



BAB II

TNJAUAN PUSTAKA

2.1 Generator Sinkron

Menurut *Anderson P.M (1982)*, generator sinkron atau alternator merupakan mesin listrik arus bolak balik / AC (*Alternating Current*) yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik arus bolak-balik (AC). Energi mekanik diperoleh dari penggerak mula (*prime mover*) yang terkopel dengan rotor generator, sedangkan energi listrik diperoleh dari proses induksi elektromagnetik yang melibatkan kumparan rotor dan kumparan stator. Tegangan output dari generator sinkron adalah tegangan bolak-balik (AC), oleh karena itu generator sinkron disebut juga generator AC. Mesin listrik arus bolak-balik (AC) ini disebut sinkron, karena jumlah putaran rotornya sama dengan jumlah putaran medan magnet pada stator. Kecepatan sinkron ini dihasilkan dari kecepatan putar rotor dengan kutub-kutub magnet yang berputar dengan kecepatan yang sama dengan medan magnet putar pada stator. Jika kumparan rotor yang berfungsi sebagai pembangkit kumparan medan magnet yang terletak di antara kutub magnet utara dan selatan diputar oleh tenaga air atau tenaga lainnya, maka pada kumparan rotor akan timbul medan magnet atau fluks putar.¹

2.2 Prinsip Kerja Generator Sinkron

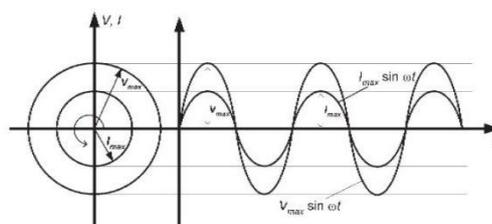
Prinsip generator ini secara sederhana dapat dijelaskan bahwa tegangan akan diinduksikan pada konduktor apabila konduktor tersebut bergerak pada medan magnet sehingga memotong garis-garis gaya. Hukum tangan kanan berlaku pada generator dimana menyebutkan bahwa terdapat hubungan antara penghantar bergerak, arah medan magnet, dan arah resultan dari aliran arus yang terinduksi. Apabila ibu jari menunjukkan arah gerakan penghantar, telunjuk menunjukkan arah fluks, jari tengah menunjukkan arah aliran elektron yang

¹ Ir. Hamzah Ibrahim, *Teknik Tenaga Listrik*, 1996, hlm. 7.



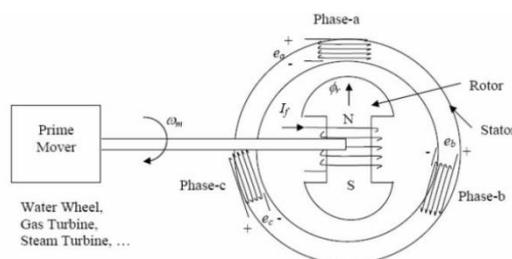
terinduksi. Hukum ini juga berlaku apabila magnet sebagai pengganti penghantar yang digerakkan.

Prinsip kerja dari generator sesuai dengan hukum Lens, yaitu arus listrik yang diberikan pada stator akan menimbulkan momen elektromagnetik yang bersifat melawan putaran rotor sehingga menimbulkan EMF pada kumparan rotor. Tegangan EMF ini akan menghasilkan suatu arus jangkar. Jadi diesel sebagai prime mover akan memutar rotor generator, kemudian rotor diberi eksitasi agar menimbulkan medan magnet yang berpotongan dengan konduktor pada stator dan menghasilkan tegangan pada stator. Karena terdapat dua kutub yang berbeda yaitu utara dan selatan, maka pada 90° pertama akan dihasilkan tegangan maksimum positif dan pada sudut 270° kedua akan dihasilkan tegangan maksimum negatif. Ini terjadi secara terus menerus/continue. Bentuk tegangan seperti ini lebih dikenal sebagai fungsi tegangan bolak-balik.



Grafik arus dan tegangan sebagai fungsi waktu

Gambar 2.1 Gelombang tegangan bolak balik²



Gambar 2.2 Prinsip Kerja Generator Sinkron³

² “Arus dan tegangan Listrik Bolak Balik”, <http://fisikazone.com/pengertian-arus-dan-tegangan-listrik-bolak-balik/arus-dan-tegangan-listrik-bolak-balik/>, diakses 23 April 2021

³ Suad Ibrahim Shahl, *e-book Synchronous Generators*, 2015, hlm. 7.



Prinsip kerja dari generator sinkron dapat dinyatakan sebagai berikut :

- Rotor disuplai dengan arus DC I_f yang kemudian menghasilkan fluks magnet ϕ_f .
- Rotor digerakkan oleh turbin dengan kecepatan konstan sebesar n_s .
- Garis gaya magnet bergerak menginduksi kumparan pada stator.
- Frekuensi dari tegangan generator tergantung dari kecepatan putaran rotor yang dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$f = \frac{p}{2} \times \frac{n}{60} = \frac{pn}{120} \dots\dots\dots (2.1)$$

- dimana : f = frekuensi (Hz)
 P = jumlah kutub
 N = kecepatan putaran rotor (rpm)

Adapun besar GGL induksi kumparan stator atau GGL induksi armatur per fasa adalah :

$$E_a/ph = 4,44. f. M. \phi. K_d \dots\dots\dots (2.2)^4$$

- dimana : E_a = Gaya gerak listrik armatur per fasa (volt)
 f = Frekuensi output generator (Hz)
 M = Jumlah kumparan per fasa
 $= Z/2$
 Z = Jumlah konduktor seluruh slot per fasa
 K_d = Faktor distribusi. Hal ini diperlukan karena kumparan armatur atau alternator tidak terletak di dalam satu slot melainkan terdistribusi dalam beberapa slot per fasa
 ϕ = Flux magnet per kutub per fasa

2.3 Konstruksi Generator Sinkron

Menurut Kundur Prabha (1993), konstruksi generator sinkron terdiri dari dua bagian utama, yaitu : stator dan rotor.

⁴ Yon Rijono, *Dasar Teknik Tenaga Listrik*, Andi Offset, Yogyakarta, 1997, hlm. 210.



2.3.1 Rotor

Pada generator sinkron, arus DC diterapkan pada lilitan rotor untuk menghasilkan medan magnet rotor. Rotor generator diputar oleh prime mover menghasilkan medan magnet berputar pada mesin. Medan magnet putar ini menginduksi tegangan tiga fasa pada kumparan stator generator. Rotor terdiri dari dua bagian umum, yaitu:

- Inti kutub
- Kumparan medan

Pada bagian inti kutub terdapat poros dan inti rotor yang memiliki fungsi sebagai jalan atau jalur fluks magnet yang dibangkitkan oleh kumparan medan. Pada kumparan medan ini juga terdapat dua bagian, yaitu bagian penghantar sebagai jalur untuk arus pemacuan dan bagian yang diisolasi. Kutub medan magnet rotor dapat berupa salient pole (kutub menonjol) dan non salient pole (kutub silinder).

