

BAB II LANDASAN TEORI

2.1. Generator

Generator listrik adalah sebuah alat yang memproduksi energi listrik dari sumber energi mekanik, biasanya dengan menggunakan induksi elektromagnetik.

Proses ini dikenal sebagai pembangkitan energi listrik. Walaupun generator dan motor mempunyai banyak kesamaan, tetapi motor adalah alat yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Sumber energi mekanik bisa berupa resiprokot maupun turbin mesin uap, air yang jatuh melalui sebuah turbin maupun kincir air, mesin pembakaran dalam, turbin angin, udara yang dimampatkan, atau apa pun sumber energi mekanik yang lain. Sebelum hubungan antara magnet dan listrik ditemukan, generator menggunakan prinsip elektrostatik yaitu cabang ilmu fisika yang berkaitan dengan gaya yang dikeluarkan oleh medan listrik statik (tidak berubah / bergerak) terhadap objek bermuatan yang lain.



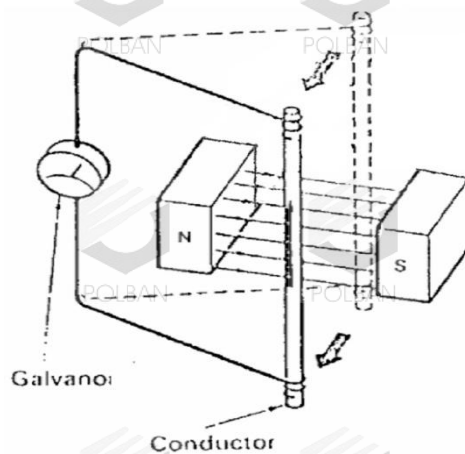
Gambar 2.1. generator

2.2. Prinsip Pembangkitan Tenaga Listrik

2.2.1. Induksi Elektro Magnet

Garis gaya magnet dipotong oleh penghantar listrik yang bergerak diantara medan magnet, akan timbul gaya gerak listrik (tegangan induksi) pada penghantar dan arus akan mengalir apabila penghantar tersebut merupakan bagian dari sirkuit lengkap. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1. mengenai penghantar yang dihubungkan dengan galvano meter, di gerakan keluar masuk secara terus-menerus kedalam celah satu buah magnet permanen yang berbentuk U.

U.



Gambar 2.2. Pengukuran arus yang kecil dengan galvano meter

Seperti ditunjukkan pada gambar 2.1, jarum galvano meter (ammeter yang dapat mengukur arus yang sangat kecil), akan bergerak karena gaya gerak listrik yang dihasilkan pada saat penghantar digerakkan maju-mundur diantara kutub utara dan kutub selatan magnet. Dari aksi ini, akan didapat beberapa kesimpulan bahwa:

- 1) Jarum galvano meter akan bergerak jika penghantar atau magnet digerakkan.
- 2) Arah gerakan jarum akan bervariasi mengikuti arah gerakan penghantar atau magnet.
- 3) Besar gerakan jarum akan semakin besar sebanding dengan kecepatan gerakan.
- 4) Jarum tidak akan bergerak jika gerakan dihentikan.

Bila dengan beberapa cara, penghantar dilewatkan melalui garis gaya magnet, maka dalam penghantar akan terbangkit gaya gerak listrik, fenomena ini

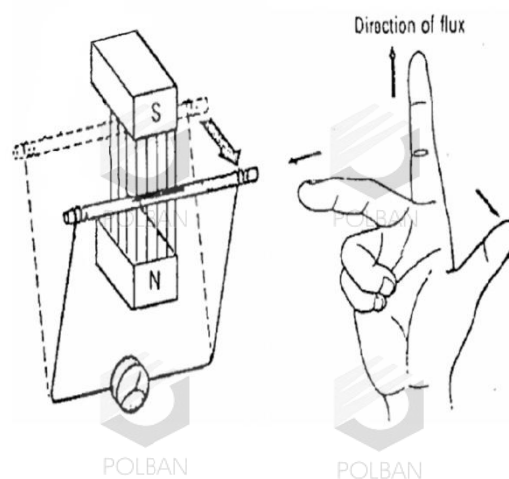
disebut dengan “induksi elektromagnet”. Generator menghasilkan gaya gerak listrik dengan cara induksi elektro magnet dan mengubahnya menjadi tenaga listrik (tegangan arus).

2.2.2. Arah Gaya Gerak Listrik

Arah gaya gerak listrik yang dibangkitkan dalam penghantar diantara medan magnet bervariasi mengikuti perubahan arah garis gaya magnet dan gerakan penghantar. Seperti yang ditunjukkan gambar 2.2. Apabila penghantar digerakkan (dengan arah seperti yang ditunjukkan oleh tanda panah besar pada gambar 2.2) diantara kutup magnet utara dan selatan, maka gaya gerak listrik akan mengalir dari kanan ke kiri (arah garis gaya magnet dari kutup utara ke kutup selatan).

Arah garis gaya magnet dapat dipahami dengan menggunakan Hukum Tangan Kanan Fleming (Fleming’s Right-Hand Rule).

Hukum Tangan Kanan Fleming dengan ibu jari, telunjuk dan jari tengah tangan kanan dibuka dengan sudut yang tepat satu sama lain, maka telunjuk akan menunjukkan garis gaya magnet, ibu jari menunjukkan arah gerakan penghantar dan jari tengah menunjukkan arah gaya gerak listrik.

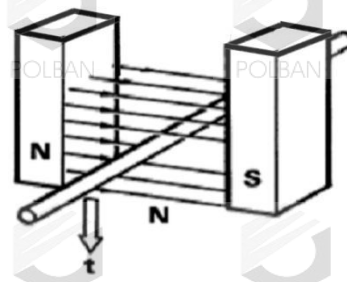


Gambar 2.3. Hukum tangan kanan fleming

2.2.3. Besarnya Gaya Magnet

Besarnya gaya gerak listrik yang dibangkitkan pada saat penghantar memotong (melewati) garis gaya magnet di antara medan magnet sebanding dengan banyaknya garis gaya magnet yang dipotong pada suatu satuan waktu. Untuk lebih jelasnya mengenai garis gaya magnet, dapat melihat gambar 2.3. Sebagai contoh, bila banyaknya garis-garis N dipotong dalam waktu t detik dan gaya gerak listrik e volt, ini dapat dinyatakan dengan rumus berikut :

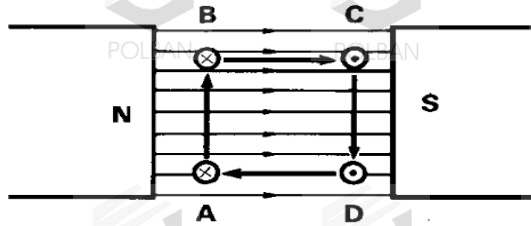
$$e = - \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots (2.1)$$



Gambar 2.4. Garis gaya magnet

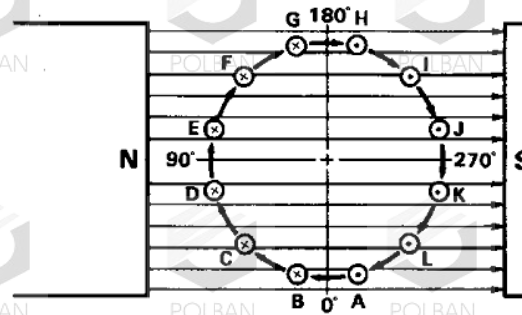
Dalam medan magnet dengan densitas yang seragam, besarnya gaya gerak listrik yang dibangkitkan tergantung pada arah gerakan penghantar meskipun kecepatan gerakan penghantar konstan. Seperti terlihat pada gambar 2.4. sebuah penghantar digerakkan dari titik A ke B ke C ke D dan kembali ke A.

