Maxwell*).GAMBAR 4-1. Belitan berarus terletak dalam medan magnet.

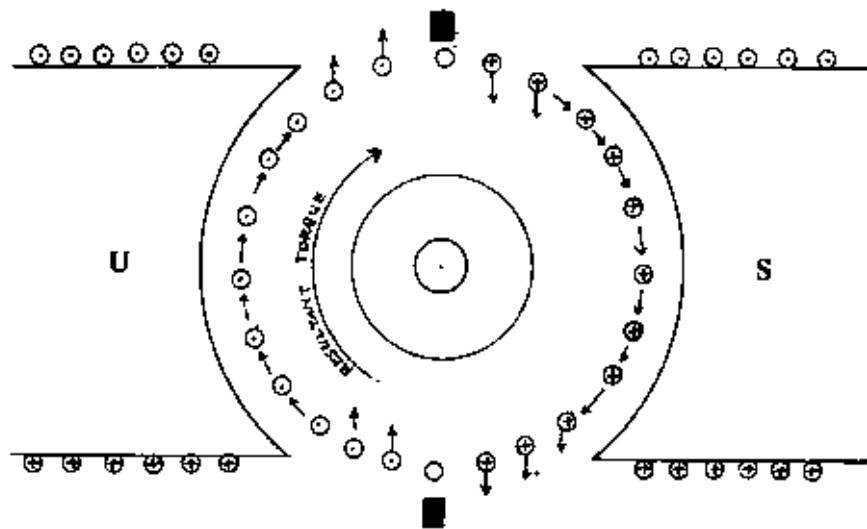


GAMBAR 4-1. Belitan berarus terletak dalam medan magnet.



GAMBAR 4-2. Arah putaran pada kumparan berarus yang terletak dalam medan magnet.

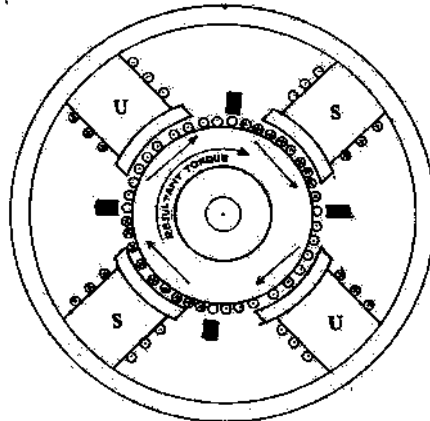
Seperti halnya pada generator arus searah, rotor motor arus searah mempunyai kumparan tidak hanya satu. Rotornya terdiri dari kumparan dan komutator yang banyak untuk mendapatkan torsi yang terus menerus (continue). Lihat gambar 4-3.



GAMBAR 4-3. Resultant torque ditimbulkan oleh gaya-gaya pada masing-masing sisi kumparan.

Pada mesin berkutub 4 terbangkitnya torsi digambar pada gambar 4-4 .





GAMBAR 4-4 . Resultant torsi pada mesin berkutub 4.  
 Besarnya torsi pada jangkar adalah :

$$T = \frac{P}{20\pi a} Z I_a \phi \text{ dyne - cm} \dots\dots\dots (4-1)$$

di mana P jumlah kutub  
 a jumlah cabang paralel lilitan jangkar  
 Z jumlah kawat penghantar pada kumparan lilitan jangkar (sisi kumparan).  
 $I_a$  arus jangkar  
 $\phi$  flux magnet yang melewati jangkar

$$\phi = B_{av} l \left( \frac{\pi d}{P} \right)$$

d : adalah diameter jangkar dalam cm.

Karena  $\frac{PZ}{20\pi a}$  merupakan nilai yang konstan.

$$T = k Z I_a \phi \text{ dyne - cm} \dots\dots\dots (4-2)$$

di mana  $k = \frac{PZ}{20\pi a}$

Apabila torsi tersebut dinyatakan dalam satuan pound-feet.

$$T = 0,117 \frac{P}{a} Z I_a \phi 10^{-8} \text{ lb. ft.} \dots\dots\dots (4-3)$$

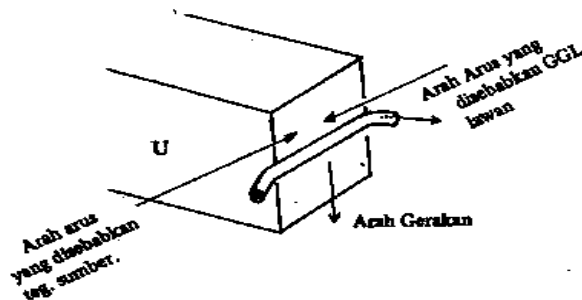
Dari persamaan di atas ternyata bahwa torsi motor DC adalah sebanding dengan arus jangkar dan flux magnet yang melewati jangkar.

### 3. GGL LAWAN (E)

Misal tahanan dari sebuah jangkar motor DC 10 HP 110 Volt adalah 0,05 ohm. Jika jangkar ini dihubungkan dengan sumber 110 Volt, maka menurut Hukum Ohm arusnya.

$$I_a = \frac{110}{0,05} = 2.200 \text{ Ampere}$$

Apabila jangkar tersebut berputar dalam medan magnetnya arus jangkar ( $I_a$ ) tidak bisa dihitung berdasarkan hukum ohm seperti di atas. Dalam hal ini jangkar dari motor DC sama halnya dengan jangkar dari suatu generator, sehingga terjadi GGL lawan.



**GAMBAR 4-5.** Proses timbulnya GGL lawan.

Proses terjadinya GGL lawan adalah :

1. Kumputan jangkar (terletak diantara kutub-kutub magnet) diberi sumber DC.
2. Pada kumputan-kumputan jangkar timbul torsi sehingga jangkar berputar (arahnya sesuai dengan hukum tangan kiri).
3. Dalam hal ini jangkar berputar dalam medan magnet sehingga timbul GGL (arah GGL induksi tersebut sesuai dengan hukum tangan kanan).
4. Arah GGL induksi tersebut berlawanan dengan arah GGL sumber sehingga kita sebut GGL, *lawan*.

Jadi GGL lawan pada motor DC adalah GGL yang terjadi pada jangkar motor DC (pada waktu motor dioperasikan/berputar), yang disebabkan karena jangkar tersebut berputar dalam medan magnet.

Arah GGL lawan menentang arah GGL sumber, sehingga pada waktu motor beroperasi arus jangkarnya menjadi :

$$I_a = \frac{U - E}{R_a} \dots\dots\dots (4-4)$$

di mana U : tegangan jepit sumber  
 E : GGL lawan  
 $R_a$  : tahanan jangkar

Besarnya GGL lawan (E) adalah :

$$E = \frac{P}{a} \cdot \frac{n}{60} \cdot Z \phi \cdot 10^{-8} \text{ Volt} \dots\dots\dots (4-5)$$

Persamaan (4-5) ini sesuai dengan persamaan pada generator DC

#### 4. JENIS-JENIS MOTOR DC

Seperti halnya pada generator DC, berdasarkan *sumber arus penguat magnetnya* motor DC dapat dibedakan atas :

- Motor DC penguat terpisah, bila arus penguat magnet diperoleh dari sumber DC di luar motor.
- Motor DC dengan penguat sendiri, bila arus penguat magnet berasal dari motor itu sendiri.

Berdasarkan *hubungan lilitan penguat* magnet terhadap lilitan jangkar motor DC dengan penguat sendiri dapat dibedakan :

- Motor shunt
- Motor seri
- Motor kompon 
 <span style="font-size: 2em; vertical-align: middle;">{
 motor kompon panjang  
 motor kompon pendek

Telah diterangkan bahwa antara motor DC dan generator DC *tidak ada perbedaan konstruksi*. Oleh karena itu bentuk fisis motor shunt akan sama dengan bentuk fisis generator shunt. Demikian pula untuk, type-type yang lain. Rangkaian-rangkaian listrik juga sama. Perbedaannya ialah arah-arah arusnya, karena generator DC mengeluarkan/menghasilkan tenaga listrik DC. Sedangkan motor DC dimasuki tenaga listrik DC untuk menghasilkan putaran. Dengan adanya perbedaan arah-arah arus maka *persamaan-persamaan arus/tegangan mengalami perubahan*.

Konstruksi masing-masing type tidak digambarkan lagi di sini, karena antara motor DC dan generator DC tidak ada perbedaan. Pada pemilihan (penggunaan) motor DC harus disesuaikan dengan karakteristik dan konstruksi dari mesin. *Motor shunt* : mempunyai kecepatan yang hampir konstan. Pada tegangan jepit (U) konstan, motor shunt mempunyai putaran hampir konstan walaupun terjadi perubahan beban. Perubahan kecepatan hanya sekitar 10%. Pemakaian misalnya untuk kipas angin, blower, pompa centrifugal, elevator, pengaduk, mesin cetak, juga untuk pengerjaan kayu dan logam.

*Motor seri* : dapat memberi momen yang besar pada waktu start dengan arus start yang rendah. Juga dapat memberi perubahan kecepatan/beban dengan arus yang kecil dibandingkan dengan motor type lain, tetapi kecepatan menjadi besar bila beban rendah atau tanpa beban dan hal ini sangat berbahaya. Dengan mengetahui sifat ini dapat dipilih motor seri untuk daerah perubahan kecepatan yang luas. Misalnya : untuk traksi, pengangkat dan lain-lain.