2.3.2 Stator

Stator atau armatur adalah bagian generator yang berfungsi sebagai tempat untuk menerima induksi magnet dari rotor. Arus AC yang menuju ke beban disalurkan melalui armatur, komponen ini berbentuk sebuah rangka silinder dengan lilitan kawat konduktor yang sangat banyak. Armatur selalu diam (tidak bergerak), oleh karena itu komponen ini disebut dengan stator. Lilitan armatur generator dalam wye dan titik netral dihubungkan ke tanah. Lilitan dengan wye dipilih karena dapat meningkatkan daya output dan menghindari tegangan harmonik sehingga tegangan line tetap sinusoidal dalam kondisi beban apapun.

Stator adalah bagian diam yang mengeluarkan tegangan bolak-balik pada generator sinkron yang terdiri dari :

a. Inti stator

Bentuk dari inti stator ini berupa cincin laminasi-laminasi yang diikat serapat mungkin untuk menghindari rugi-rugi arus eddy (*eddy current losses*). Pada inti ini terdapat slot-slot untuk menempatkan konduktor dan untuk mengatur arah medan magnetnya. Untuk menghindari arus pusar dan panas yang timbul,



maka inti stator dibuat dari lempengan baja tipis dan isolasi satu terhadap yang lain.

b. Belitan stator

Bagian stator yang terdiri dari beberapa batang konduktor yang terdapat di dalam slot-slot dan ujung-ujung kumparan. Masing-masing slot dihubungkan untuk mendapatkan tegangan induksi.

c. Alur stator

Merupakan bagian stator yang berperan sebagai tempat belitan stator ditempatkan.

d. Rumah stator

Bagian dari stator yang umumnya terbuat dari besi tuang yang berbentuk silinder. Bagian belakang dari rumah stator ini biasanya memiliki sirip-sirip sebagai alat bantu dalam proses pendinginan.

2.4 Karakteristik Generator Sinkron

2.4.1 Generator sinkron keadaan jalan tanpa beban

Apabila sebuah mesin sinkron difungsikan sebagai alternator dengan diputar pada kecepatan sinkron dan rotor diberi arus medan (I_f), maka tegangan (E_o) akan terinduksi pada kumparan jangkar stator. Bentuk hubungannya diperlihatkan pada persamaan berikut :

$$E_o = c \cdot n \cdot \phi \dots\dots\dots (2.3)^5$$

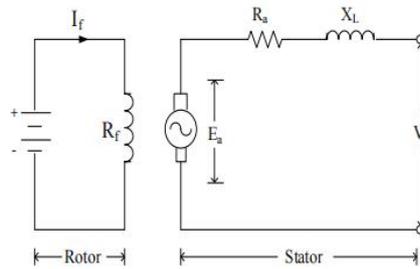
dimana : c = konstanta mesin

N = kecepatan putaran (rpm)

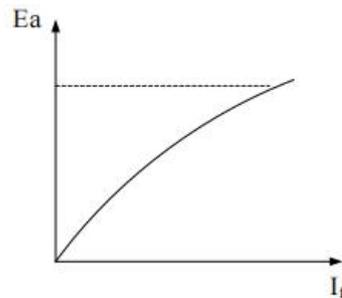
ϕ = fluks yang dihasilkan oleh I_f

Dalam keadaan tanpa beban arus jangkar tidak mengalir pada stator, karenanya tidak terdapat pengaruh reaksi jangkar. Fluks hanya dihasilkan oleh arus medan (I_f).

⁵ Zuhal, *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan elektronika daya*, Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 1988, hlm. 132.



Gambar 2.3 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron Tanpa Beban⁶



Gambar 2.4 Grafik Hubungan Arus Penguat Medan (If) dan Ea⁷

Besar GGL armatur tanpa beban pada faktor daya beban = 1, PF tertinggal dan PF mendahului adalah sebagai berikut :

- pf = 1

$$E_o = \sqrt{(V_t + I_a R_a)^2 + (I_a X_s)^2} \dots \dots \dots (2.4)$$

- pf = tertinggal

$$E_o = \sqrt{(V_t \cos \theta + I_a R_a)^2 + (V_t \sin \theta + I_a X_s)^2} \dots \dots \dots (2.5)$$

- pf = mendahului

$$E_o = \sqrt{(V_t \cos \theta + I_a R_a)^2 + (V_t \sin \theta - I_a X_s)^2} \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana: E_o = GGL armatur tanpa beban

V_t = tegangan terminal output per phasa (Volt)

R_a = resistansi jangkar per phasa (ohm)

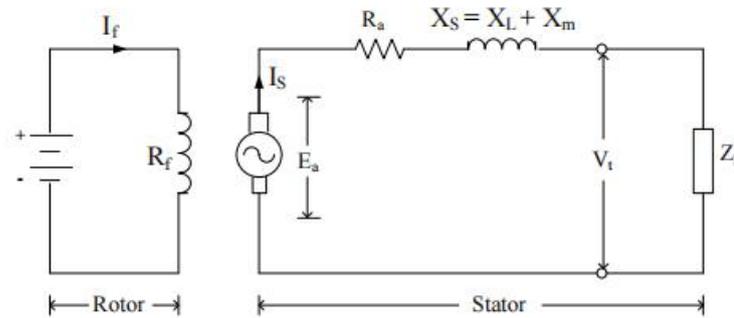
X_s = reaktansi sinkron per phasa (ohm).

⁶ Yon Rijono, op.cit. hlm. 212.

⁷ Ibid.



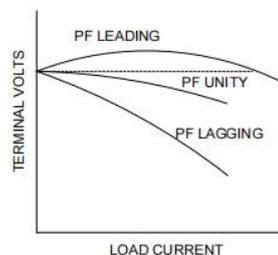
2.4.2 Generator sinkron berbeban



Gambar 2.5 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron Berbeban⁸

Bila generator diberi beban yang berubah-ubah maka besarnya tegangan terminal V_t akan berubah-ubah pula. Hal ini disebabkan adanya :

- a. Jatuh tegangan karena resistansi jangkar (R_a).
- b. Jatuh tegangan karena reaktansi bocor jangkar (X_L).
- c. Jatuh tegangan karena reaksi jangkar.



Gambar 2.6 Karakteristik Generator AC Pada Berbagai Faktor Daya⁹

Besar GGL armatur berbeban pada faktor daya beban = 1, PF tertinggal dan PF mendahului adalah sebagai berikut :

- $pf = 1$

$$E_o = \sqrt{(V_t + I_a R_a)^2 + (I_a X_L)^2} \dots\dots\dots (2.7)$$

- $pf = \text{tertinggal}$

$$E_o = \sqrt{(V_t \cos \theta + I_a R_a)^2 + (V_t \sin \theta + I_a X_L)^2} \dots\dots\dots (2.8)$$

⁸ Ibid., hlm.215.

⁹ Ibid., hlm. 218.



- pf = mendahului

$$E_o = \sqrt{(V_t \cos \theta + I_a R_a)^2 + (V_t \sin \theta - I_a X_L)^2} \dots\dots\dots (2.9)$$

Dimana: E_o = tegangan induksi pada jangkar per fasa (Volt)

V_t = tegangan terminal output per fasa (Volt)

R_a = resistansi jangkar per fasa (ohm)

X_L = reaktansi bocor per fasa (ohm).