Bagaimanapun, ia memotong garis gaya magnet hanya pada saat bergerak dari A ke B dan dari C ke D. Dengan kata lain, meskipun penghantar bergerak dengan kecepatan yang sama di antara masing-masing titik, gaya gerak listrik akan bangkit hanya pada saat penghantar bergerak antara A dan B dan antara C dan D.



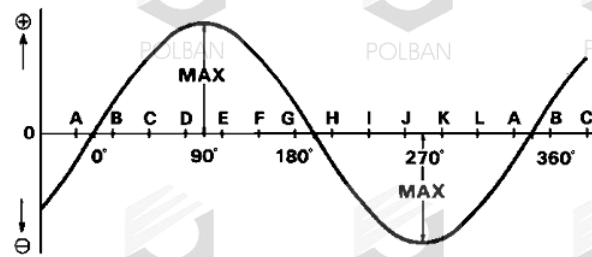
Gambar 2.5. Gerakan penghantar pada garis gaya magnet

Bila penghantar (conductor) digerakkan dengan jalur melingkar didalam medan magnet seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6. maka besarnya garis gaya magnet akan berubah secara konstan. Pada gambar ini, penghantar digerakkan dalam lingkaran dengan kecepatan tetap dari titik A hingga ke titik L diantara kutub magnet utara dan selatan. Dalam hal ini jumlah garis gaya magnet terbesar dipotong antara titik D dengan E dan antara titik J dengan K, tetapi tidak ada garis yang dipotong antara A dengan B atau G dengan H.



Gambar 2.6. Gerakan melingkar garis gaya listrik

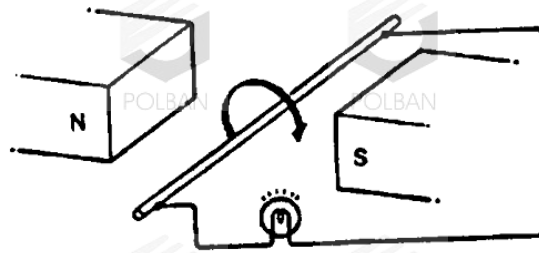
Jadi, bila gaya gerak listrik yang dibangkitkan pada saat penghantar digerakkan dalam lingkaran dinyatakan dalam sebuah grafik, dapat dilihat bahwa keberadaan gaya ini secara tetap mengalami perubahan (bertambah dan berkurang). Selanjutnya, arah arus yang dibangkitkan oleh gaya gerak listrik ini akan berubah setiap setengah putaran penghantar, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.7.



Gambar 2.7. Grafik gaya gerak listrik

2.2.4. Prinsip Generator

Meskipun gaya gerak listrik dihasilkan bila sebuah penghantar diputar dalam medan magnet, sebenarnya besarnya gaya gerak listrik (ggl) yang dihasilkan sangat kecil. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.8 mengenai prinsip generator

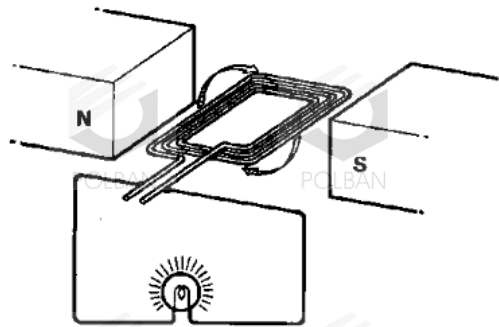


Gambar 2.8. Prinsip generator

Apabila dua buah penghantar disambung ujung ke ujung, maka akan timbul gaya gerak listrik pada keduanya yang tentu saja ganda. Jadi, semakin banyak penghantar yang berputar dalam medan magnet semakin besar pada gaya gerak listrik yang dihasilkan.

Bila penghantar terbentuk dalam satu kumparan jumlah total gaya gerak listrik yang dibangkitkan akan menjadi lebih besar, demikian juga besarnya tenaga listrik (arus dan tegangan) yang dihasilkan. Generator membangkitkan tenaga listrik dengan jalan memutar sebuah kumparan di dalam medan magnet. Ada dua macam listrik, arus searah dan arus bolak-balik dan tergantung pada cara menghasilkan listrik generator juga dibedakan dalam generator jenis

arus searah dan arus bolak-balik. Untuk lebih jelasnya mengenai kumparan yang berputar didalam medan magnet, dapat dilihat pada gambar 2.9.



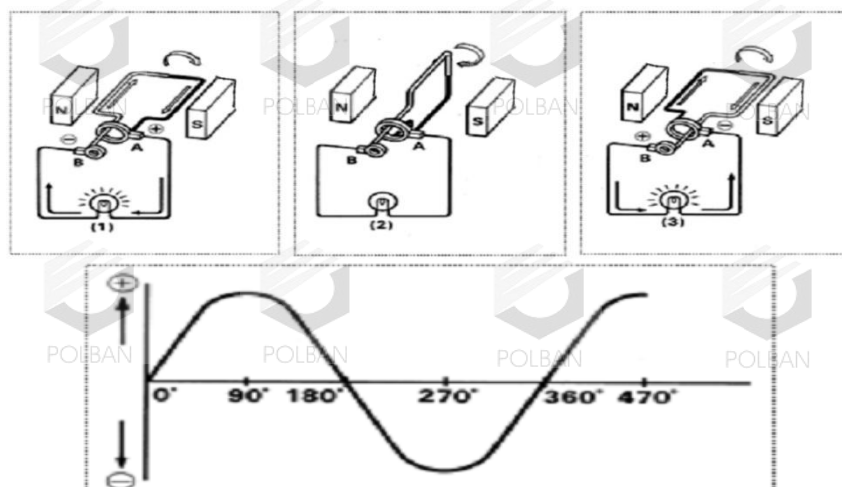
Gambar 2.9. Perputaran kumparan pada medan magnet

2.3 Generator Arus Bolak Balik

Bila arus listrik yang dibangkitkan oleh kumparan diberikan melalui cincin gesek dan sikat (jadi kumparan dapat berputar), besarnya arus yang mengalir ke lampu akan berubah, pada saat yang sama, demikian juga arah alirannya. Seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.9.

Pada saat kumparan berputar, arus yang dihasilkan pada setengah putaran pertama akan dikeluarkan dari brush pada sisi A, mengalir melalui lampu dan kembali ke brush pada sisi B.

Pada setengah putaran selanjutnya, arus akan mengalir dari B dan kembali ke A.