*Motor kompon* : mempunyai sifat diantara motor seri dan motor shunt, tergantung mana yang kuat lilitannya (kumparan seri atau shuntnya) umumnya mempunyai momen start yang besar, sehingga seperti pada motor seri. Perubahan kecepatan sekitar 25% terhadap kecepatan tanpa beban. Pemakaian untuk pompa plunger, pemecah, bulldozer, elevator dan lain-lain.

## 5. PENGASUTAN & Pengereman

Ada beberapa cara untuk mengasut motor DC.

1. Disambung langsung
2. Dengan rheostat

### 5.1. CARA ASUTAN (STARTING) DENGAN DISAMBUNG LANGSUNG

Cara ini adalah yang paling - sederhana dan mudah, tetapi arus asut (arus start) nya besar. Kalau jangkar belum bergerak padahal jangkar biasanya mempunyai tahanan yang sangat kecil maka pada saat disambung dengan jala-jala arus jangkar ( $I_a$ ) besar.

$$I_{st} = \frac{U}{R_a} \text{ besar sekali.}$$

Misal motor U = 110 Volt

$$R_a = 0,05 \text{ ohm}$$

Kalau disambung langsung (tanpa diberi tahanan asut) arus start

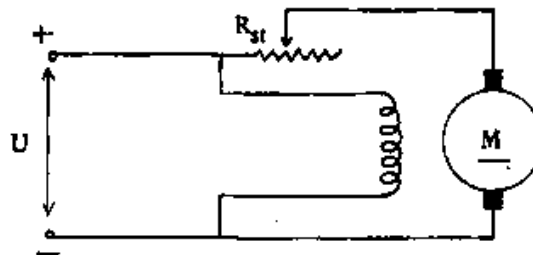
$$I_{st} = \frac{110}{0,05} = 2.200 \text{ ampere}$$

Arus ini sangat besar hingga dapat merusakkan kumparan jangkarnya. Kalau motonya kecil bisa cepat berputar karena momen kelembaman rotornya kecil begitu pula arus asutnya. Jadi untuk motor yang kecil bisa langsung disambung dengan sumber. Sewaktu motor belum berputar,  $E = 0$  karena besarnya GGL lawan ( $E$ ) adalah  $Cn\phi$  Volt. Pada waktu start  $n = 0$  (belum berputar), sehingga  $E = 0$ . Oleh karena itu pada waktu start arusnya besar sekali.

$$\left( I_{start} = \frac{U}{R_a} \right)$$

## 5.2. CARA ASUTAN (STARTING) DENGAN RHEOSTAT

Untuk membatasi arus start yang besar, pada rangkaian jangkar dipasang Rheostat.



GAMBAR 4-6. Rheostat sebagai tahanan asut pada motor shunt.

Mula-mula seluruh tahanan Rheostat dipakai, arus jangkar dibatasi oleh  $R_{st}$  arus penguat magnet ( $I_m$ ) menjadi besar.

Sesudah bergerak, GGL lawan ( $E$ ) timbul :

$$E = \frac{P}{a} \frac{n}{60} Z \phi 10^{-8} \text{ Volt.}$$

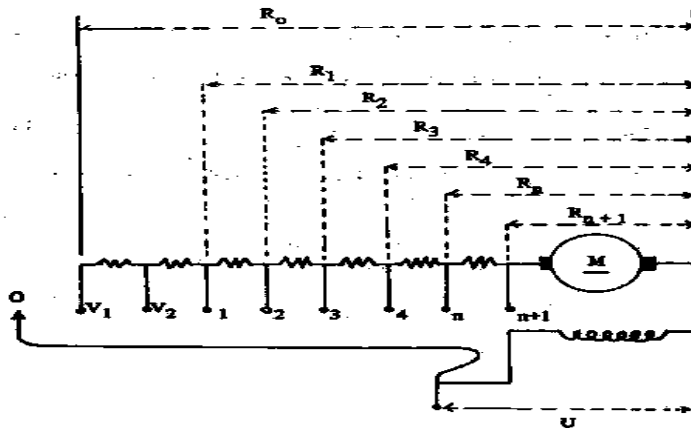
$$\frac{P}{a} \frac{Z}{60} 10^{-8} \text{ merupakan bilangan konstan.}$$

Sehingga

$$E = Cn\phi \dots\dots\dots (4-6)$$

Tahanan asut ( $R_{st}$ ) dikurangi sedikit demi sedikit, akhirnya  $R_{st}$  pada kedudukan minimum ( $R_{st} = 0$ ) dan motor berputar pada kecepatan normal.

## 5.3. PERHITUNGAN TAHANAN ASUT



GAMBAR 4-7. Motor shunt dengan tahanan asut ( $R_{st}$ ) yang dibentangkan.

Kalau engkol berada pada posisi kontak nol, maka rangkaian jangkar terputus. Pada motor-motor yang besar umumnya di muka tingkat mula (posisi 1) dipasang satu sampai tiga tingkat awal (V). Maksudnya ialah supaya arus start mencapai kemampuan yang diizinkan, tidak mendadak. Apabila  $U$  merupakan tegangan jepit yang dipasang,  $I_0$  arus jangkar pada kedudukan tersebut maka :

$$R_0 = \frac{U}{I_0} \dots \dots \dots (4-7)$$

Sebenarnya motor mulai bergerak pada kedudukan 1.

Dalam kedudukan ini arus start ( $I_{st}$ ) nya adalah :

$$I_{maks} = \frac{U}{R_1} \dots \dots \dots (4-8)$$

Sekarang jangkar bergerak dan timbullah GGL lawan ( $E$ ) sehingga arus berkurang menjadi :

$$I_{maks} = \frac{U - E_1}{R_1} \dots \dots \dots (4-9)$$

Pemilihan besarnya  $I_{maks}$  dan  $I_{min}$  tergantung pada pembebanan

- $I_{min} = (0,5 - 0,6) I$  bagi setengah beban
- $= (1,1 - 1,2) I$  bagi beban penuh.
- $I_{maks} = 1,5 I_{min}$  untuk motor dengan daya  $\leq 5$  KW.
- $= (1,25 - 1,35) I_{min}$  untuk motor dengan daya  $> 5$  KW

Kalau arus sudah mencapai nilai minimal tertentu, maka perlulah engkol ditempatkan pada kedudukan kontak 2. Oleh karena pada saat engkol dipindahkan  $n$  tidak berubah ( $E$  pun tidak berubah), arus naik menjadi :

$$I_{maks} = \frac{U - E_1}{R_2} \dots \dots \dots (4-10)$$

Sekarang jangkar dipercepat dan GGL lawan menjadi lebih tinggi, Apabila arus, turun menjadi  $I_{min}$ , GGL lawan menjadi  $E_2$  sehingga :

$$I_{\min} = \frac{U - E_2}{R_2} \dots\dots\dots (4-11)$$

Selanjutnya engkol dipindah lagi pada kedudukan kontak 3 berturut-turut terdapat :

$$I_{\max} = \frac{U - E_2}{R_3} \dots\dots\dots (4-12)$$

$$I_{\min} = \frac{U - E_1}{R_1} \dots\dots\dots (4-13)$$

Dari persamaan (11) dan (12) ternyata bahwa :

$$\frac{I_{\min}}{I_{\max}} = \frac{R_2}{R_1} \text{ atau } R_2 = \frac{I_{\min}}{I_{\max}} R_1$$

Dari persamaan (13) dan (14) ternyata bahwa :

$$\frac{I_{\min}}{I_{\max}} = \frac{R_3}{R_{21}} \text{ atau } R_3 = \frac{I_{\min}}{I_{\max}} R_2$$

Kalau  $\frac{I_{\min}}{I_{\max}} = \lambda$  maka :

$$\begin{aligned} R_2 &= \lambda R_1 \\ R_3 &= \lambda R_2 = \lambda^2 R_1 \\ R_4 &= \lambda R_3 = \lambda^3 R_1 \\ R_{n+1} &= \lambda R_n = \lambda^n R_1 \dots\dots\dots (4-14) \end{aligned}$$

$$R_1 = \frac{U}{I_{st}} R_{n+1} \dots\dots\dots = \text{maka :}$$

$$R_{n+1} = \lambda^n \frac{U}{I_{\max}} \dots\dots\dots (4-15)$$

Dari rumus-rumus di atas dapat dihitung banyaknya tingkat (n), tahanan dari masing-masing tingkat  $r_1$ ,  $r_2$  dan selanjutnya :

$$\begin{aligned} r_1 &= R_1 - R_2 \\ r_2 &= R_2 - R_3 \text{ dan seterusnya.} \end{aligned}$$

#### 5.4. ALAT UNTUK STARTING (PENGASUTAN)

Untuk starting motor DC alat yang sering dipergunakan adalah *three-point starting rheostat*, *four-point starting rheostat*, *automatic starter*.