2.5 Parameter Pengukuran Efisiensi Generator

Parameter yang diperlukan untuk pengukuran efisiensi generator :

1. Tegangan (V)
2. Arus (I)
3. Faktor Daya
4. Daya (p)

2.5.1 Pengaturan Tegangan Generator

Jika beban ditambahkan pada generator ac yang sedang bekerja pada kepesatan konstan dan dengan eksitasi medan konstan, tegangan terminal akan berubah. Besarnya perubahan akan bergantung pada rancangan mesin dan pada faktor daya beban.

Persen pengaturan (pada faktor daya tertentu)

$$= \frac{\text{tegangan tanpa beban} - \text{tegangan beban penuh}}{\text{tegangan beban penuh}} \times 100 \dots\dots\dots (2.10)$$

Faktor-faktor yang mempengaruhi pengaturan generator adalah sebagai berikut:

1. Penurunan tegangan $I R$ pada lilitan jangkar.
2. Penurunan tegangan $I X_L$ pada lilitan jangkar.
3. Reaksi jangkar (pengaruh magnetisasi dari arus jangkar).¹⁰

¹⁰ Lister, *Mesin dan Rangkaian Listrik*, Erlangga, Jakarta, 1998, hlm. 202.



Karena tegangan terminal generator ac banyak berubah dengan berubahnya beban, maka untuk operasi hampir semua peralatan listrik diperlukan usaha untuk menjaga agar tegangannya konstan. Cara yang biasa dilakukan untuk ini adalah menggunakan alat pembantu yang disebut pengatur tegangan (voltage regulator) untuk mengendalikan besarnya eksitasi medan dc yang dicatukan pada generator. Bila tegangan terminal generator turun karena perubahan beban, pengatur tegangan secara otomatis menaikkan pembangkitan medan sehingga tegangan kembali normal. Sama halnya bila tegangan terminal naik karena perubahan beban, maka pengatur akan mengembalikan nilai tegangan normalnya dengan mengurangi eksitasi medan.

2.5.2 Impedansi dan Resistansi

Impedansi (Z) adalah nilai hambatan yang dihasilkan dari beban berupa resistor dengan induktor/resistor dengan kapasitor/resistor dengan induktor dan kapasitor yang dirangkai seri ataupun paralel. Untuk mengetahui nilai impedansi (Z) pada rangkaian paralel resistor, induktor, kapasitor pada arus bolak-balik dapat dilakukan dengan cara menghitung nilai reaktansi induktif(X_L), dan reaktansi kapasitif(X_C) dengan menggunakan rumus berikut:

$$X_L = 2 \times \pi \times f \times l \dots\dots\dots (2.11)$$

Rumus reaktansi kapasitif(X_C):

$$X_C = 2 \times \pi \times f \times c \dots\dots\dots (2.12)$$

Dimana :

X_L = Reaktansi induktif (Ω)

X_C = Reaktansi kapasitif (Ω)

π = 3.14 atau 22/7

F = Frekuensi (Hz)

L = Nilai induktansi pada induktor (H)

C = Nilai kapasitas pada kapasitor (F)

Jika nilai kedua reaktansi sudah diketahui, maka selanjutnya dapat menghitung nilai impedansi (Z) pada rangkaian parallel resistor, induktor, dan kapasitor menggunakan rumus berikut :



$$Z = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C}\right)^2}} \dots\dots\dots (2.13)$$

Dimana :

Z = Impedansi (Ω)

R = Nilai hambatan atau resistansi pada resistor (Ω)

X_L = Reaktansi induktif (Ω)

X_C = Reaktansi kapasitif (Ω)

Nilai tegangan (V) pada rangkaian tersebut dapat dihitung dengan menggunakan rumus yang berasal dari hasil substitusi rumus hukum ohm :

$$Z = \frac{V_N}{I_N} \dots\dots\dots (2.14)$$

Dimana :

V_N = Tegangan nominal (V)

I_N = Arus nominal (A)

Dan faktor daya cos phi dapat diketahui dengan rumus :

$$\cos \phi = \frac{R}{Z} \dots\dots\dots (2.15)$$

Yang merupakan pecahan dari rumus :

$$Z = Z \times \cos\theta + jZ \times \sin\theta \dots\dots\dots (2.16)$$

Dimana :

R = Nilai hambatan atau resistansi pada resistor (Ω)

Z = Impedansi (Ω)

2.6 Sistem Eksitasi Pada Generator Sinkron

Eksitasi atau penguatan medan merupakan bagian yang penting dari sebuah generator sinkron. Tidak hanya untuk menjaga tegangan terminal tetap konstan tetapi juga harus merespon terhadap perubahan beban yang tiba-tiba. Eksitasi pada generator sinkron adalah pemberian arus searah pada belitan medan yang terdapat pada rotor. Sesuai dengan prinsip elektromagnet, apabila suatu konduktor yang berupa kumparan yang dialiri listrik arus searah maka kumparan tersebut akan menjadi magnet sehingga akan menghasilkan fluks-fluks magnet. Apabila kumparan medan yang telah diberi arus eksitasi diputar dengan kecepatan



tertentu, maka kumparan jangkar yang terdapat pada stator akan terinduksi oleh fluks-fluks magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan sehingga akan menghasilkan tegangan bolak-balik. Besarnya tegangan yang dihasilkan tergantung kepada besarnya arus eksitasi dan putaran yang diberikan pada rotor. Semakin besar arus eksitasi dan putaran, maka akan semakin besar tegangan yang dihasilkan oleh sebuah generator.

Sistem ini merupakan sistem yang vital pada proses pembangkitan listrik. Pada perkembangannya, sistem eksitasi pada generator listrik ini dapat dibedakan menjadi 2 macam, yaitu :

1. Sistem eksitasi dengan menggunakan sikat (*brush excitation*).
2. Sistem eksitasi tanpa sikat (*brushless excitation*).

Sistem eksitasi mempunyai berbagai fungsi. Fungsi tersebut antara lain :

- a. Mengatur tegangan keluaran generator agar tetap konstan (stabil).
- b. Mengatur besarnya daya reaktif.
- c. Menekan kenaikan tegangan pada pelepasan beban (*load rejection*).

Karena mempunyai fungsi seperti di atas maka sistem eksitasi harus mempunyai sifat antara lain :

- a. Mudah dikendalikan.
- b. Dapat mengendalikan dengan stabil/ sifat pengendalian stabil.
- c. Mempunyai respon/tanggapan yang cepat.
- d. Tegangan yang dikeluarkan harus sama dengan tegangan yang diinginkan.

Sistem yang banyak digunakan saat ini baik dengan generator sinkron tipe kutub sepatu (*salient pole*) maupun tipe rotor silinder (*non-salient pole*) adalah sistem tanpa sikat. Pengeksitasi ac mempunyai jangkar yang berputar, keluarannya kemudian disearahkan oleh penyearah dioda silikon yang juga dipasang pada poros utama.