Gambar 2.10. Kumparan dengan beban lampu

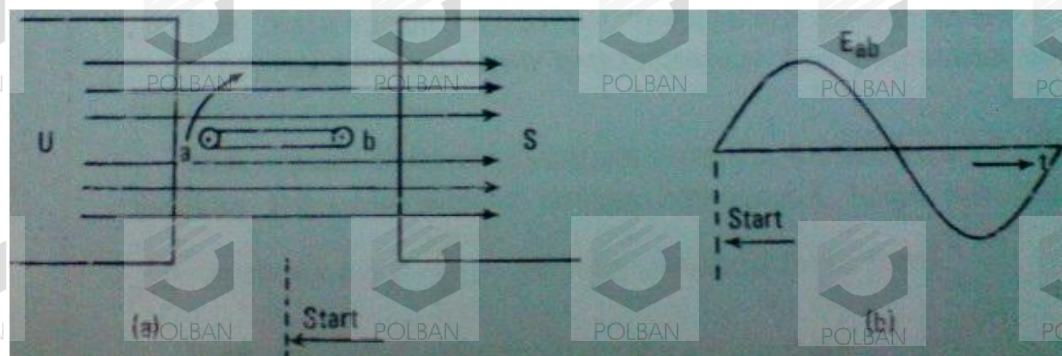
2.3.1. Prinsip Kerja Generator Arus Bolak Balik

Generator sinkron adalah generator arus bolak-balik dan sering disebut alternator yang berfungsi mengubah tenaga mekanik menjadi daya listrik.

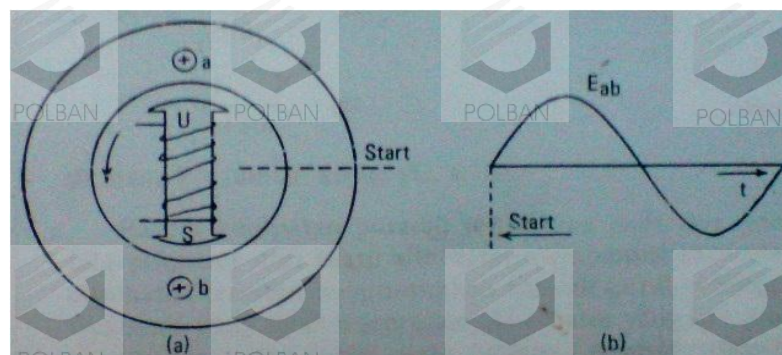
Prinsip kerja mesin ini adalah berdasarkan prinsip induksi elektromagnet seperti halnya pada transformator, tetapi pada alternator ini terdapat komponen yang bergerak.

Pada mesin yang bertenaga kecil (dengan rating kurang dari 50kW) kumparan pembangkit (jangkar) terletak pada rotor dan kumparan medan pada stator. Tetapi pada mesin dengan rating dalam Megawatt (sampai 800MW atau lebih), jangkar terletak pada stator dan kumparan medan pada rotor.

Pada gambar 2.11. memperlihatkan pembangkitan tegangan dengan kumparan pembangkit (jangkar) yang berputar dan pada gambar 2.12. kumparan penguat yang berputar.



Gambar 2.11. Pembangkitan tegangan dengan jangkar berputar



Gambar 2.12. Pembangkitan tegangan dengan kumparan medan berputar

Apabila rotor diputar oleh suatu penggerak utama (misalnya turbin uap) dan kumparan medan diberi sumber tegangan dc sehingga kumparan medan akan membangkitkan medan magnet. Hasil interaksi kawat-kawat jangkar dengan garis-garis gaya, maka di dalam kawat jangkar akan timbul tegangan induksi yang sinusoid (atau berbentuk grafik sinus) seperti diperlihatkan pada gambar 2.11 (b). Jika kumparan berada pada posisi start (gambar 2.11.), tegangan yang timbul adalah nol.

Pada gambar 2.12. tegangan yang timbul dalam kawat jangkar akan di suplai ke jala-jala (rangkain luar) melalui slip ring (atau cincin seret), sedang pada gambar 2.11. dapat dihubungkan langsung dengan terminal stator dan arus eksitasilah yang dilalirkan melalui slip ring.

2.3.2. Frekuensi Dan Putaran

Frekuensi adalah jumlah getaran listrik setiap detik yang dinyatakan adalah satuan Herz atau Cycle (disingkat Hz atau c/s). Apabila dikatakan frekuensi $f = 1$ Hz, hal ini berarti rotor bergerak mengitari dua buah kutub, yaitu rotor berputar dengan jarak 360° listrik. Oleh karena itu frekuensi tergantung pada putaran dan jumlah kutub.

Bila suatu mesin (alternator) mempunyai jumlah kutub P , tegangan induksi yang timbul dalam kawat jangkar tiap perputaran menjadi $P/2$ periode.

Jadi sebuah alternator yang mempunyai jumlah kutub P untuk menghasilkan tegangan induksi dengan frekuensi f , harus membuat putaran $\frac{f}{P/2}$ perdetik atau $\frac{60 f}{P/2}$ putaran permenit (atau rpm).

Sehingga untuk putaran n berlaku hubungan:

$$n = \frac{60 f}{P/2} = \frac{120}{P} \text{ rpm} \dots \dots \dots (2.2)$$

$$F = \frac{n \cdot P}{120} \text{ Hz} \dots \dots \dots (2.3)$$

di mana $P = \text{jumlah kutub (U + S)}$.

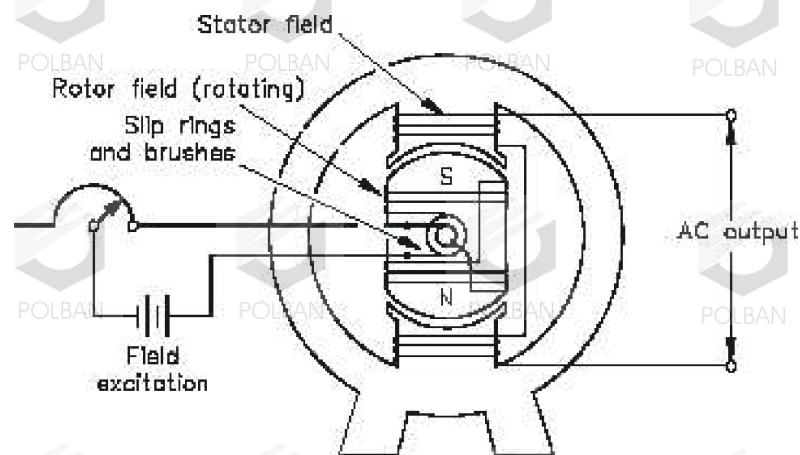
Rating kecepatan putaran tergantung tipe primovernya. Apabila primover dari suatu alternator mempunyai kecepatan rendah maka alternator tersebut

membutuhkan banyak kutub sehingga tercapai besar frekuensi yang telah ditentukan. Alternator yang tipe primovernya mempunyai kecepatan tinggi maka biasanya generator tersebut mempunyai jumlah kutub 2, 4, atau 6 buah.

2.3.3. Konstruksi Generator Arus Bolak Balik

Konstruksi generator arus bolak - balik ini terdiri dari dua bagian utama, yaitu:

1. Stator, yakni bagian diam yang mengeluarkan tegangan bolak balik.
2. Rotor, yakni bagian bergerak yang menghasilkan medan magnet yang menginduksikan ke stator. Stator terdiri dari badan generator yang terbuat dari baja yang berfungsi melindungi bagian dalam generator, kotak terminal dan name plate pada generator. Inti Stator yang terbuat dari bahan ferromagnetik yang berlapis - lapis dan terdapat alur - alur tempat meletakkan lilitan stator. Lilitan stator yang merupakan tempat untuk menghasilkan tegangan. Sedangkan, rotor berbentuk kutub sepatu (salient) atau kutub dengan celah udara sama rata (rotor silinder). Konstruksi dari generator sinkron ini sendiri dapat dilihat pada Gambar 2.3.