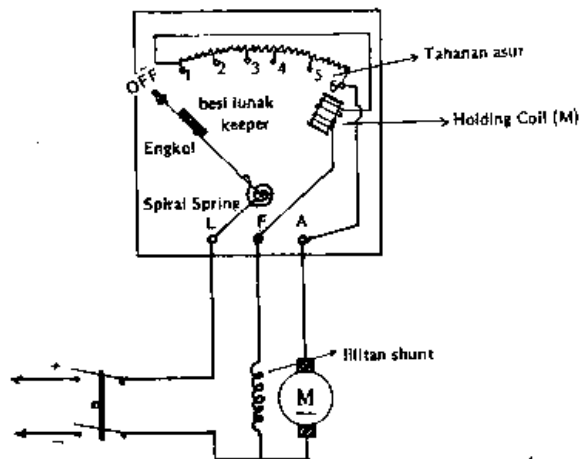
Disebut *three-point starting rheostat* karena pada terminal terdapat 3 ujung yaitu A (armature), F (field) dan L (line). Pada *four-point starting rheostat* terdapat 4 ujung yaitu L, (line),  $L_2$  (line), F (field) dan A (armature).

Baik type pertama maupun type kedua, keduanya dilengkapi dengan *holding coil* (M). Lihat gambar 4-8, 4-10.

Guna *holding coil* di sini adalah untuk melindungi motor bila ada gangguan sumber tenaga. Bila  $I = 0$  kemagnitan pada *holding coil* hilang sehingga pegas menarik lengan (engkol) dan kembali ke kedudukan off. Oleh karena itu apabila

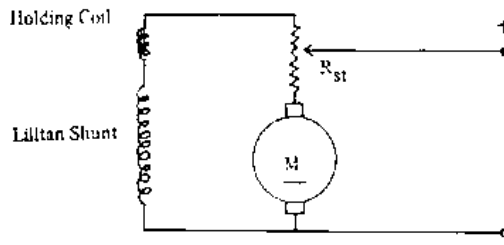
tegangan sumber *hidup lagi* jangkar tidak akan mengalami kerusakan. Juga apabila *rangkaian penguat terputus* ini akan berbahaya karena kalau engkol tidak kembali pada kedudukan off putaran motor menjadi sangat cepat dan berbahaya (free running).

Perbedaan antara kedua type tersebut adalah pada three-point starting rheostat holding coil (M) dipasang *seri terhadap lilitan penguat magnet*, sedangkan pada four-point starting rheostat holding coil (M) dipasang *paralel terhadap jala-jala*.



GAMBAR 4-8. Three-point starting rheostat yang dipasang pada motor shunt.

Gambar 4-8. dapat disederhanakan seperti terlihat pada gambar 4-9.

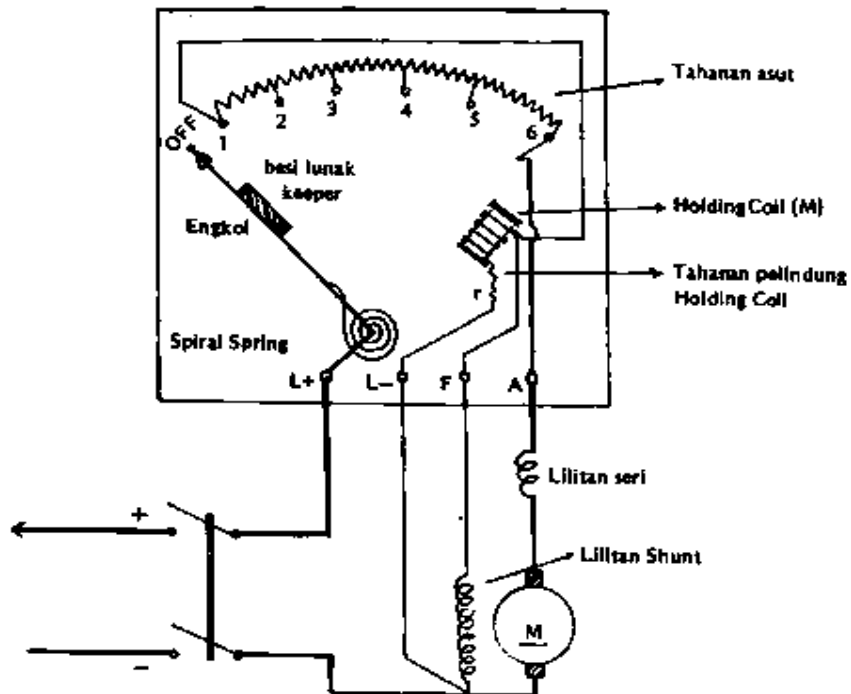


GAMBAR 4-9. Rangkaian listrik three point starting rheostat.

Dari gambar 4-9 dapat dilihat ada 2 rangkaian listrik :

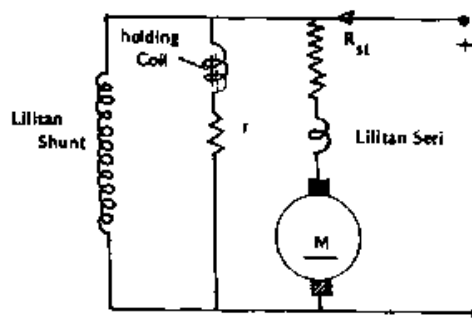
- a. rangkaian penguat terdiri dari  $R_{sh}$  dan holding coil.
- b. rangkaian jangkar dan rheostat (terdiri dari  $R_a$  dan  $R_{st}$ ).

Pada rangkaian a, arus yang mengalir pada holding coil sama dengan arus pada lilitan penguat shunt, sehingga pada saat kedudukan  $R_{st}$  kecil arus penguat/holding coil menjadi kecil dan mungkin arus holding coil tak mampu menahan pegas dan engkol starter kembali pada posisi off. Rheostat di sini tidak dapat dipakai sebagai pengatur putaran. Pada four-point starting rheostat holding coil M paralel terhadap jala-jala. Perhatikan gambar 4-10.



GAMBAR 4-10. Four-point starting rheostat dipasang pada motor kompon panjang.

GAMBAR 4-10. dapat disederhanakan seperti pada GAMBAR 4-11.



GAMBAR 4-11. Rangkaian listrik four-point starting rheostat yang dipasang pada motor kompon panjang.

Jika engkol tidak berada pada posisi off arus jala-jala terbagi atas 3 bagian.

- Rangkaian jangkar terdiri atas  $R_a$ ,  $R_{se}$ ,  $R_{st}$ .
- Rangkaian holding coil terdiri atas holding coil dan  $r$  (tahanan untuk pelindung arus).
- Rangkaian penguat shunt ( $R_{sh}$ ).



Dengan susunan seperti di atas perubahan arus penguat tidak akan mempengaruhi arus pada holding coil.

Ada juga alat start motor DC yang digabungkan dengan alat pengatur putaran yang disebut *Controller*.

### **Automatic starter**

Mengasut motor DC selain dengan cara manual juga banyak dipergunakan dengan cara automatic (automatic starter). Automatic starter mempunyai kontaktor yang digerakkan secara elektro magnetic. Kerja elektromagnet sudah diatur sebelumnya sehingga kerja kontaktor berturut-turut dengan teratur. Kontaktor-kontaktor tersebut mengatur tahanan yang tersambung sehingga membatasi arus pada waktu pengasutan (start). Automatic starter biasanya dibuat berdasarkan bahwa GGL lawan motor bertambah sebanding dengan kecepatan bila penguatan tetap. Rangkaian untuk automatic starter (termasuk rangkaian PENGENDALI) tidak dibicarakan pada buku ini.

## **5.5. Pengereman**

Pembicaraan di sini adalah pengereman secara listrik. Pengereman secara listrik dapat dilaksanakan dengan 3 macam cara yaitu :

- a. secara regeneratif.
- b. secara dinamis.
- c. secara plugging.

### **a. Pengereman secara regeneratif**

Ialah dengan mengembalikan energi ke jala-jala. Kalau sebuah mesin shunt berputar sebagai motor dan disebabkan karena bebannya menyebabkan motor berputar melebihi putaran tanpa beban, maka dalam hal seperti itu  $E$  dari motor akan lebih besar dari tegangan jala-jala ( $U$ ).

$$U = E + I_a R_a$$

$$I_a R_a = U - E$$

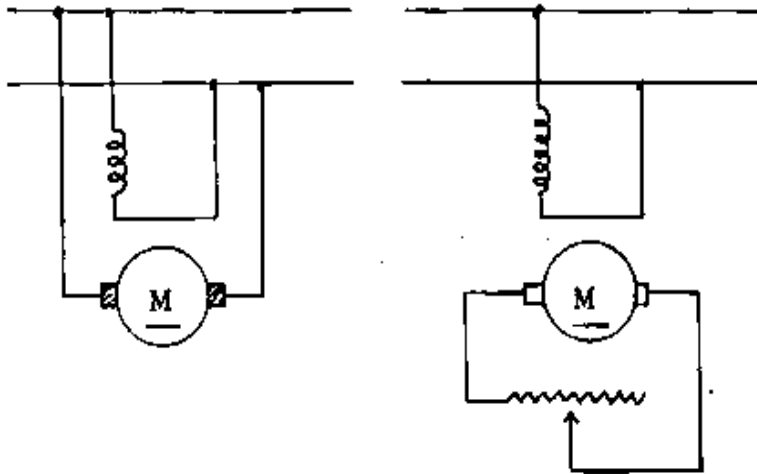
$$I_a = \frac{U - E}{R_a} \text{ harganya negatip}$$

$E > U$  sehingga  $I_a$  negatip (mengalir ke jala-jala). Jadi bekerjanya sebagai generator yang bekerja paralel terhadap jala-jala. Untuk pengereman regeneratif motor seri, rangkaian serinya harus diubah menjadi rangkaian shunt dahulu dan bekerjanya sebagai motor shunt. Pengereman regeneratif dari motor seri ini banyak dilakukan pada traksi (misal trem listrik).