Keluaran yang telah disearahkan dari pengeksitasi ac, diberikan langsung dengan hubungan yang diisolasi sepanjang poros ke medan generator sinkron yang berputar. Keluaran dari pengeksitasi ac, dan berarti tegangan yang dibangkitkan oleh generator sinkron, dapat dikendalikan dengan mengubah

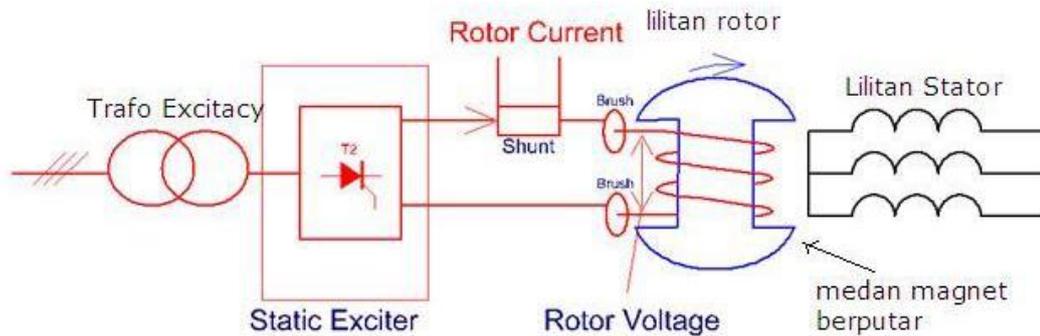


kekuatan medan pengeksitasi ac. Jadi sistem eksitasi tanpa sikat tidak mempunyai komutator, cincin-slip atau sikat-sikat yang sangat menyederhanakan pemeliharaan mesin.

Setelah generator ac mencapai kepesatan yang sebenarnya oleh penggerak mulanya, medannya dieksitasi dari catu dc. Ketika kutub lewat di bawah konduktor jangkar yang berada pada stator, fluksi medan yang memotong konduktor menginduksikan ggl kepadanya. Ini adalah ggl bolak-balik, karena kutub dengan polaritas yang berubah-ubah terus-menerus melewati konduktor tersebut. Karena tidak menggunakan komutator, ggl bolak-balik yang dibangkitkan keluar pada terminal lilitan stator. Besarnya ggl yang dibangkitkan bergantung pada laju pemotongan garis gaya; atau dalam hal generator, besarnya ggl bergantung pada kuat medan dan kepesatan konstan, maka besarnya ggl yang dibangkitkan menjadi bergantung pada eksitasi medan. Ini berarti bahwa besarnya ggl yang dibangkitkan dapat dikendalikan dengan mengatur besarnya eksitasi medan yang dikenakan pada medan generator.

2.6.1 Sistem eksitasi dengan sikat

Pada sistem eksitasi menggunakan sikat, sumber tenaga listriknya berasal dari generator arus searah (DC) atau generator arus bolak balik (AC) yang disearahkan terlebih dahulu dengan menggunakan *rectifier*. Jika menggunakan sumber listrik listrik yang berasal dari generator AC atau menggunakan *permanent magnet generator* (PMG), medan magnetnya adalah magnet permanen. Untuk mengalirkan arus eksitasi dari eksiter utama ke rotor generator, menggunakan slip ring dan sikat arang, demikian juga penyaluran arus yang berasal dari *pilot exciter* ke *main exciter*.



Gambar 2.7 Sistem Eksitasi dengan Sikat (*Brush Excitation*)¹¹

1) Prinsip kerja pada sistem eksitasi dengan sikat (*brush excitation*)

Generator penguat yang pertama, adalah generator arus searah hubungan paralel yang menghasilkan arus penguat bagi generator penguat kedua. Generator penguat (*exciter*) untuk generator sinkron merupakan generator utama yang diambil dayanya.

Pengaturan tegangan pada generator utama dilakukan dengan mengatur besarnya arus eksitasi (arus penguatan) dengan cara mengatur potensiometer atau tahanan asut. Potensiometer atau tahanan asut mengatur arus penguat generator pertama dan generator penguat kedua menghasilkan arus penguat generator utama.

Dengan cara ini arus penguat yang diatur tidak terlalu besar nilainya (dibandingkan dengan arus generator penguat kedua) sehingga kerugian daya pada potensiometer tidak terlalu besar. PMT arus penguat generator utama dilengkapi tahanan yang menampung energi medan magnet generator utama karena jika dilakukan pemutusan arus penguat generator utama harus dibuang ke dalam tahanan.

Sekarang banyak generator arus bolak-balik yang dilengkapi penyearah untuk menghasilkan arus searah yang dapat digunakan bagi penguatan generator utama sehingga penyaluran arus searah bagi penguatan generator utama, oleh generator penguat kedua tidak memerlukan cincin geser karena penyearah ikut berputar bersama poros generator.

¹¹ Eksitasi Generator, <https://scinticalengineering.wordpress.com/kuliah/mesin-eletrik/mesin-ac/eksitasi-generator/>, diakses 1 Mei 2021



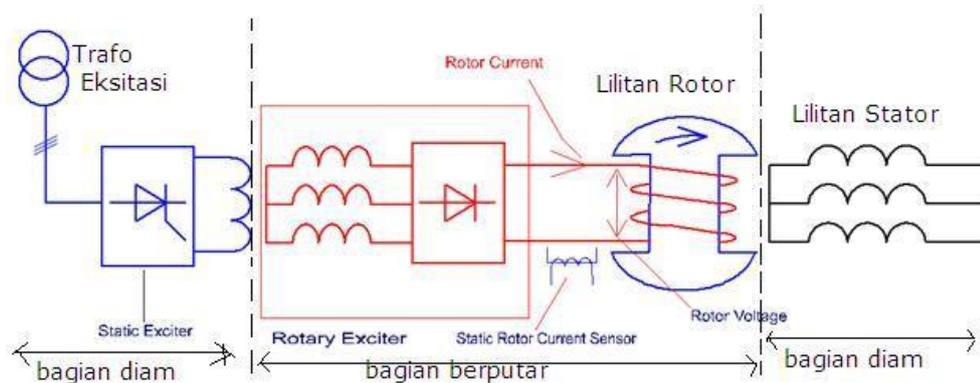
Cincin geser digunakan untuk menyalurkan arus dari generator penguat pertama ke medan penguat generator penguat kedua. Nilai arus penguatan kecil sehingga penggunaan cincin geser tidak menimbulkan masalah.

Pengaturan besarnya arus penguatan generator utama dilakukan dengan pengatur tegangan otomatis supaya nilai tegangan klem generator konstan. Perkembangan sistem eksitasi pada generator sinkron dengan sistem eksitasi tanpa sikat, karena sikat dapat menimbulkan loncatan api pada putaran tinggi. Untuk menghilangkan sikat digunakan dioda berputar yang dipasang pada jangkar.

2.6.2 Sistem eksitasi tanpa sikat (*brushless excitation*)

Penggunaan sikat atau slip ring untuk menyalurkan arus eksitasi ke rotor generator mempunyai kelemahan karena besarnya arus yang mampu dialirkan pada sikat arang relatif kecil. Untuk mengatasi keterbatasan sikat arang, digunakan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (*brushless excitation*). Keuntungan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (*brushless excitation*), antara lain adalah:

- Energi yang diperlukan untuk eksitasi diperoleh dari poros utama (*main shaft*), sehingga keandalannya tinggi.
- Biaya perawatan berkurang karena pada sistem eksitasi tanpa sikat tidak terdapat sikat, komutator dan *slip ring*.
- Pada sistem eksitasi tanpa sikat (*brushless excitation*) tidak terjadi kerusakan isolasi karena melekatnya debu karbon pada *farnish* akibat sikat arang.
- Mengurangi kerusakan akibat udara buruk sebab semua peralatan ditempatkan pada ruang tertutup.
- Selama operasi tidak diperlukan pengganti sikat, sehingga meningkatkan keandalan operasi dapat berlangsung terus pada waktu yang lama.