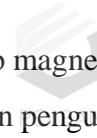
Gambar 2.13 Konstruksi Generator AC

Keterangan: Stator = 1. Rumah Stator

2. Inti stator



- 3. Lilitan stator
- 4. Alur stator
- 5. Kontak hubung



- Rotor =
- 1. Kutub magnet
 - 2. Lilitan penguat magnet
 - 3. Cincin seret (slip ring)
 - 4. Poros



2.3.4. Persamaan GGL yang timbul

Jika z = jumlah kawat atau sisi kumparan dalam seri/fasa

= 2T dimana T = jumlah kumparan atau lilitan/fasa (1 lilitan = 2 sisi kumparan)

P = jumlah kutub

F = frekuensi ggl yang timbul

Φ = fluks/kutub

n = kecepatan putar rotor (rpm)

Jika rotor berputar satu kali (yaitu 60/n detik) maka setiap kawata stator terpotong oleh fluks ΦP weber.

Sehingga $d\Phi = \Phi P$ dan $dt = 60/n$ detik.

Harga ggl rata-rata yang timbul per konduktor

$$= \frac{d\Phi}{dt} = \frac{\Phi P}{60/n} = \frac{\Phi n P}{60} \text{ volt} \dots\dots\dots (2.4)$$

ggl rata-rata per kawat

$$E_r = \frac{\Phi P}{60} \times \frac{120f}{P} = 2f\Phi \text{ volt} \dots\dots\dots (2.5)$$

Jika kawat stator terdiri dari Z kawat per fasa, maka

$$E_r \text{ per fasa} = 2f\Phi Z \text{ volt} = 4f\Phi T \text{ volt} \dots\dots\dots (2.6)$$

Harga efektif dari ggl yang timbul adalah

$$E_{eff} = 4k_b f \Phi P T \text{ volt} \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana : faktor bentuk $k_b = \frac{\text{harga rata-rata}}{\text{harga efektif}} \dots\dots\dots (2.8)$

$$= \frac{0,707}{0,636} = 1,11$$



Jadi $E_{eff} = 4,44 f \Phi T \text{ volt}$ (2.9)

2.3.5. Generator Tanpa Beban (Beban Nol)

Apabila sebuah mesin sinkron difungsikan sebagai generator dengan diputar pada kecepatan sinkron dan rotor diberi arus medan (I_f), maka pada kumparan jangkar stator akan diinduksikan tegangan tanpa beban (E_o), yaitu sebesar:

$E_o = 4,44 .K_d. K_p. f. \phi_m. T \text{ Vol t}$(2.10)

Dimana : k_d = Faktor Distribusi

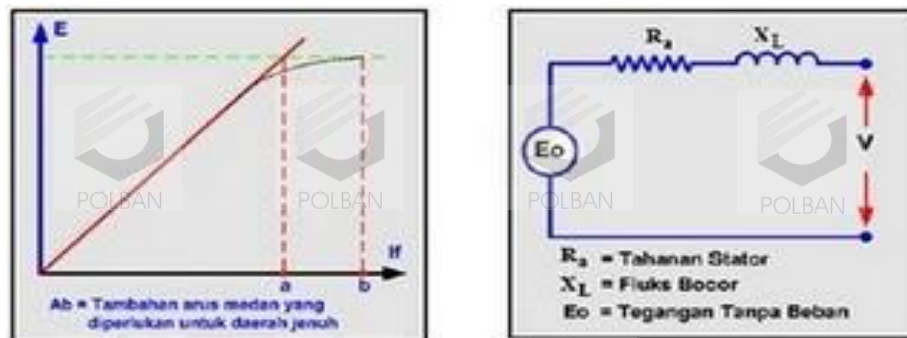
k_p = Faktor Jarak Kumparan

ϕ_m = Fluks Maksimum Yang dihasilkan oleh I_f

T = Jumlah Kumparan per fasa

Dalam keadaan tanpa beban arus jangkar tidak mengalir pada stator, sehingga tidak terdapat pengaruh reaksi jangkar. Fluks hanya dihasilkan oleh arus medan (I_f). Bila besarnya arus medan dinaikkan, maka tegangan keluaran juga akan naik sampai titik saturasi (jenuh), seperti diperlihatkan pada Gambar 2.6.

Kondisi generator tanpa beban bisa digambarkan rangkaian ekuivalennya seperti diperlihatkan pada gambar Gambar 2.6 b.



Gambar 2.14 a dan b Kurva dan Rangkaian Ekuivalen Generator Tanpa Beban

2.3.6. Generator Berbeban

Bila generator diberi beban yang berubah - ubah maka besarnya tegangan terminal V akan berubah - ubah pula, hal ini disebabkan adanya kerugian tegangan pada:

1. Resistansi Jangkar

Resistansi jangkar / fasa Ra menyebabkan terjadinya kerugian tegangan / fasa (tegangan jatuh / fasa) dan $I.R_a$ yang sefasa dengan arus jangkar.

2. Reaktansi Bocor Jangkar

Saat arus mengalir melalui penghantar jangkar, sebagian fluks yang tidak mengimbas pada jalur yang telah ditentukan, hal seperti ini disebut dengan Fluks Bocor.

3. Reaksi Jangkar

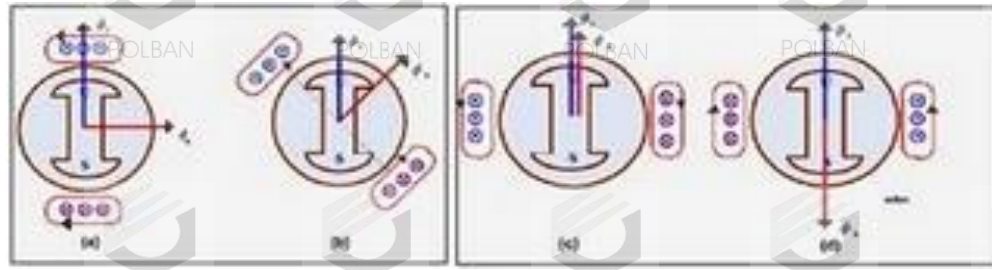
Adanya arus yang mengalir pada kumparan jangkar saat generator dibebani akan menimbulkan fluksi jangkar (Φ_A) yang berintegrasi dengan fluksi yang dihasilkan pada kumparan medan rotor (Φ_F), sehingga akan dihasilkan suatu fluksi resultan sebesar:

$$\Phi_R = \Phi_F + \Phi_A \dots\dots\dots (2.11)$$

Dimana : Φ_A = fluksi jangkar

Φ_F = fluksi yang dihasilkan pada kumparan medan rotor

Interaksi antara kedua fluksi ini disebut sebagai reaksi jangkar, seperti diperlihatkan pada Gambar 2.7 yang mengilustrasikan kondisi reaksi jangkar untuk jenis beban yang berbeda-beda.



Gambar 2.15 a, b, c dan d Kondisi Reaksi Jangkar

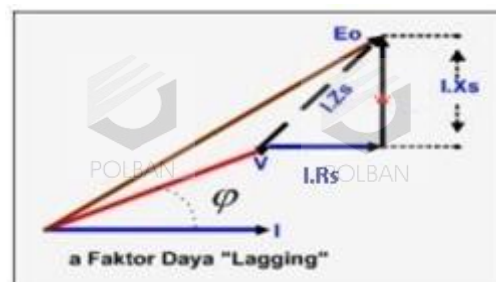
Gambar 2.16a, memperlihatkan kondisi reaksi jangkar saat generator dibebani tahanan (resistif) sehingga arus jangkar I_a sefase dengan GGL E_b dan Φ_A akan tegak lurus terhadap Φ_F .