### **b. Pengereman secara dinamis**

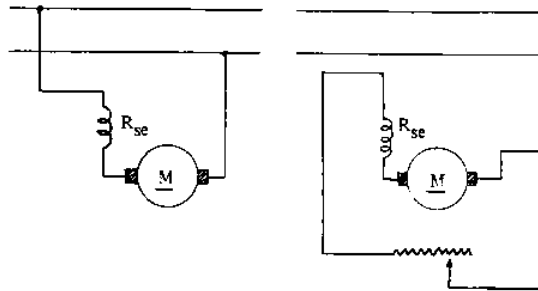
Tegangan listrik yang dihasilkan motor sebagai generator diubah menjadi panas. Pada motor shunt rangkaian jangkar diputus dari jala-jala kemudian disambung dengan suatu tahanan sebagai beban. Kemudian tegangan listrik yang dihasilkan diubah menjadi panas, sehingga dalam hal ini motor shunt bekerja

sebagai generator dengan penguat terpisah. Tahanannya diubah-ubah sampai menjadi kecil dan pada saat tahanan habis motor berhenti. Lihat gambar 11-7.



GAMBAR 4-12. Pengereman dinamis pada motor shunt.

Pada motor seri, bila rangkaian jangkar dilepas, maka rangkaian penguatnya juga akan terputus sehingga tak ada penguatan. Oleh karena itu untuk pengereman secara dinamis belitan seri disertakan pada rangkaian jangkar, Pengereman motor seri secara dinamis dilaksanakan seperti pada motor shunt.



GAMBAR 4-13. Pengereman secara dinamis pada motor seri.

### C. Pengereman secara plugging

Cara ini dapat dilaksanakan dengan 2 cara :

1. Beban menyebabkan motor berputar kearah yang berlawanan.
2. Putaran motor berubah, karena arus pada jangkar berubah arahnya.

## 6. MENGGATUR & MEMBALIK PUTARAN MOTOR DC

Pada motor DC berlaku persamaan :

$$U = E + I_a R_a$$

$$E = Cn \phi \text{ Volt (di mana } C = \frac{P}{a} \frac{1}{60} Z 10^{-8})$$

$$n = \frac{E}{C\phi}$$

Dari persamaan-persamaan di atas kita dapatkan :

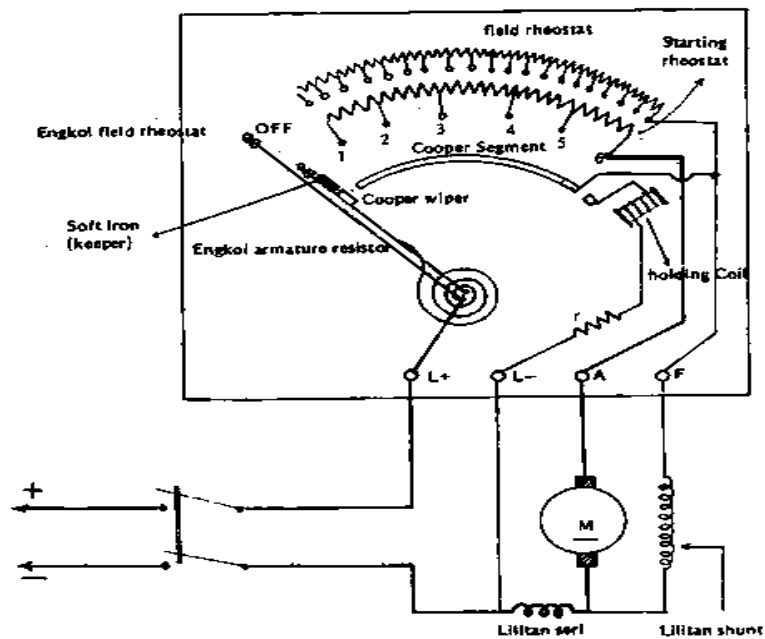
$$n = \frac{U - I_a R_a}{C\phi} \dots\dots\dots (4-16)$$

Berdasarkan persamaan (18) kecepatan motor DC dapat dilakukan dengan :

1. Mengubah tahanan rangkaian jangkar ( $R_a$ )
2. Mengubah flux magnet ( $\phi$ )
3. Mengubah tegangan jepit ( $U$ )

**6.1. CONTROLLER :**

Pada alat pengaturan putaran, kadang-kadang dijadikan satu dengan alat pengasutan (starting) sekaligus. Alat tersebut disebut controller (lihat gambar 4-14).



GAMBAR 4-14. Controller yang dipasang pada, motor DC kompon pendek.

Engkolnya ada 2 macam :

- A. *Engkol pendek* yang berhubungan dengan tahanan asut, diputar searah dengan arah putaran jarum (dipegang pegas atau spiral spring).
- B. *Engkol panjang* yang berhubungan dengan rheostat kutub magnet (field rheostat). Engkol ini tidak dipegang oleh pegas.

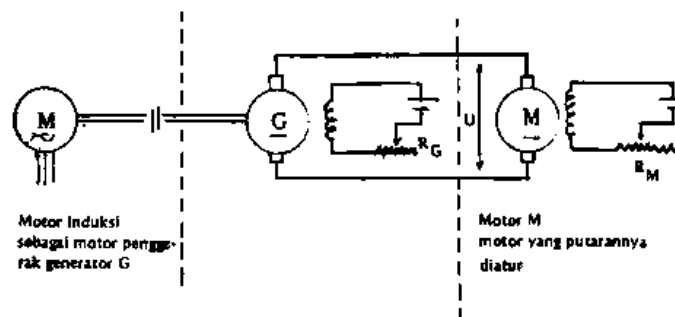
Cooper wiper dipasang pada engkol pendek dan menempel terus pada cooper segment pada waktu engkol digerakkan. Pada kedudukan terakhir, engkol

pendek dipegang oleh holding coil (M). Jadi sebelum engkol mencapai kedudukan terakhir, holding coil belum mendapatkan tegangan. Karena holding coil mendapat tegangan tersebut maka holding coil menarik engkol pendek setelah engkol panjang dan engkol pendek mencapai kedudukan terakhir, engkol panjang (pengatur Medan magnet) bisa diatur bebas untuk mengatur putaran motor. Pada waktu motor diasut, kedua engkol bergerak forward bersama-sama.

## 6.2. PENGATURAN PUTARAN SECARA WARD LEONARD,

Pada cara-cara pengasutan & pengaturan putaran yang sudah dibicarakan, pada pengasutan sebagian daya yang dimasukkan pada tahanan asut ( $R_{st}$ ) berubah menjadi panas.

Apabila daya motor besar dan dilakukan berulang-ulang (misal motor-motor kuteri dipertambahan) kerugian daya menjadi besar sekali. Bila motor diinginkan tidak banyak mengalami kerugian tenaga pada waktu start (pengasutan), untuk kerja dengan perubahan kecepatan yang luas maka cara yang paling efisien adalah dengan mengubah tegangan jepit motor dengan penguat terpisah sehingga didapat flux magnet ( $\phi$ ) yang tetap penuh untuk semua macam kecepatan. Selain diperoleh daerah *Pengaturan yang luas* (dari tegangan jepit nol sampai tegangan penuh), *pengaturan putaran halus* dan *effisien* karena tidak ada kerugian di tahanan asut ( $R_{st}$ ). Akan lebih untung lagi pada motor DC yang seringkali harus diasut misal motor untuk lift. Kerugiannya ialah biaya yang sangat tinggi akibat adanya penambahan generator dan penggeraknya. Cara yang dipakai adalah cara *Ward Leonard*.



GAMBAR 4-15. Pengatur putaran Ward Leonard.

Pengatur putaran Ward Leonard dilaksanakan dengan mengubah tegangan jepit  $U$ , flux magnet ( $\phi$ ) konstan. Penggerak mula (motor induksi) dipergunakan untuk menggerakkan generator  $G$ , kecepatan konstan. Perubahan tahanan  $R_G$  (field rheostat generator  $G$ ) akan merubah tegangan jepit  $U$  yang diberikan kepada motor yang diatur putarannya ( $M$ ).

Untuk *mengatur putaran motor  $M$*  dilakukan dengan mengubah tegangan jepit  $U$  (tegangan jangkar). Untuk itu dilakukan dengan mengatur rheostat pada belitan penguat generator DC  $G$  (*mengatur field rheostat generator DC  $G$* ).

Pada waktu *pengasutan* juga dilakukan dengan mengatur tegangan jepit (tegangan jangkar) generator DC  $G$ . Umumnya satu generator DC memberikan tenaga kepada beberapa motor DC (yang bekerja pada kondisi yang sama).