Gambar 2.8 Sistem Eksitasi Tanpa Sikat (*Brushless Excitation*)¹²

1) Prinsip kerja sistem eksitasi tanpa sikat (*brushless excitation*)

Generator penguat pertama disebut *pilot exciter* dan generator penguat kedua disebut *main exciter* (penguat utama). *Main exciter* adalah generator arus bolak-balik dengan kutub pada statornya. Rotor menghasilkan arus bolak-balik disearahkan dengan dioda yang berputar pada poros *main exciter* (satu poros dengan generator utama). Arus searah yang dihasilkan oleh dioda berputar menjadi arus penguat generator utama. *Pilot exciter* pada generator arus bolak-balik dengan rotor berupa kutub magnet permanen yang berputar menginduksi pada lilitan stator. Tegangan bolak-balik disearahkan oleh penyearah dioda dan menghasilkan arus searah yang dialirkan ke kutub-kutub magnet yang ada pada stator *main exciter*. Besar arus searah yang mengalir ke kutub *main exciter* diatur oleh pengatur tegangan otomatis (*automatic voltage regulator/AVR*). Besarnya arus berpengaruh pada besarnya arus yang dihasilkan oleh *main exciter*, maka besarnya arus *main exciter* juga mempengaruhi besarnya tegangan yang dihasilkan oleh generator utama.

Pada sistem eksitasi tanpa sikat, permasalahan timbul jika terjadi hubung singkat atau gangguan hubung tanah di rotor dan jika ada sekering lebur dari dioda berputar yang putus, hal ini harus dapat dideteksi. Gangguan pada rotor

¹² Eksitasi Generator, <https://scitricaleengineering.wordpress.com/kuliah/mesin-eletrik/mesin-ac/eksitasi-generator/>, diakses 1 Mei 2021



yang berputar dapat menimbulkan distorsi medan magnet pada generator utama dan dapat menimbulkan vibrasi (getaran) berlebihan pada unit pembangkit.

2) **Bagian utama sistem eksitasi tanpa sikat (*brushless excitation*)**

Bagian-bagian utama dari sistem eksitasi tanpa sikat antara lain :

a. *Permanent Magnet Generator* (PMG)

Permanent Magnet Generator (PMG) adalah generator sinkron yang sistem eksitasinya menggunakan magnet permanen pada rotornya. Pada sistem eksitasi tanpa sikat digunakan PMG sebagai penyedia daya untuk eksitasi AC exciter/main exciter dan komponen regulator. PMG terdiri dari magnet permanen berputar dan jangkar yang diam dililit untuk output 3 fasa.

PMG berputar seiring dengan berputarnya rotor. PMG sebagai pembangkit tegangan/arus AC yang disearahkan kemudian dimasukkan pada AVR (*Automatic Voltage Regulator*) untuk dikontrol. Karena tegangan/arus AC pada PMG sangat kecil, arus AC yang sudah disearahkan dimasukkan pada eksiter untuk membangkitkan tegangan AC yang lebih besar. Arus AC keluaran eksiter disearahkan oleh *rotating diode* untuk memberikan arus eksitasi pada rotor, sehingga pada rotor terdapat medan magnet.

Medan magnet tersebut menabrak kumparan – kumparan pada stator yang menghasilkan fluks listrik. Sehingga dari situ didapatkan tegangan keluaran yang dihasilkan oleh generator tersebut. Hal tersebut terjadi berulang-ulang setiap generator beroperasi. Sehingga tidak diperlukan sumber tegangan DC untuk eksitasi pada generator ini. Keluaran generator tersebut diambil melalui stator karena lebih mudah mengambil tegangan pada bagian yang diam dari pada mengambil tegangan pada bagian yang berputar (rotor).



Gambar 2.9 *Permanent Magnet Generator*¹³

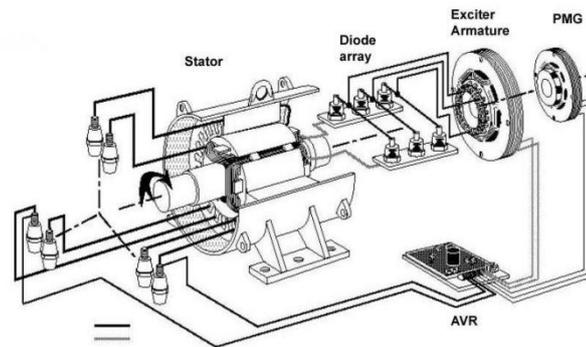
b. *AC Exciter*

AC exciter adalah jenis yang sama dengan generator sinkron konvensional. Rotor *AC exciter* ditempatkan pada poros yang sama dengan *rotating rectifier*. *AC exciter* sendiri mendapatkan eksitasi pada statornya dari PMG setelah disearahkan dalam AVR. Penggunaan *AC exciter* ini bertujuan untuk memperbesar arus eksitasi agar bisa digunakan untuk mengeksitasi generator utama, setelah disearahkan dulu oleh *rotating rectifier*.

c. *Rotating Rectifier*

Rotating rectifier terdiri dari dioda silikon, fuse dan resistor. Bagian ini merupakan bagian yang digunakan untuk menyearahkan arus yang akan menuju ke rotor generator utama sebagai arus eksitasi. Berdasarkan fungsi kerjanya, ada 2 rangkaian penyearah yang digunakan pada *brushless exciter*, yaitu penyearah statis dan penyearah berputar. Karena kumparan medan generator utama terletak pada rotor, maka dioda ikut berputar dengan poros generator sehingga disebut *rotating rectifier*.

¹³ Yaskawa, "Permanent Magnet Generators", <https://theswitch.com/wind-power/permanent-magnet-generators/>, diakses pada 1 Mei 2021



Gambar 2.10 Rotor, kumparan AC *exciter*, *rotating diode* dan PMG yang terletak satu poros¹⁴

d. *Automatic Voltage Regulator*

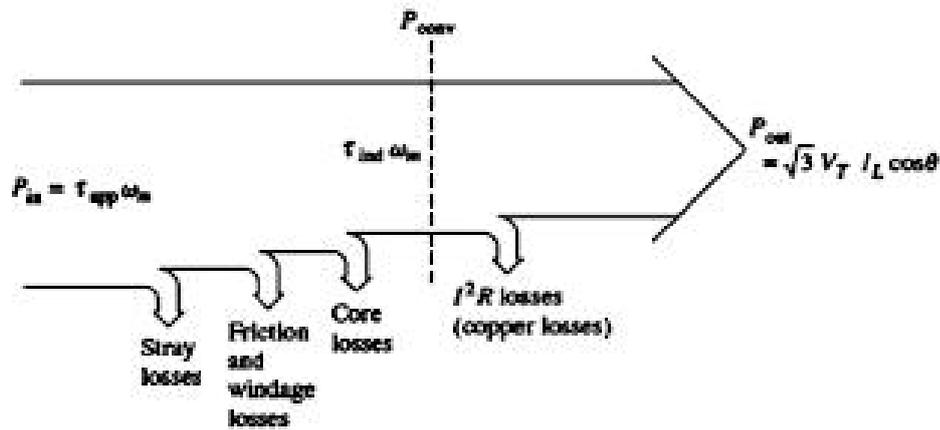
AVR merupakan bagian yang sangat penting dalam pengaturan arus eksitasi generator. Arus keluaran dari PMG disearahkan dan diatur besarnya di AVR.