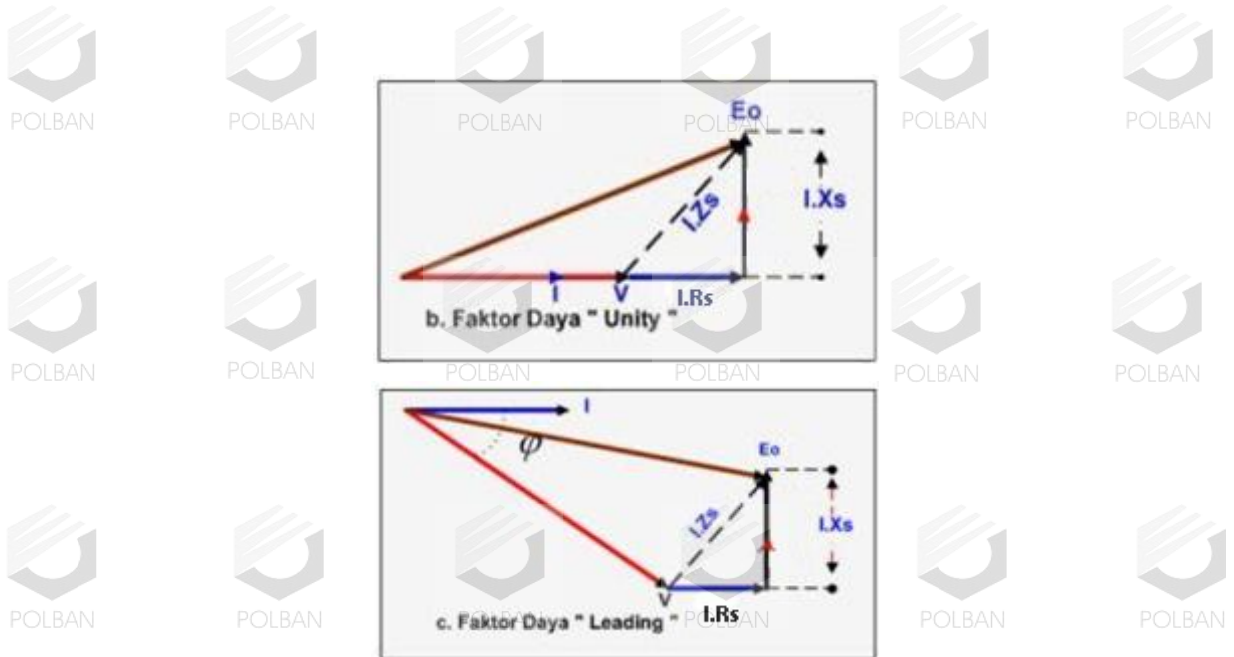
Gambar 2.16b, memperlihatkan kondisi reaksi jangkar saat generator dibebani kapasitif induktif, sehingga arus jangkar I_a mendahului ggl E_b sebesar θ dan Φ_A terbelakang terhadap Φ_F dengan sudut $(90 - \theta)$.

Gambar 2.16c, memperlihatkan kondisi reaksi jangkar pada saat dibebani kapasitif murni yang mengakibatkan arus jangkar I_a mendahului GGL E_b sebesar 90° dan Φ_A akan memperkuat Φ_F yang berpengaruh terhadap pemagnetan.

Gambar 2.16d, memperlihatkan kondisi reaksi jangkar saat arus diberi beban induktif murni sehingga mengakibatkan arus jangkar I_a terbelakang dari GGL E_b sebesar 90° dan Φ_A akan memperlemah Φ_F yang berpengaruh terhadap pemagnetan.

Vektor diagram untuk beban yang bersifat Induktif, resistif murni, dan kapasitif diperlihatkan pada Gambar 2.7a, 2.7b dan 2.7c.





Gambar 2.16 a, b, c Vektor Dagram Beban Generator

Berdasarkan gambar 2.17, maka bisa ditentukan besarnya tegangan jatuh yang terjadi, yaitu:

Total Tegangan Jatuh pada Beban:

$$= I.Ra + j (I.Ra + I.XL)$$

$$= I \{Ra + j (Xs + XL)\}$$

$$= I \{Ra + j (Xs)\}$$

$$= I.Zs \dots \dots \dots (2.12)$$

E_0 = tegangan tanpa beban

V = tegangan terminal (berbeban)

$I.Ra$ = tegangan jatuh resistansi jangkar

$I.Xs$ = tegangan jatuh reaktansi sinkron

$I.Zs$ = total tegangan jatuh pada generator

R_s = resistansi belitan stator

X_s = reaktansi sinkron

Z_s = rugi-rugi generator

2.3.7 Pengaruh pembebanan terhadap generator

1. Beban resistif

Sifat beban resistif adalah arus beban resistif sefasa dengan tegangannya atau faktor daya atau $\cos \varphi = 1$

Daya aktif:

$$P = V \cdot I \cos \varphi \text{ (Watt)} \dots \dots \dots (2.13)$$

Daya Reaktif:

$$Q = V \cdot I \sin \varphi \text{ (VAR)} \dots \dots \dots (2.14)$$

Jika $\cos \varphi = 1$ maka $\sin \varphi = 0$ dan daya aktif menjadi maximum daya reaktif nol. Efek beban ini terhadap generator adalah putaran generator turun dan tegangan generator juga turun, tindakan yang harus dilakukan adalah jika pembangkitnya PLTA atau micro hydro tambah debit air dan untuk menaikkan tegangan dengan cara menambah arus excitasi.

2. Beban induktif

Sifat beban induktif adalah arus beban induktif 90° tertinggal terhadap tegangannya atau faktor daya : $\cos \varphi = 0$

Daya aktif:

$$\begin{aligned} P &= V \cdot I_n \cdot \cos \varphi \text{ (Watt)} \\ &= V \cdot I \cdot \cos 90^\circ \\ &= V \cdot I \cdot 0 \end{aligned}$$

Daya Reaktif:

$$\begin{aligned} Q &= V \cdot I_n \cdot \sin \varphi \text{ (VAR)} \\ &= V \cdot I_n \cdot \sin 90^\circ \\ &= V \cdot I_n \cdot 1 \end{aligned}$$

Bila $\cos \varphi = 0$ maka $\sin \varphi = 1$ dan daya aktif menjadi nol daya reaktif maksimum. Efek beban ini terhadap generator adalah tegangan stator turun putaran tetap, hal ini dapat diatasi dengan cara menambah arus excitasi

3. Beban kapasitif

Sifat beban kapasitif adalah arus beban kapasitif 90° mendahului

terhadap tegangannya atau faktor daya : $\cos \varphi = 0$

Daya aktif :

$$P = V \cdot I \cdot \cos \varphi \text{ (Watt)}$$

$$= V \cdot I \cdot \cos 90^\circ$$

$$= V \cdot I \cdot 0$$

Daya Reaktif :

$$Q = V \cdot I \cdot \sin \varphi \text{ (VAR)}$$

$$= V \cdot I \cdot \sin 90^\circ$$

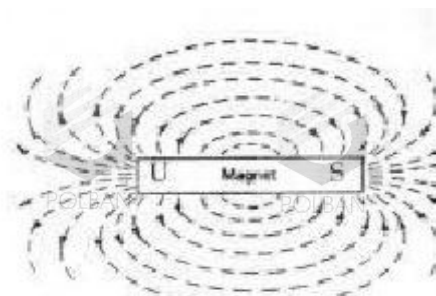
$$= V \cdot I \cdot 1$$

Bila $\cos \varphi = 0$ maka $\sin \varphi = 1$ dan daya aktif menjadi nol daya reaktif maksimal. Efek beban ini terhadap generator adalah akibatnya tegangan stator naik putaran tetap. Untuk menurunkan tegangan yaitu dengan cara mengurangi arus excitasi.