### 6.3. MEMBALIK ARAH PUTARAN MOTOR DC

Persamaan  $T = k I_a \phi$  dyne-cm.

Dari persamaan di atas :

- jika  $I_a$  negatif  $\rightarrow T$  negatif
- jika  $\phi$  negatif  $\rightarrow T$  negatif
- jika  $I_a$  negatif,  $\phi$  negatif  $\rightarrow T$  positif

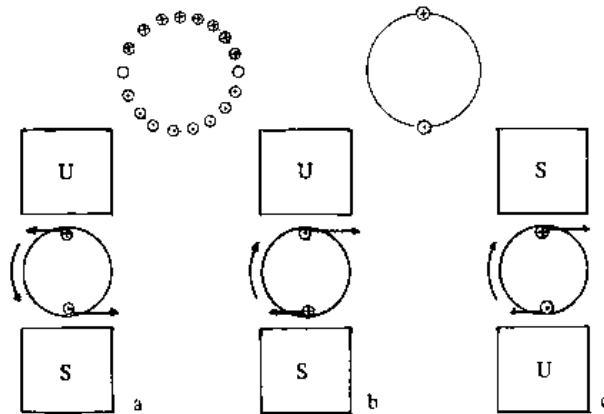
Sehingga :

Untuk membalik arah putaran motor DC dapat dilakukan dengan 2 cara :

- membalik arah arus jangkar*, arah arus penguat tetap.
- membalik arah arus penguat*, arah arus jangkar tetap.

Apabila arah arus jangkar dan arah arus penguat keduanya dibalik arah putaran motor tidak berubah.

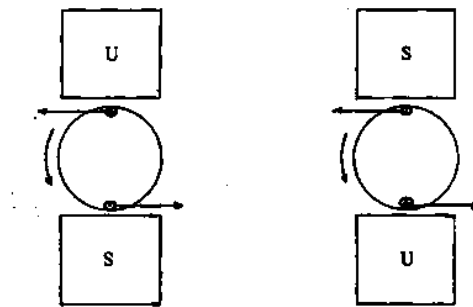
Pengertian-pengertian di atas juga sesuai dengan kaidah tangan kiri Perhatikan gambar 4-16. Untuk memudahkan penjelasan sisi-sisi kumparan bagian atas dan bagian bawah masing-masing hanya digambarkan sebuah kawat.



GAMBAR 4-16. Prinsip membalik arah putaran motor DC.

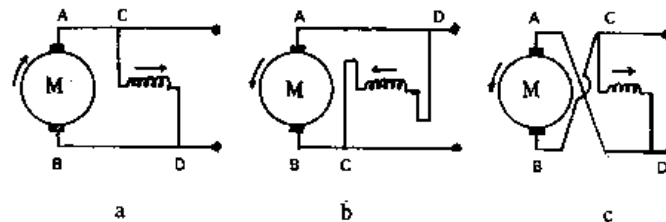
- GB. 4-16a. Mula-mula arah putaran motor berlawanan dengan arah putaran jarum jam.
- GB. 4-16b. Kemudian arah arus jangkar dirubah, kutub-kutub tetap. Sesuai dengan kaidah tangan kiri sekarang arah putaran berubah.
- GB. 4-16c. Sesudah itu kutub-kutub dirubah, arah arus jangkar tetap. Sesuai dengan kaidah tangan kiri maka arah putaran sekarang juga berubah.

Jadi mula-mula arah putaran ke kiri; Untuk merubah arah putaran menjadi ke kanan dapat dilakukan dengan 2 cara yaitu dengan membalik arah arus jangkar atau merubah kutub-kutub magnet. Apabila arus jangkar dan kutub-kutub magnet keduanya dirubah arah putaran akan tetap. Lihat gambar 4-17.



GAMBAR 4-17. Arah putaran tetap jika arah arus jangkar dirubah dan kutub-kutub juga dirubah.

Perhatikan rangkaian listrik membalik putaran motor shunt pada gambar 4-18.



Gambar 4-18. a. Ujung shunt ditukar  
b. arus jangkar dirubah arahnya

## 7. KARAKTERISTIK MOTOR DC

Untuk menentukan karakteristik-karakteristik suatu motor DC perlu diingat 2 rumus pokok yaitu :

$$1. \text{ Persamaan kecepatan } n = \frac{U - I_a R_a}{C\phi}$$

$$2. \text{ Persamaan torsi } T = k I_a \phi$$

Dengan berdasarkan persamaan-persamaan di atas akan membantu dalam menduga sifat-sifat dari motor DC dengan hubungan yang berbeda (seri, shunt, kompon).

Kita akan membicarakan 3 macam karakteristik pada masing-masing jenis motor. Karakteristik-karakteristik tersebut akan banyak memberikan informasi-informasi dalam pemilihan suatu motor DC untuk penggunaan yang tepat dan sesuai.

Karakteristik-karakteristik itu ialah :

1. Putaran sebagai fungsi arus jangkar

(karakteristik putaran)

$$n = f(I_a), U \text{ konstan}$$

2. Torsi sebagai fungsi arus jangkar (karakteristik torsi)

$$T = f(I_a), U \text{ konstan}$$

3. Putaran sebagai fungsi torsi (karakteristik mekanis)

$$n = f(T), U \text{ konstan}$$

**7.1. KARAKTERISTIK PUTARAN**  $n = f(I_a), U \text{ konstan}$

*Motor shunt* mempunyai karakteristik putaran yang kaku artinya bila ada perubahan beban yang besar hanya terjadi penurunan putaran yang kecil. Penurunan putaran tersebut sekitar 2 - 8%.

Dari persamaan, kecepatan  $n = \frac{U - I_a R_a}{C\phi}$  dapat dilihat bahwa perubahan harga  $I_a$

akan memberikan pengaruh yang kecil terhadap  $n$ . Hal ini disebabkan oleh nilai  $R_a$  (tahanan jangkar) biasanya kecil dan untuk motor shunt pada tegangan jepit ( $U$ ) yang konstan maka flux magnet ( $\phi$ ) juga konstan.

Pada *motor seri*, arus jangkar ( $I_a$ ) sama dengan arus penguat magnet ( $I_m$ ) sehingga :

$$\phi = f(I_a) = f(I_m)$$

Oleh karena itu dari persamaan kecepatan  $n = \frac{U - I_a R_a}{C\phi}$

$$n = \frac{U - I_a R_a}{K(I_a)}$$

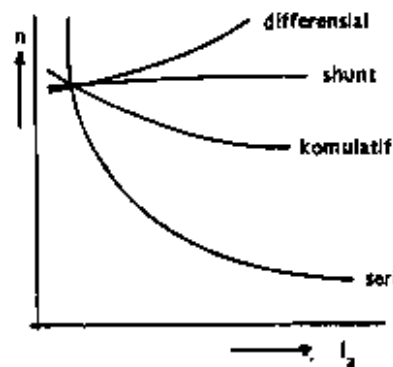
$$n = \frac{U}{K I_a} - \frac{R_a}{K}$$

Bentuk karakteristik adalah hiperbolic.

*Motor kompon* mempunyai sifat diantara motor seri dan shunt. Menurut arah lilitan penguat magnet, motor kompon ada 2 jenis :

1. *Kumulatif* jika medan shunt dan seri saling memperkuat  $\phi = \phi_{sh} + \phi_{se}$
2. *Differensial* jika medan seri memperlemah medan shunt  $\phi = \phi_{sh} - \phi_{se}$

Perhatikan gambar 4-19.



GAMBAR 4-19. Karakteristik putaran.

**7.2. KARAKTERISTIK TORSI**  $T = f(I_a), U \text{ konstan.}$

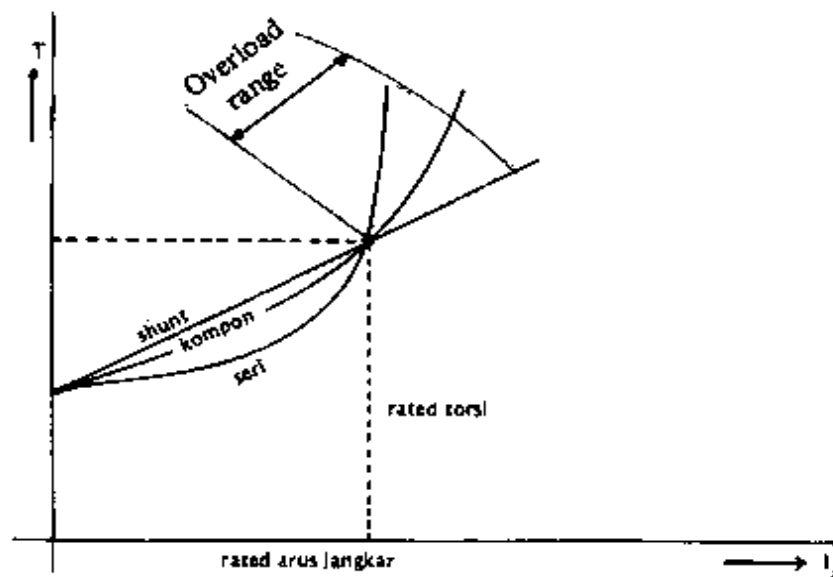
Dari persamaan torsi  $T = k I_a \phi$

Pada *motor shunt*, jika tegangan jepit ( $U$ ) konstan, maka arus penguat magnet ( $I_m$ ) juga konstan sehingga  $\phi$  juga konstan sehingga untuk tegangan jepit yang konstan torsi motor shunt hanya tergantung pada arus jangkar ( $I_a$ ).  $T =$  konstante.  $I_a$ .