Unit AVR (*Automatic Voltage Regulator*) berfungsi untuk menjaga agar tegangan generator tetap konstan dengan kata lain generator akan tetap mengeluarkan tegangan yang selalu stabil tidak terpengaruh pada perubahan beban yang selalu berubah-ubah dikarenakan beban sangat mempengaruhi tegangan output generator. Prinsip kerja dari AVR adalah mengatur arus penguatan pada eksiter. Apabila tegangan output generator di bawah tegangan nominal tegangan generator maka AVR akan memperbesar arus penguatan (*excitation*) pada eksiter. Dan juga sebaliknya apabila tegangan output generator melebihi tegangan nominal generator maka AVR akan mengurangi arus penguatan (*excitation*) pada eksiter.

¹⁴ R. Ananta Wikrama, Cara Kerja Generator Listrik Brushless dengan Menggunakan PMG (Permanent Magnet Generator), https://www.academia.edu/7053811/CARA_KERJA_GENERATOR_LISTRIK_BRUSHLESS_DENGAN_MENGGUNAKAN_PMG_PERMANENT_MAGNET_GENERATOR, diakses pada 1 Mei 2021

2.7 Rugi-rugi Daya Pada Generator

Rugi-rugi total yang terjadi pada generator sinkron terdiri dari rugi-rugi tembaga, rugi besi, dan rugi mekanik yang dapat diperhatikan pada gambar diagram dibawah ini :



Gambar 2.11 Diagram Rugi-rugi pada Generator Sinkron¹⁵

Dimana tidak semua tenaga mekanik akan menjadi tenaga elektrik keluaran pada generator. Perbedaan antara daya keluaran dan daya masukan diwakilkan oleh rugi-rugi pada generator. Gambar 2.13 diatas menjelaskan tentang rugi-rugi tersebut. Dimana daya converter dari mekanik ke listrik akan diberikan dengan rumus sebagai berikut :

$$P_{conv} = P_a = 3 \cdot E_0 \cdot I_a \dots\dots\dots (2.17)^{16}$$

Dimana perbedaan antara daya masukan generator dan daya converter pada generator adalah dimana daya converter mewakili rugi-rugi mekanik, rugi inti, dan rugi *stray* pada generator sinkron yang konstan dan tidak terpengaruh terhadap beban yang ada.

1) Rugi Panas

Rugi panas(listrik) dikenal juga dengan rugi tembaga yang terdiri dari kumparan armatur, kumparan medan. Rugi – rugi tembaga ditemukan pada semua belitan pada mesin, dihitung berdasarkan pada tahanan dc dari lilitan pada suhu

¹⁵ Stephen J Chapman, Electric Machinery and fundamentals, hlm. 201.

¹⁶ Stephen J Chapman, Electric Machinery and fundamentals, hlm. 206.



75°C dan tergantung pada tahanan efektif dari lilitan pada fluks dan frekuensi kerjanya. Rugi kumparan armatur ($P_{ar} = I_a^2 \cdot R_a$) sebesar sekitar 30 sampai 40% dari rugi total pada beban penuh. Sedangkan rugi kumparan medan shunt ($P_{sh} = I_{sh}^2 \cdot R_{sh}$) bersama – sama dengan kumparan medan seri ($P_{sr} = I_{sr}$) sebesar sekitar 20 sampai 30% dari rugi beban penuh.

Sangat berkaitan dengan rugi I^2R adalah rugi – rugi kontak sikat pada cincin slip dan komutator, rugi ini biasanya diabaikan pada mesin induksi dan mesin serempak, dan pada mesin dc jenis industri tegangan jatuh pada sikat dianggap tetap sebesar 2V keseluruhannya jika dipergunakan sikat arang dan grafit dengan shunt.

2) Rugi Besi

Rugi besi disebut juga rugi magnetik yang terdiri dari histerisis dan rugi arus pusar atau arus eddy yang timbul dari perubahan kerapatan fluks pada besi mesin dengan hanya lilitan peneral utama yang diberi tenaga pada generator sinkron rugi ini dialami oleh besi armatur, meskipun pembentukan pulsa fluks yang berasal dari mulut celah akan menyebabkan rugi pada besi medan juga, terutama pada sepatu kutub atau permukaan besi medan. Rugi ini biasanya data diambil untuk suatu kurva rugi – rugi besi sebagai fungsi dari tegangan armatur disekitar tegangan ukuran. Maka rugi besi dalam keadaan terbebani ditentukan sebagai harga pada suatu tegangan yang besarnya sama dengan tegangan ukuran yang merupakan perbedaan dari jatuhnya tahanan ohm armatur pada saat terbebani. Rugi histerisis (P_h) dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan empiris yang besarnya adalah :

$$P_h = \eta h \cdot B_{max}^{1.6} \cdot f \cdot v \text{ (watt)} \dots \dots \dots (2.18)^{17}$$

Dimana :

ηh = koefisien steinmetz histerisis. Perhatikan tabel 2.1 tentang nilai ηh dari bermacam – macam bahan baja .

B = kerapatan flux (Wb/m^2)

¹⁷ Yon Riyono, Dasar Teknik Tenaga Listrik, hlm. 143.



v = volume inti (m^3)

f = frekuensi (Hz)

Tabel 2.1 Nilai Koefisien Steinmentz Histeris

Bahan	$\eta_h(\text{joule/m}^3)$
Sheet steel	502
Silicon steel	191
Hard Cast steel	7040
Cast steel	750 - 3000
Cast iron	2700 - 4000

Dari persamaan, besar koefisien steinmentz histerisis, kerapatan flux dan volume inti adalah konstan sehingga nilai rugi histerisis adalah merupakan fungsi dari frekuensi atau ditulis ;

$$P_h = F(f) \dots \dots \dots (2.19)$$

Jadi makin besar frekuensi sinyal tegangan output makin besar rugi histerisis yang diperoleh.

Adapun rugi arus pusar atau rugi arus eddy tergantung kuadrat dari kerapatan fluks, frekuensi dan ketebalan dari lapisan pada kedaan mesin normal besarnya adalah:

$$P_e = k \cdot B_{\max} \cdot f^2 \cdot t^2 \cdot V \dots \dots \dots (2.20)$$

Dimana :

k = konstanta arus pusar yang tergantung pada ketebalan laminasi masing-masing lempengan dan volume inti armatur. Oleh karena nilai k dan b adalah konstan, maka besar kecilnya rugi arus pusar adalah tergantung pada nilai frekuensi kuadrat atau ditulis :

$$P_e = Ff^2 \dots \dots \dots (2.21)$$

Besar rugi besi adalah sekitar 20 sampai 30% dari rugi total pada beban penuh.