2.4 Magnet

Magnet atau magnit adalah suatu obyek yang mempunyai suatu medan magnet. Kata magnet (magnit) berasal dari bahasa Yunani *magnítis líthos* yang berarti batu Magnesian. Magnesia adalah nama sebuah wilayah di Yunani pada masa lalu yang kini bernama Manisa (sekarang berada di wilayah Turki) di mana terkandung batu magnet yang ditemukan sejak zaman dulu di wilayah tersebut.

Kemagnetan adalah suatu sifat zat yang teramati sebagai suatu gaya tarik atau gaya tolak antara kutub-kutub tidak senama maupun senama.



Gambar 2.17 Sebuah magnet batang

Pada saat ini, suatu magnet adalah suatu materi yang mempunyai suatu medan magnet. Materi tersebut bisa dalam berwujud magnet tetap atau magnet tidak tetap. Magnet yang sekarang ini ada hampir semuanya adalah magnet buatan. Magnet selalu memiliki dua kutub yaitu: kutub utara (north/ N) dan kutub selatan (south/ S). Walaupun magnet itu dipotong-potong, potongan magnet kecil tersebut akan tetap memiliki dua kutub. Magnet dapat menarik benda lain. Beberapa benda bahkan tertarik lebih kuat dari yang lain, yaitu bahan logam. Namun tidak semua logam mempunyai daya tarik yang sama terhadap magnet. Besi dan baja adalah dua contoh materi yang mempunyai daya tarik yang tinggi oleh magnet. Sedangkan oksigen cair adalah contoh materi yang mempunyai daya tarik yang rendah oleh magnet. Satuan intensitas magnet menurut sistem metrik pada Satuan Internasional (SI) adalah Tesla dan SI unit untuk total fluks magnetik adalah weber. $1 \text{ weber/m}^2 = 1 \text{ tesla}$, yang memengaruhi satu meter persegi.

2.4.1. Sifat-sifat Kemagnetan

Sifat kemagnetan dapat bersifat tetap dan dapat bersifat sementara. Suatu bahan memiliki sifat magnet dapat dijelaskan menurut hipotesa (teori) Weber.

Benda-benda yang ada di sekitar kita berdasarkan sifat kemagnetannya dapat di bedakan menjadi 2 macam, yaitu :

1. Benda Magnetik

Benda magnetik adalah benda-benda yang dapat dipengaruhi (di tarik/ditolak) oleh magnet.

Benda magnetik dapat di bedakan menjadi 3 yaitu :

a. Feromagnetik, yaitu benda-benda yang dapat di tarik kuat oleh magnet dan dapat di buat menjadi magnet.

Contoh : besi, baja, cobalt, nikel

b. Paramagnetik, yaitu benda-benda yang di tarik lemah oleh magnet dan tidak dapat di tarik magnet.

Contoh : mangan, platina, aluminium dan uranium

c. Diamagnetik, yaitu benda-benda yang seolah-olah di tolak oleh magnet dan tidak dapat di buat menjadi magnet.

Contoh : bismut, seng, emas

2. Benda non Magnetik

Benda non magnetik adalah benda-benda yang tidak dapat di tarik oleh magnet.

Contoh : kertas, kayu, palstik, kaca

Berdasar teori Weber ini dapatlah dijelaskan bahwa besi lebih mudah dijadikan magnet dan sebaliknya, mudah juga kehilangan kemagnetannya.

Sedangkan baja lebih sukar dijadikan magnet tetapi kalau sudah menjadi magnet maka kemagnetannya bersifat tetap (karenanya disebut magnet permanen).Beberapa bahan, seperti besi lunak, mudah dibuat menjadi magnet.

Tetapi bahan tersebut mudah kehilangan kemagnetannya. Magnet yang dibuat dari bahan besi lunak seperti itu disebut magnet sementara. Magnet lain dibuat dari bahan yang sulit dihilangkan kemagnetannya. Magnet demikian disebut magnet

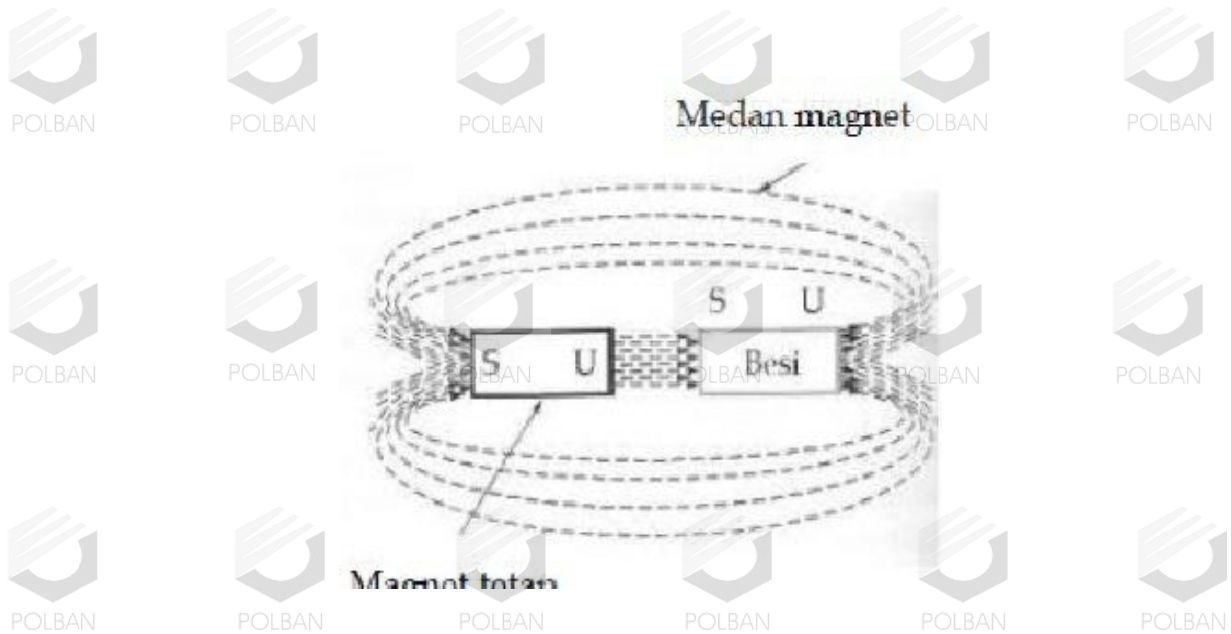
tetap. Kobalt,nikel, dan besi adalah bahan yang digunakan untuk membuat magnet tetap. Banyak magnet tetap dibuat dari campuran aluminium, nikel, kobalt dan besi. Teori lain tentang sifat magnet adalah teori Weiss yang mendasarkan pada

sifat spin elektron. Weiss mengemukakan bahwa setiap elektron yang ada pada atom unsur selalu berputar pada sumbunya dan bersifat sebagai magnet elementer.