Grafiknya garis lurus (fungsi Linear). Akan tetapi pada beban berat, meskipun arus penguat ( $I_m$ ) tetap  $\phi$  (flux magnet) berubah akibat adanya reaksi jangkar.

Pada *motor seri*,  $I_m = I_a$  sehingga  $\phi$  sebanding dengan  $I_a$ . Kalau bebannya ringan, di mana magnet tidak berada pada daerah jenuh flux magnet ( $\phi$ ) akan sebanding dengan arus jangkar ( $I_a$ ). Pada kondisi ini grafik cenderung akan lurus. Pada beban berat (magnet berada pada daerah jenuh)  $\phi$  tidak sebanding dengan  $I_a$ . Penambahan harga  $I_a$  tidak diikuti kenaikan  $\phi$  sehingga torsi akan turun.

Untuk *motor kompon*,  $\phi_{se}$  dan  $\phi_{sh}$  saling berpengaruh. Karakteristik torsi merupakan kombinasi dari motor seri dan motor shunt. Kalau beban motor besar, arus pada belitan seri besar sehingga  $\phi$  bertambah, sedangkan arus pada belitan shunt tetap. Oleh karena itu resultante flux magnet ( $\phi$ ) nya akan memberikan torsi agak cekung di atas (antara motor seri dan motor shunt) pada beban ringan dan pada daerah jenuh grafiknya lurus (antara grafik motor seri dan motor shunt). Perhatikan gambar karakteristik-karakteristik torsi pada gambar 4-20.



GAMBAR 4-20. Karakteristik torsi.

Dari gambar 4-20 terlihat bahwa pada beban biasa dengan pertambahan  $I_a$  (yang sama) pada motor shunt pertambahan torsi lebih, besar dibanding motor seri. Motor kompon diantara motor seri dan motor shunt. Sebaliknya pada overload range dengan bertambahnya beban, pertambahan torsi pada motor seri lebih besar dibanding motor shunt, sedangkan motor kompon terletak diantara keduanya.



### 3. KARAKTERISTIK MEKANIS

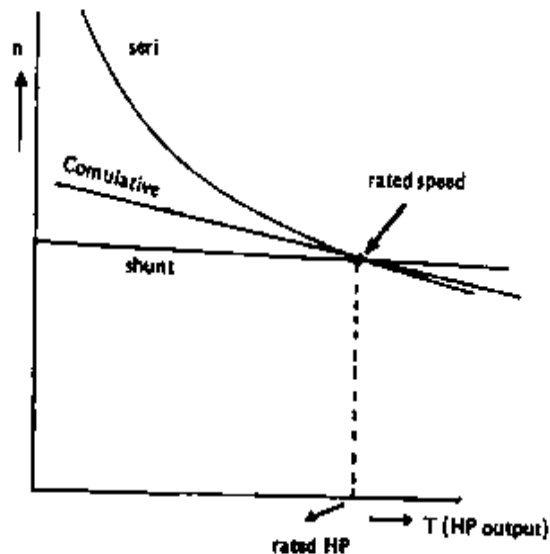
$n = f(T)$ , U konstan.

Dari  $n = \frac{U - I_a R_a}{C\phi}$ , dapat dilihat bahwa pada motor *shunt* di mana kalau

Torsi ( $T = k I_a \phi$ ) bertambah,  $I_a$  bertambah, sedang  $\phi$  tetap. Didapatkan, dengan bertambahnya torsi (T) pada motor shunt, kecepatan (n) menurun. Pada motor seri, dengan bertambahnya torsi (T), akan menyebabkan bertambahnya  $I_a$  dan flux magnet ( $\phi$ ), karena pada motor seri flux magnet merupakan fungsi arus jangkar ( $I_a$ ). Dari rangkaian listrik motor seri terlihat bahwa untuk harga arus jangkar nol,  $I_m =$

0, sehingga dari persamaan kecepatan  $n = \frac{U - I_a R_a}{C\phi}$  diperoleh harga n menuju tak

terhingga (lihat gambar 4-21). Sedangkan untuk harga arus jangkar ( $I_a$ ) yang cukup besar, harga n akan mendekati nol. Untuk motor kompon karakteristiknya terletak diantara karakteristik motor seri dan motor shunt. Perhatikan gambar IV-3.



GAMBAR 4-21. Karakteristik mekanis motor DC.

Dari karakteristik-karakteristik gambar 4-21 dapat diambil kesimpulan :

1. Kecepatan motor shunt cenderung *konstan* pada pembebanan yang berubah-ubah.
2. Motor seri cenderung untuk *berputar sangat cepat* (lari) pada keadaan *beban ringan*.

3. Motor kompon mempunyai karakteristik mekanis yang *terletak diantara motor seri dan shunt*. Kecepatannya cenderung *agak konstan* pada pembebanan yang berubah-ubah.

## 8. RENDAMEN (n)

Untuk mengubah tenaga listrik menjadi tenaga mekanik, pada motor DC mengalami bermacam-macam *kerugian* (kehilangan).

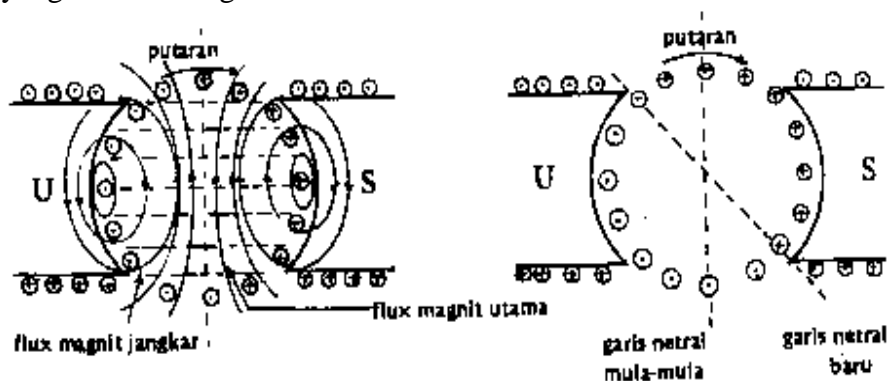
Dengan adanya kerugian-kerugian pada motor DC tersebut, tenaga listrik (input) dari motor tidak seluruhnya berubah menjadi tenaga mekanik.

Kerugian-kerugian itu disebabkan diantaranya oleh adanya :

1. reaksi jangkar.
2. inti besi.
3. gesekan.
4. arus yang mengalir pada belitan/rheostat.

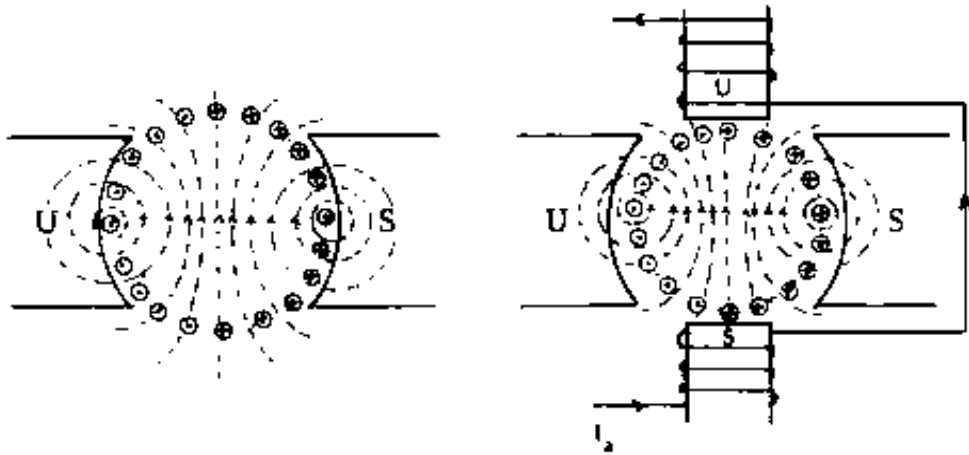
### 8.1. REAKSI JANGKAR

Seperti halnya pada generator DC, garis netral pada motor DC juga akan bergeser bilamana motor dibebani. Dengan adanya reaksi jangkar tersebut, agar pada saat komutasi tidak timbul bunga api, sikat-sikat harus digeser pada garis netral yang baru. Lihat gambar 4-22.



GAMBAR 4-22. Reaksi Jangkar.

Cara ini memberikan hasil yang kurang begitu memuaskan terutama pada motor yang sering mengalami pembebanan yang berubah-ubah. Untuk itu mesin DC biasa dilengkapi dengan interpoles (komutating poles = *kutub bantu*). Lilitan pada kutub bantu dipasang seri terhadap lilitan jangkar. Lihat gambar 4-23.