3) Rugi Mekanik

Rugi mekanik terdiri dari :

- 1) Rugi gesek yang terjadi pada pergesekan sikat dan sumbu. Rugi ini dapat diukur dengan menentukan masukan pada mesin yang bekerja pada kecepatan yang semestinya tetapi tidak diberi beban dan tidak diteral.
- 2) Rugi angin (windage loss) atau disebut juga rugi buta (stray loss) akibat adanya celah udara antara bagian rotor dan bagian stator. Besar rugi mekanik sekitar 10 sampai 20% dari rugi total pada beban penuh.

2.8 Arus Rotor (*Field Current*)

Rugi-rugi belitan akhir dan belitan terselubung maksimum per satuan volume didapatkan besaran rugi-rugi maksimum tembaga :

$$P_{cu,s} = I_s^2 \times R_s \dots\dots\dots (2.22)$$

$$I_s = \frac{\sqrt{P_{cu,s}}}{R_s}$$

Dimana :

$P_{cu,s}$ = Rugi-rugi tembaga rotor (watt)

I_s = Arus medan maksimum (ampere)

R_s = Resistansi belitan medan (ohm)

2.9 Arus Stator (*Armatur Current*)

Oleh karena pemanasan rotor sama dengan pemanasan stator maka persamaan pembatasnya pun mempunyai bentuk yang sama yaitu :

$$P_{cu,r} = 3 \cdot I_a^2 \times R_a \dots\dots\dots (2.23)$$

Dan tegangan tembaga per phase untuk generator adalah :

$$V_t = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots (2.24)$$

Dimana :

$P_{cu,r}$ = Rugi-rugi belitan maksimum armatur (watt)



I_a = Arus armatur maksimum (ampere)

I_L = Arus pada tembaga/line (ampere)

R_a = Resistansi belitan armatur (ohm)

2.10 Menghitung Efisiensi Generator

Efisiensi generator adalah perbandingan antara daya output dengan daya input. Seperti halnya dengan mesin- mesin listrik lainnya, maupun transformator, maka efisiensi generator sinkron dapat dituliskan seperti persamaan berikut :

$$\eta(\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.25)^{18}$$

Atau,

$$\eta(\%) = \frac{P_{out}}{P_{out} + \Sigma R_{ugi-rugi}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.26)^{19}$$

Dimana :

$$\Sigma R_{ugi-rugi} = (R_{ugi\ tembaga}) \dots \dots \dots (2.27)$$

Keterangan:

P_{out} = Daya keluaran generator (MW)

P_{in} = Daya masukan generator/daya keluaran turbin (MW)

ΣR_{ugi} = Total Rugi-rugi daya (MW)

Rugi variabel = Rugi Tembaga = Rugi listrik ($3 \cdot I_a^2 \cdot R_a$)

2.11 MATLAB

2.11.1 Pengertian MATLAB

Matlab merupakan singkatan dari *matrix laboratory*, dimana Matlab merupakan perangkat lunak atau *software* untuk komputasi teknis dan saintifik. Matlab merupakan integrasi komputasi, visualisasi dan pemrograman yang mudah digunakan. Sehingga Matlab banyak digunakan sebagai :

- Kalkulator, ketika bertindak sebagai kalkulator, Matlab memberikan hasil seketika setelah perintah operasi diberikan.

¹⁸ Prih Sumardjati, Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik Jilid3, hlm. 404.

¹⁹ Juhari, Generator Kleas XI Kemendikbud, hlm. 31.



- b. Bahasa Pemrograman, Matlab yang merupakan bahasa pemrograman tingkat tinggi berbasis pada matriks sering digunakan untuk teknik komputasi numerik, yang digunakan untuk menyelesaikan masalah-masalah yang melibatkan operasi matematika elemen, matrik, optimasi, aproksimasi dan lain-lain. Sehingga Matlab banyak digunakan pada :
- Matematika dan Komputansi.
 - Pengembangan dan Algoritma.
 - Pemrograman modeling, simulasi dan pembuatan prototipe.
 - Analisa data, eksplorasi dan visualisasi.
 - Analisis numerik dan statistik.
 - Pengembangan aplikasi teknik

Adapun macam-macam operasi yang dapat dilakukan oleh Matlab adalah sebagai berikut :

- a. Skalar : berupa bilangan real atau kompleks.
- b. Matriks dan Vektor : dengan elemen bidang real atau kompleks.
- c. Teks : pengolahan data.

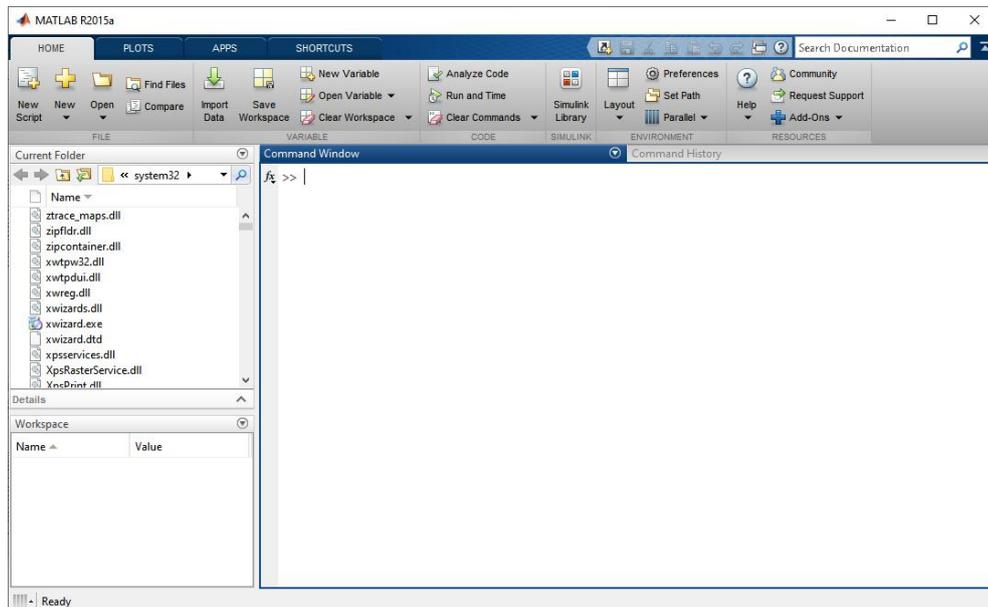
Tabel 2.2 Simbol Operasi Aritmatika²⁰

Operasi Aritmetika	Simbol	Contoh
Penjumlahan	+	$6 + 3 = 9$
pengurangan	-	$6 - 3 = 3$
Perkalian	*	$6 * 3 = 18$
Pembagian kanan	/	$6/3 = 2$
Pemabgian kiri	\	$6 \setminus 3 = 3/6 = 1/2$
Eksponensial	^	$6^3(6^3 = 216)$

2.11.2 *Window-window* pada Matlab

Ada beberapa macam window yang tersedia dalam Matlab yang merupakan *window* untuk memulai penggunaan Matlab.

²⁰ Rao V. Dukkupati, *Analysis and Design of Control System Using MATLAB*,(USA : New Age Science, 2009), hlm.28.



Gambar 2.12 Tampilan awal pada MATLAB

Adapun beberapa macam *window* pada matlab diantaranya :

a. *Command Window*

Pada *command window*, semua perintah matlab dituliskan dan dieksekusi. Kita dapat menuliskan perintah perhitungan sederhana, memanggil fungsi, mencari informasi tentang sebuah fungsi dengan aturan penulisannya (*help*), demo program, dan sebagainya.