Arah perputaran (spin) elektron yang satu dengan elektron lainnya dapat saling berlawanan (oleh karena itu jika arah yang satu diberi harga positif maka arah kebalikannya diberiharga negatif). Semakin banyak suatu logam memiliki

elektron berspin sama (berarah sama), semakin kuat sifat kemagnetan dari logam itu. Logam transisi tertentu (terutama besi dan campurannya), spin elektronnya dapat diarahkan menjadi spin searah. Kelompok elektron yang mempunyai spin

searah disebut kelompok Weiss, kelompok-kelompok Weiss dalam logam akan saling memperkuat dan membuat logam itu bersifat magnet.



Gambar 2.18 Magnet tetap yang menginduksi batang besi

Dalam kemagnetan dikenal gaya koersif, yakni gaya atau kekuatan yang dapat mengembalikan keadaan kelompok elektron berspin sama ke keadaan semula. Dalam hal ini, gaya koersif baja lebih besar daripada besi. Karena sentuhan atau karena pemanasan, sifat kemagnetan suatu bahan akan berkurang dan seterusnya dapat hilang sama sekali

2.4.2. Magnet Tetap

Magnet tetap tidak memerlukan tenaga atau bantuan dari luar untuk menghasilkan daya magnet (berelektromagnetik).

Jenis magnet tetap selama ini yang diketahui terdapat pada:

- Magnet neodmium, Merupakan magnet tetap yang paling kuat. Magnet neodmium (juga dikenal sebagai NdFeB, NIB, atau magnet Neo), merupakan sejenis magnet tanah jarang, terbuat dari campuran logam neodmium,
- Magnet Samarium-Cobalt Salah satu dari dua jenis magnet bumi yang langka, merupakan magnet permanen yang kuat yang terbuat dari paduan samarium dan kobalt.

2.4.3 Magnet Neodymium



Gambar 2.19 Magnet neodymium (NdFeB)

Magnet permanen digunakan untuk generator daya kecil hingga menengah.

Unsur-unsur alam yang digunakan dalam pembuatan magnet antara lain: besi, aluminium, kobal, nikel, titanium. Kombinasi unsur-unsur alam ini menghasilkan berbagai jenis magnet seperti: Alnico, Ticonal, dan *rare-magnet earth*.

Rare - magnet earth adalah magnet yang dibuat dengan mengkombinasikan unsur samarium, kobal, neodymium, iron, dan boron sehingga dikenal magnet samarium-kobal (SmCo) dan neodimium-iron-boron (NdFeB atau NIB). Kedua jenis magnet ini merupakan magnet yang sangat kuat.

Senyawa ini memberikan potensi untuk memiliki koersivitas tinggi (yaitu, perlawanan menjadi demagnetized). Oleh karena itu, sebagai kepadatan energi maksimum sebanding dengan J_s^2 magnet fase ini memiliki potensi untuk menyimpan sejumlah besar energi magnetik ($BH_{max} \sim 512 \text{ kJ/m}^3$ atau 52 MGOe) dan mempunyai residual fluks density (Br) sebesar 4,5-14,8 KGs/1450-1480mT, jauh lebih dari kobalt samarium (SmCo) magnet. Dalam prakteknya, sifat magnetik dari magnet neodymium bergantung pada komposisi paduan, struktur mikro, dan teknik manufaktur yang digunakan.

Neodymium magnet Alnico dan ferit magnet dalam banyak aplikasi berbagai teknologi modern di mana magnet permanen yang kuat diperlukan, karena kekuatan mereka lebih besar memungkinkan penggunaan yang lebih kecil.

Beberapa contoh aplikasi penggunaannya :

1. Untuk komputer hard disk
2. Magnetic Resonance Imaging (MRI)
3. Pengeras suara dan headphone
4. Magnet bantalan dan kopling
5. Motor magnet permanen:
6. Generator magnet permanen
7. Servo motor
8. Mengangkat dan kompresor motor
9. pickup gitar magnetic

2.5. Generator Pico

Generator Pico adalah istilah yang digunakan untuk generator dengan daya keluaran kurang dari 1000 Watt. Hal ini berguna untuk masyarakat terpencil yang membutuhkan listrik dalam skala yang tidak terlalu besar, misalnya untuk daya satu atau dua bola lampu pijar. Bahkan di Negara – Negara berkembang, generator pico sudah banyak digunakan untuk pembangkit listrik tenaga pico hydro. Pico hydro sendiri untuk pembangkitannya tidak memerlukan turbin dengan daya yang besar, dan tidak memerlukan bendungan yang besar. Untuk pico hydro, pipa pesat sendiri cukup mempunyai ukuran 1 meter.



Gambar 2.20 Generator Pico

2.6. Kecepatan Putar

Sebuah generator biasanya didesain untuk beroperasi pada satu kecepatan saja. Misalnya generator dengan putaran 200, 1500, 2000, 3000, hingga 100000 (RPM) putaran per menit untuk generator berkecepatan tinggi.

Generator kecepatan rendah biasanya digunakan dalam PLTA/PLTM. Generator kecepatan tinggi untuk sistem dengan turbin uap atau gas. Kecepatan putar harus tinggi karena:

- A. Karena kecepatan berbanding lurus dengan besarnya induksi tegangan yang dihasilkan dalam kumparan (Hukum Induksi Faraday).
- B. Makin tinggi kecepatan rotor, untuk keluaran yang sama, generator bisa dibuat lebih kecil. Dimensi kecil bahan lebih sedikit biaya turun, ruang yang dibutuhkan untuk instalasi juga makin kecil.

2.7. Rugi-Rugi dan Efisiensi Generator

Secara teori diketahui bahwa daya mekanis yang dihasilkan oleh penggerak mula generator sinkron (daya output penggerak mula juga sebagai daya input generator sinkron) diubah menjadi daya elektrik (daya output generator). Perbedaan antara daya output dengan daya input generator sinkron dipresentasikan sebagai rugi-rugi (losses) generator sinkron.

Diagram aliran daya generator sinkron dapat dilihat pada Gambar 3.3. Daya input mekanis pada poros generator (P_{in}) yaitu seperti Persamaan 3.11 berikut :

$$P_{in} = \frac{2\pi n}{60} \times T \quad (2.15)$$

Setelah masuk ke generator menjadi daya jangkar $P_a = E \cdot I_a$ antara P_{in} ke P_a mengalami kerugian mekanik yaitu:

$$P_m = P_{in} - P_a \text{ atau } P_{in} = P_m + P_a \quad (2.16)$$

Dimana:

P_m = kerugian mekanik

P_{in} = daya masuk
 P_a = daya jangkar

Dari daya jangkar berubah menjadi daya listrik (P_{out}), proses perubahan daya jangkar ke daya listrik mengalami kerugian:

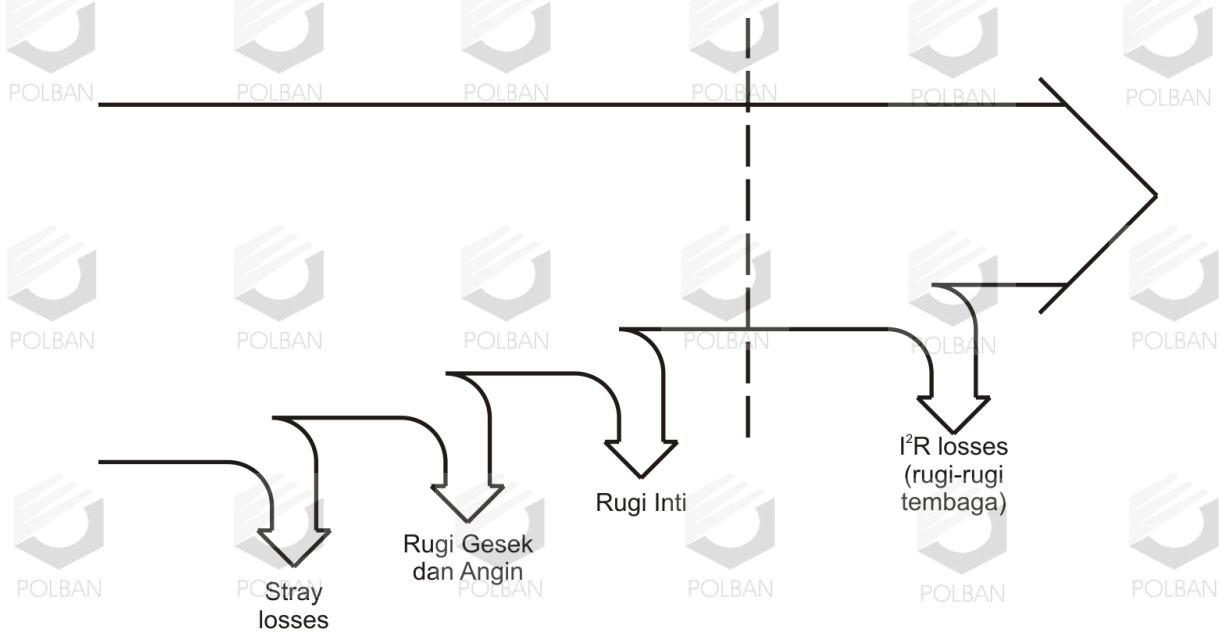
$$P_a = P_{out} + P_{inti} + P_{Cu\ total} \dots\dots\dots(2.17)$$

P_{inti} = daya yang diakibatkan rugi inti besi
 $= P_{hysterisis} + P_{edy\ current} \dots\dots\dots(2.18)$

$P_{hysterisis}$ = daya yang diakibatkan bahan inti

$P_{edy\ current}$ = daya yang diakibatkan arus pusar di antara inti besi

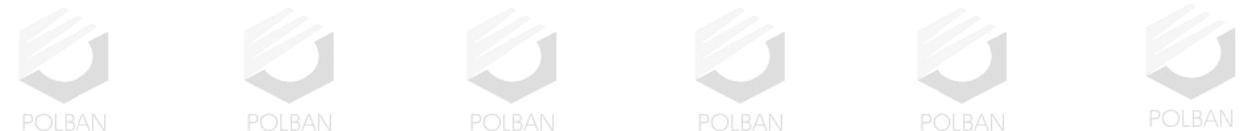
$P_{Cu\ total}$ adalah rugi-rugi bahan tembaga yang ada di generator



Gambar 2.21 Diagram Aliran Daya Generator Sinkron

Seperti halnya dengan mesin-mesin listrik lainnya, maupun transformator, maka efisiensi generator sinkron dapat dituliskan seperti Persamaan 3.14 berikut :

$$\eta(\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.19)$$



$$P_{in} = P_{out} + \sum R_{ugi} - rugi \dots \dots \dots (2.20)$$

P_{out} = daya keluaran (Watt)

P_{in} = daya masukan (Watt)

Rugi-rugi inti besi dan rugi-rugi angin dan gesekan merupakan rugi-rugi tetap yang berarti besar rugi-rugi tersebut selalu tetap. Sedangkan rugi-rugi tembaga kumparan medan penguat, rugi-rugi tembaga kumparan jangkar dan rugi-rugi buta merupakan rugi-rugi bervariasi yang berarti besar rugi-rugi tersebut tidak selalu tetap ataupun berubah-ubah.

Rugi-rugi angin dan gesekan dipengaruhi oleh ukuran dan bentuk dari bagian yang berputar, rancangan sudu kipas rotor, desain bantalan (bearing) dan susunan rumah (housing) mesin. Rugi yang hilang tersebut berupa daya yang diperlukan untuk memutar kipas guna mensirkulasikan udara pendingin, dan gesekan bantalan dan sikat.

Rugi-rugi inti besi disebabkan oleh fluksi utama mesin dan terjadi terutama pada gigi-gigi stator (jangkar), pada bagian inti jangkar dekat gigi-gigi stator dan pada permukaan kutub rotor. Inti stator umumnya dibentuk dari laminasi tipis baja silikon yang terisolasi satu sama lain untuk membatasi rugi-rugi histeresis dan arus eddy pada baja.

2.8 Reluktansi

Reluktansi bahan untuk menetapkan garis fluks magnet dalam bahan ditentukan oleh persamaan berikut :

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} \text{ (rels, atau At/Wb)} \dots \dots \dots (2.21)$$

Dimana \mathcal{R} adalah reluktansi , l adalah panjang lintasan magnet, dan A adalah luas potongan melintang, t dalam satuan At/Wb adalah jumlah belitan yang di gunakan kumparan.

Hambatan dan reluktansi berbanding terbalik dengan luas, yang menunjukkan bahwa semakin luas permukaan akan menghasilkan pengurangan masing-masing harga. Akan tetapi reluktansi berbanding terbalik dengan permeabilitas, sedangkan hambatan berbanding langsung dengan hambatan jenis. Semakin besar harga μ atau semakin kecil ρ , akan semakin kecil harga reluktansi dan hambatan masing-masing. Oleh karena itu, bahan yang memiliki permeabilitas tinggi, seperti feromagnetik, memiliki reluktansi yang kecil dan akan menghasilkan peningkatan ukuran fluks yang melalui inti. Tidak ada satuan yang secara luas diterima untuk reluktansi, meskipun biasanya digunakan satuan *rel* dan At/Wb.

2.9 Regulasi Tegangan

Regulasi tegangan adalah perubahan tegangan terminal antara keadaan beban nol dengan beban penuh, dan ini dinyatakan dengan persamaan :

$$\text{regulasi tegangan} = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.22)$$

Terjadinya perbedaan tegangan terminal V dalam keadaan berbeban dengan tegangan E_0 pada saat tidak berbeban dipengaruhi oleh faktor daya dan besarnya arus jangkar (I_a) yang mengalir.

Untuk menentukan regulasi tegangan dari generator adalah dengan memanfaatkan karakteristik tanpa beban dan hubung singkat yang diperoleh dari hasil percobaan dan pengukuran tahanan jangkar. Ada tiga metoda atau cara yang sering digunakan untuk menentukan regulasi tegangan tersebut, yaitu :

- Metoda Impedansi Sinkron atau Metoda GGL.
- Metoda Amper Lilit atau Metoda GGM.
- Metoda Faktor Daya Nol atau Metoda Potier.

Hubungan reluktansi dengan regulasi tegangan yaitu apabila semakin besar nilai reluktansi maka regulasi tegangan akan besar dan apabila nilai reluktansi kecil regulasi tegangan pun akan kecil dan semakin kecil nilai regulasi maka semakin baik.