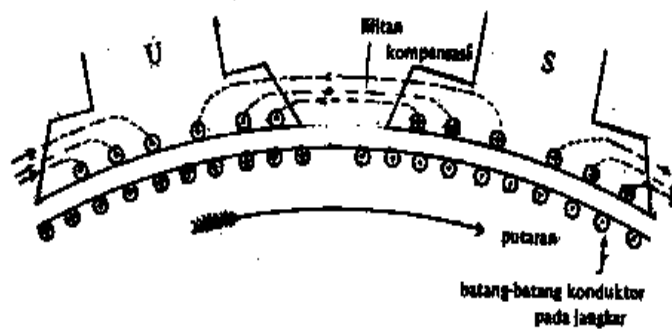
GAMBAR 4-23. Mengatasi reaksi jangkar dengan memasang kutub bantu.

Pada mesin-mesin kecil sering ditemui jumlah kutub bantu tidak sama dengan jumlah kutub utama, tetapi hanyalah setengahnya saja. Misal mesin dengan kutub utama dua buah, kutub bantunya hanya satu.

Selain cara-cara tersebut di atas untuk mengatasi reaksi jangkar pada mesin-mesin yang besar dilengkapi dengan *lilitan kompensasi*.

Lilitan kompensasi itu dipasang pada alur-alur yang dibuat pada sepatu kutub dari kutub utama. Lilitan ini, seperti juga halnya dengan lilitan kutub bantu, dihubungkan seri dengan lilitan jangkar. Arah arusnya *berlawanan* dengan arah *arus kawat jangkar* yang berada dibawahnya.

Perhatikan gambar 4-24.



GAMBAR 4-24. Lilitan kompensasi untuk mengatasi reaksi jangkar.

## 8.2. KERUGIAN - KERUGIAN

Sebagian tenaga listrik (input) motor DC hilang atau berubah menjadi panas. Dalam hal ini sebetulnya timbulnya panas tidak kita kehendaki, karena panas yang lebih, bisa merusak isolasi. Hal tersebut terjadi pada setiap mesin arus searah, baik itu generator DC maupun motor DC dan mesin AC.

Kerugian-kerugian itu antara lain disebabkan oleh reaksi jangkar, arus liar, gesekan, arus yang mengalir pada belitan, rheostat dan sebagainya.

Generator DC & motor DC mempunyai type kerugian-kerugian yang sama. Kerugian-kerugian itu ialah :

Type-type kerugian	Keterangan
a) Kerugian pada belitan shunt	Kerugian $I^2R$ pada belitan penguat shunt. Kerugian $I^2R$ pada tahanan geser ( $R_{st}$ , R pengatur).
b) Kerugian pada rheostat	
c) Kerugian pada exciter	Kerugian mekanis akibat gesekan sikat-sikat Kerugian pada kipas pendingin  Kerugian $I^2R$ pada lilitan jangkar Kerugian $I^2R$ pada lilitan penguat seri  Kerugian listrik pada sikat-sikat dan kontak-kontak. Kerugian-kerugian akibat arus liar pada tembaga, kerugian inti, reaksi jangkar, kerugian short circuit pada saat komutasi.
d) Kerugian oleh gesekan dan oleh angin	
e) Kerugian karena gesekan sikat-sikat.	
f) Kerugian pada ventilasi	
g) Kerugian inti	
h) Kerugian pada lilitan jangkar	
i) Kerugian pada lilitan Seri	
j) Kerugian pada kontak sikat	
k) Kerugian Stray load	

Untuk lebih jelasnya akan kita berikan tabel kerugian-kerugian pada mesin DC, dan bagaimana cara menentukan besarnya, kerugian-kerugian tersebut.

TABEL KERUGIAN - KERUGIAN PADA MESIN DC

Kerugian – kerugian	Cara menentukan
PERPUTARAN (STRAY POWER) Gesekan : bantalan sikot kipas pendingin (windage) Intijangkar : histerisis arus liar	Biasanya ditentukan melalui test.

<b>TEMBAGA</b> lilitan jangkar lilitan kutub bantu lilitan seri lilitan kompensasi kontak sikat lilitan shunt	$I_a^2 R_a$ $I_a^2 R_b$ $I_a^2 R_{se}$ $I_a^2 R_c$ $(1 \text{ s/d } 6) \times I_a$ $U I_{sh}$
<b>STRAY LOAD LOSSES</b>	1 percent dari output untuk mesin yang lebih besar dari 150 KW (200 HP).

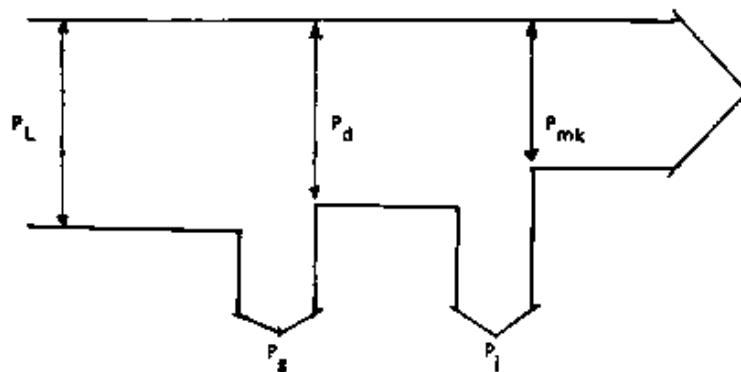
$$\text{Effisiensi} = \frac{\text{output}}{\text{input}} \times 100\%$$

$$\text{Pada motor } \eta = \frac{\text{HP output } 746}{\text{watts input}} \times 100\%$$

$$\eta = \left[ \frac{\text{HP output } 746}{(\text{HP output} \times 746) + \text{watts losses}} \right] \times 100\%$$

$$\eta = \left( \frac{\text{watts losses}}{(\text{HP output} \times 746) + \text{watts losses}} \right) \times 100\% \dots\dots\dots (4-17)$$

Proses pengubahan daya listrik menjadi daya mekanik pada motor DC digambarkan, pada diagram di bawah ini.



GAMBAR 4-25. Diagram proses pengubahan  $P_L \rightarrow P_{mk}$

Untuk mengubah daya listrik ( $P_L$ ) menjadi daya mekanik ( $P_{mk}$ ) motor DC mengalami kerugian-kerugian yaitu :

- $P_g$  (rugi gesekan)
- $P_j$  ( $P_{\text{Joule}}$ ) ialah kerugian-kerugian yang disebabkan oleh kerugian tembaga & kerugian besi

- $PJ = P_{tb} + P_b$
- P pada exciter
  - P pada sikat-sikat dan sebagainya.

## 9. CONTOH-CONTOH SOAL

1. Sebuah kumparan dengan panjang 8 inch terdiri dari 20 lilitan terletak di antara kutub U dan S (lihat gambar ). Kepadatan garis-garis gaya magnet 3000 gauss.  
Apabila kumparan dialiri arus 30A, hitunglah gaya yang bekerja pada tiap-tiap sisi kumparan (dalam satuan Newton).

JAWAB :

Untuk kumparan dengan satu lilitan, gaya yang bekerja pada masing-masing sisi kumparan adalah  $F = Bl I$  Newton

di mana :

$B$  = kepadatan garis-garis gaya dalam satuan Weber.  
(1 W =  $10^4$  gauss).

$l$  = panjang kumparan dalam satuan meter.  
(1 inch =  $2,54 \cdot 10^{-2}$  meter).

$I$  = arus yang mengalir dalam satuan Ampere.

$F = 0,3 \times 0,2032 \times 30 = 1,829$  Newton.

Kumparan terdiri dari 20 lilitan, maka gaya yang bekerja pada masing-masing sisi kumparan adalah :

$F_{total} = 20 \times 1,829 = 36,58$  Newton.

2. Untuk soal no. 1, hitunglah  $F_{total}$  dalam satuan dyne.

JAWAB:

$F = B l I 10^{-1}$  dyne

di mana :

$B = 3000$  gauss (lines per  $cm^2$ )

$l = 8$  inch =  $8 \times 2,54$  cm = 20,32 cm.

$I = 30$  A.

$F_{total} = 20 \times 3000 \times 20,32 \times 30 \times 10^{-1}$  dyne.

= 3.658.000 dyne.

3. Sebuah motor DC dengan tahanan jangkar 0,1 ohm, jika dihubungkan dengan sumber 220 Volt arus jangkarnya 10A, putarannya 1200 rpm. Hitunglah putarannya jika dengan sumber yang sama arus jangkarnya meningkat menjadi 50A, flux magnetnya sebesar 10% dibanding keadaan pertama.

JAWAB :

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{C \frac{V - (I_a)_2 R_a}{\phi_2}}{C \frac{V - (I_a)_1 R_a}{\phi_1}}$$

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{C \frac{110 - 20.0,1}{\phi_2}}{C \frac{110 - 50.0,1}{\phi_1}}$$

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{105}{\phi_2} \times \frac{\phi_1}{108}$$

$$n_1 = 1200 \text{ rpm} \quad \rightarrow n_2 = \left( \frac{105}{108} \times \frac{\phi_1}{\phi_2} \right) 1200$$

$$\phi_2 = 1,1 \phi_1 \quad \rightarrow n_2 = \left( \frac{105}{108} \times \frac{\phi_1}{1,1\phi_1} \right) 1200$$

$$n_2 = 1061 \text{ rpm}$$

4. Sebuah motor shunt 115 volt mempunyai tahanan jangkar 0,22 ohm. Jumlah kerugian tegangan pada sikat sebesar 2 volt.
- Berapakah arus jangkar bila GGL lawan 108 volt.
  - Berapakah arus jangkar bila GGL lawan 106 volt.