Setiap penulisan perintah selalu diawali dengan prompt '>>'. Misal, mencari nilai sin 90, maka pada *command window* kita dapat mengetikkan seperti pada gambar 2.11 :



Gambar 2.13 Tampilan *Comman Window*



b. *Command History*

Pada *Command History* berisi informasi tentang perintah yang pernah dituliskan sebelumnya. Kita dapat mengambil kembali perintah dengan menekan tombol panah ke atas atau mengklik perintah pada jendela histori, kemudian melakukan copy-paste ke command window.

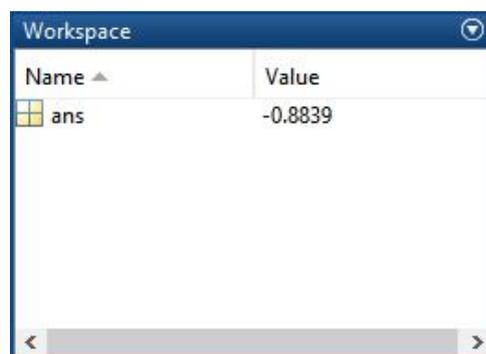
```

Editor: Command History
%-- 22 Apr 2021 13:54 --%
clc
sin(90)
cos(210)
clc
disp('= APLIKASI KOMPUTER PADA SISTEM TENAGA LISTRIK =');
disp('=====');
disp('Nama : Heni Sintia =');
disp('NIM : 0618-3031-0173 =');
disp('Kelas : 5-LB =');
disp('Tanggal : 24 Desember 2020 =');
disp('Program : Menu Pilihan Bangun Ruang =');
disp('=====');
disp(' ');
disp('=====');
disp('Mencari Luas dan Volume');
disp('1. KUBUS ');
disp('2. BALOK ');
disp('3. LIMAS SEGI EMPAT ');
disp('4. TABUNG ');
disp('5. KERUCUT ');
disp('6. BOLA ');
disp('7. PRISMA SEGITIGA ');
disp('8. LIMAS SEGITIGA ');
disp('9. SELESAI ');
disp('=====');
disp('Note = Jika ingin mengulang ke awal silahkan tekan enter');
pilih = input('silahkan masukan pilihan anda = ');
  
```

Gambar 2.14 Tampilan *Command History*

c. *Workspace*

Workspace merupakan *window* data-data yang dibuat pada *Command Window* dengan kata lain *Workspace* berisi informasi pemakaian variabel di dalam memori matlab.

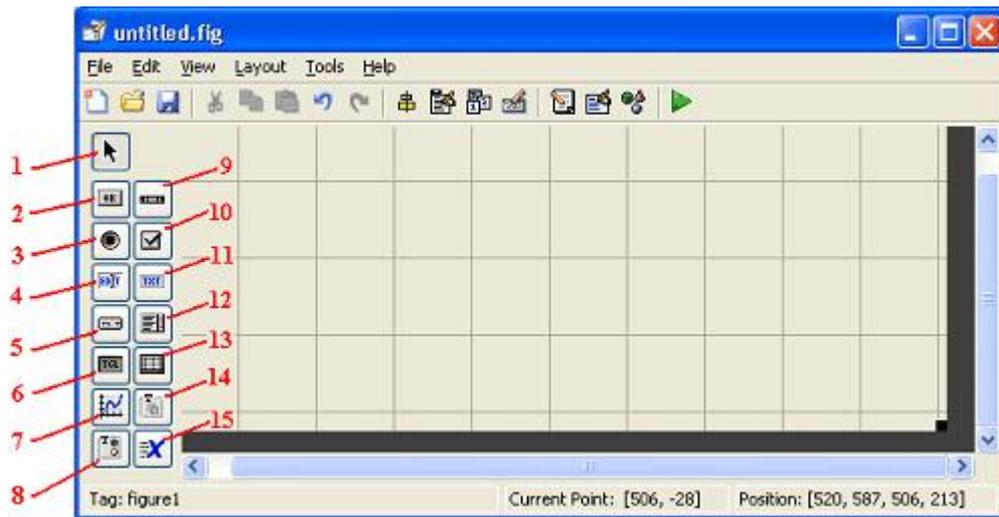


Gambar 2.15 Tampilan *Workspace*



2.11.3 Graphical User Interface (GUI)²¹

GUI atau biasa disebut GUIDE (GUI builder) Matlab merupakan aplikasi display dari MATLAB yang mengandung tugas, perintah, atau komponen program yang mempermudah user (pengguna) dalam menjalankan sebuah program dalam MATLAB



Gambar 2.16 Bagian-bagian *Graphical User Interface*²²

Bagian-bagian GUI MATLAB

1. Selector

Fungsinya sama seperti kursor

2. Push Button

Push Button biasa digunakan untuk menjalankan fungsi yang akan dieksekusi. Saat GUI dijalankan, Push Button di klik untuk menjalankan fungsi tertentu.

3. Radio Button

Radio button digunakan untuk memilih atau menandai pilihan dari beberapa pilihan yang ada (bisa lebih dari satu seperti Check Box).

²¹ Karimariza, Pegenalan GUI Matlab, <http://karimariza.blogspot.com/2017/02/pengenalan-gui-matlab.html>, diakses pada 20 Mei 2021

²² Ibid



4. Edit Text

Edit Text biasa digunakan untuk input data yang dimasukkan ke dalam program.

5. Pop-up Menu

Pop-up Menu biasa digunakan untuk menu atau pilihan. Biasanya diisi lebih dari 1 pilihan.

6. Toggle Button

Toggle button memiliki fungsi yang sama dengan pushbutton. Perbedaannya adalah saat pushbutton ditekan, maka tombol akan kembali pada posisi semula jika tombol mouse dilepas, sedangkan pada toggle button, tombol tidak akan kembali ke posisi semula, kecuali kita menekannya kembali.

7. Axes

Axes berfungsi menampilkan grafik atau gambar (image). Axes tidak masuk dalam UIControl, tetapi dapat diprogram agar pemakai dapat berinteraksi dengan axes dan obyek grafik yang ditampilkan melalui axes.

8. Button Group

Menyatukan beberapa radio button. Jika salah satu radio button dipilih, yang lain otomatis dikosongi.

9. Slider

Slider berfungsi memberi input nilai tanpa menggunakan keyboard, kita dapat mengatur sendiri nilai maksimum, minimum, serta sliderstep. Caranya dengan menggeser slider secara vertical maupun horizontal ke nilai yang diinginkan. Nilai default slider adalah 0 sampai 1.

10. Check Box

Check Box berfungsi menyediakan beberapa pilihan mandiri atau tidak bergantung dengan pilihan-pilihan lainnya.



11. Static Text

Static Text biasa digunakan untuk memberi keterangan pada GUI. Bisa juga digunakan untuk menampilkan output.

12. Listbox

Mirip dengan Pop-up Menu tetapi daftar menu ditampilkan dalam bentuk list.

13. Table

Table berfungsi menampilkan tabel di GUI matlab.

14. Panel

Panel biasa digunakan sebagai background atau tempat mendesain GUI. Bisa juga untuk mengelompokan.

15. ActiveX Control