JAWAB :

$$\begin{aligned} \text{a) } I_a &= \frac{U - E}{R_a} \\ I_a &= \frac{(115 - 2) - 108}{0,22} = 22,7 \text{ amp.} \\ \text{b) } I_a &= \frac{(115 - 2) - 106}{0,22} = 31,8 \text{ amp.} \end{aligned}$$

5. Sebuah motor DC kompon bekerja pada kecepatan 1520 rpm dengan tegangan pada jangkar 230 volt. Jika flux per kutub 620.000 maxwells dan tahanan jangkar 0,43 ohm, konstante mesin (C)  $2,2 \times 10^{-7}$ .

Hitunglah :

- a) GGL lawan ( $E$ )  
b) arus jangkar.  
(penurunan tegangan pada sikat-sikat 2 volt).

JAWAB:

$$\begin{aligned} \text{a) } E &= C n \phi \text{ volt.} \\ &= 2,2 \times 10^{-7} \times 620.000 \times 1520 = 207,5 \text{ volt} \\ \text{b) } I_a &= \frac{(230 - 2) - 207,5}{0,43} = 47,7 \text{ amp} \end{aligned}$$

6. Jika beban motor (soal no. 5) dinaikkan sehingga arus jangkar menjadi 64 A, flux Magnit meningkat sebesar 6%.

Hitunglah kecepatan motor.

JAWAB:

$$\begin{aligned} \phi &= 620.000 \times 1,06 = 657.200 \text{ maxwells.} \\ n &= \frac{U_A - I_a R_a}{k\phi} \\ &= \frac{(230 - 2) - (64 \times 0,43)}{(2,22 \times 10^{-7}) \times 657.000} \\ &= 1390 \text{ r.p.m} \end{aligned}$$

7. Jangkar sebuah motor DC tegangan 230 volt dengan tahanan 0,312 ohm dan mengambil arus 48 A ketika dioperasikan pada beban normal.

- a) Hitunglah GGL lawan ( $E_a$ ) dan daya yang timbul pada jangkar.  
b) Eka tahanan jangkar 0,417 ohm, keadaan yang lain sama. Berapa GGL lawan ( $E_a$ ) dan daya yang timbul pada jangkar. Penurunan tegangan pada sikat-sikat sebesar 2 volt untuk soal a dan b.

JAWAB :

$$\begin{aligned} \text{a) } E_a &= U - I_a R_a \\ &= (230 - 2) - (48 \times 0,312) = 213 \text{ volt.} \\ \text{Daya yang dibangkitkan pada jangkar} &= E_a I_a \\ &= 213 \times 48 \\ &= 10.224 \text{ watt.} \end{aligned}$$

$$\text{b) } E_a = U - I_a R_a$$



$$\begin{aligned}
&= (230 - 2) - (48 \times 0,417) = 208 \text{ volt} \\
\text{Daya yang dibangkitkan pada jangkar} &= E_a I_a \\
&= 208 \times 48 \\
&= 9984 \text{ watt}
\end{aligned}$$

8. Jangkar sebuah motor shunt teg. 220 volt mempunyai tahanan 0,18 ohm. Apabila arus jangkar tidak boleh melebihi 76 Ampere.

Hitunglah :

- Besarnya tahanan yang harus dipasang seri dengan jangkar.
- Besarnya tahanan yang harus dipasang seri dengan jangkar jika timbul GGL lawan ( $E_a$ ) sebesar 168 volt.
- Arus jangkar pada saat start jika tidak dipasang tahanan awal.

JAWAB:

$$\begin{aligned}
\text{a) } I_a &= \frac{U - E}{R_a + R} \\
R &= \frac{U - E}{I_a} - R_a \\
R &= \frac{(230 - 2) - 0}{76} - 0,18 = 2,82 \text{ ohm} \\
\text{b) } R &= \frac{(230 - 2) - 168}{76} - 0,18 = 0,61 \text{ ohm} \\
\text{c) } I_a &= \frac{(230 - 2)}{0,18} = 1265 \text{ A (arus yang sangat berbahaya)}
\end{aligned}$$

9. Hitunglah torsi dalam pound-feet yang dibangkitkan oleh motor DC yang mempunyai ketentuan-ketentuan jumlah kutub 4 jumlah konduktor jangkar 828, flux per kutub  $1,93 \times 10^5$  maxwells, arus jangkar total 40A, jumlah cabang paralel 2. Berapakah HP motor kalau motor dioperasikan pada kecepatan 1,750 rpm.

JAWAB:

$$\begin{aligned}
\text{a) } T &= \left( \frac{0,1173}{10^8} \right) \left( \frac{P \times Z}{a} \right) \times \phi \times I_a \text{ lb.ft} \\
&= \frac{0,1173}{10^8} \frac{4 \times 828}{2} \times 1,93 \times 10^5 \times 40 \\
&= 15 \text{ lb.ft} \\
\text{b) } \text{HP} &= \frac{2n \times \text{rpm} \times T}{33.000} = \frac{2\pi \times 1750 \times 15}{33.000} = 5
\end{aligned}$$

10. Sebuah motor DC shunt 5 HP 115 volt mengambil arus 36 A pada saat dioperasikan dengan beban penuh, kecepatan 1500 rpm. Tahanan lilitan penguat 52 ohm. Apabila putaran dinaikkan menjadi 1700 rpm harus ditambahkan tahanan seri 28 ohm pada lilitan penguatnya. Pada keadaan ini motor mengambil arus sebesar 42 A.

Hitunglah :

- 1 Kerugian daya dan persentase kerugian daya terhadap daya input dari lilitan penguat pada kecepatan 1500 rpm.

h). Kerugian daya dan persentase kerugian daya terhadap daya input dari rheostat ( $R = 28 \Omega$ ) pada kecepatan 1700 rpm.

JAWAB:

$$a). I_{sh} = \frac{115}{52} = 2,21 \text{ A}$$

$$P_{field} = 115 \times 2,21 = 254 \text{ watt}$$

$$P_{in} = 115 \times 36 = 4.140 \text{ watt.}$$

$$\begin{aligned} \text{Persentase kerugian daya pada lilitan penguat} &= \frac{254}{4140} \times 100\% \\ &= 6.14\% \end{aligned}$$

$$b). I_{sh} = \frac{115}{52 + 28} = 1,44 \text{ A}$$

$$P_{field} = 115 \times 1,44 = 166 \text{ watt}$$

$$P_{rheo} = (1,44)^2 \times 28 = 58 \text{ watt}$$

$$P_{in} = 115 \times 42 = 4830 \text{ watt}$$

$$\begin{aligned} \text{Persentase kerugian daya pada rheostat} &= \frac{58}{4830} \times 100\% \\ &= 1,2\% \end{aligned}$$

## 10. SOAL - SOAL LATIHAN

1. Sebuah motor shunt mempunyai 4 kutub menimbulkan torsi sebesar 20 lb-ft, flux per kutub 700.000 Maxwells. Jika kumparan jangkar mempunyai 264 konduktor, jumlah cabang jangkar = 2. Hitunglah arus jangkar 46 A.
2. Sebuah motor seri membangkitkan torsi sebesar 62 lb-ft apabila arusnya 46 A. Flux magnet bertambah secara linear terhadap perubahan arus. Hitunglah torsi motor jika motor mengambil arus sebesar 56 A, 34,5 lb-ft.
3. Jangkar sebuah motor shunt mempunyai tahanan 0,3 ohm. Pada keadaan berbeban, arus jangkarnya sebesar 50 A, putarannya 1500 rpm. Berapakah putaran motor apabila beban dikurangi sehingga arus jangkar turun menjadi 5 A. (Jumlah flux magnet pada keadaan pertama dan kedua tidak berubah, sedangkan kerugian tegangan pada sikat-sikat adalah 2 volt dan 1 volt) 1600 rpm.
4. Sebuah motor kompon panjang 220 volt, tahanan jangkarnya 0,27 ohm, tahanan lilitan penguat seri 0,05 ohm. Pada keadaan berbeban arus jangkar sebesar 75 A putarannya 1400 rpm. Berapakah putaran motor dalam keadaan tanpa beban jika arus jangkar turun menjadi 5 A dan flux magnet turun sebesar 10%, penurunan tegangan pada sikat-sikat 2 volt dalam keadaan berbeban untuk keadaan tanpa beban sebesar 1 volt. 1745 rpm.
5. Sebuah motor dengan penguat terpisah mengeluarkan daya sebesar 20 HP. Motor tersebut memakai arus 72 A pada tegangan jepit 218 volt. Tahanan jangkar 0,12 ohm.

- a) Berapa rendament motor 88,8%
- b) Berapa GGL lawan motor 208,88 volt.
- c) Berapa kerugian-kerugian akibat putaran (kerugian gesekan dan inti jangkar), jika stray load losses diabaikan 1154,88 W
- d)  $\eta$  listrik 92,725%