



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG)

Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) merupakan sebuah pembangkit energi listrik yang menggunakan peralatan mesin turbin gas sebagai penggerak generatornya. Turbin gas dirancang dan dibuat dengan prinsip kerja yang sederhana dimana energi panas yang dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar diubah menjadi energi mekanis dan selanjutnya diubah menjadi energi listrik atau energi lainnya sesuai dengan kebutuhannya. Sistem PLTG menggunakan prinsip siklus *Brayton* yang dibagi atas siklus terbuka dan siklus tertutup. Pada siklus terbuka, fluida kerja adalah udara atmosfer dan pengeluaran panas di atmosfer karena gas buang dari turbin dibuang ke atmosfer.

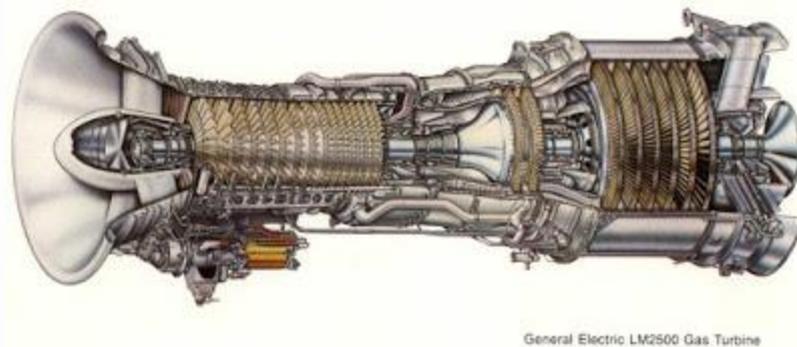
Adapun kekurangan dari turbin gas adalah sifat korosif pada material yang digunakan untuk komponen-komponen turbinnya karena harus bekerja pada temperature tinggi dan adanya unsur kimia bahan bakar minyak yang korosif (*sulfur, vanadium*, dan lain-lain), tetapi dalam perkembangannya pengetahuan material yang terus berkembang hal tersebut mulai dapat dikurangi meskipun tidak dapat secara keseluruhan dihilangkan. Dengan tingkat efisiensi yang rendah hal ini merupakan salah satu dari kekurangan sebuah turbin gas juga dan pada perkembangannya untuk menaikkan efisiensi dapat diatur atau diperbaiki temperature kerja siklus dengan menggunakan material turbin yang mampu bekerja pada temperature tinggi dan dapat juga untuk menaikkan efisiensinya dengan menggabungkan antara pembangkit turbin gas dengan pembangkit turbin uap dan hal ini biasa disebut dengan *combined cycle*.

2.1.1 Bagian-Bagian Pembangkit Listrik Tenaga Gas

1. *Transfer pump*, pompa yang berfungsi untuk memindahkan fluida yang berupa *High Speed Diesel Oil* dari *tank* menuju ruang bakar.



2. Kompresor, mengambil udara atmosfer dan mengubahnya menjadi udara bertekanan tinggi untuk membantu proses pembakaran di ruang bakar. Kompresor terdiri dari *intake air filter*, *Inlet Guide Van (IGV)*, sudu-sudu tetap dan sudu-sudu jalan yang berjumlah 19 *stages*. Adapun fungsinya untuk menarik udara luar masuk ke ruang bakar sebagai proses pembakaran dan media pendingin.
3. *Combustion Chamber*, ruang bakar yang berfungsi sebagai tempat pembakaran bahan bakar pada sistem turbin gas.



Gambar 2.1 Gas Turbin Generator¹⁸

4. Turbin, gas turbin yang berfungsi untuk mengekspansi gas panas hingga menghasilkan energi mekanis untuk menggerakkan generator
5. Generator, berfungsi untuk menghasilkan energi listrik.

2.2 Generator Sinkron Tiga Fasa

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

¹⁸ Anonim , (<http://kumpulanmakalah94.blogspot.com/2015/11/makalaha-pembangkit-listrik-tenaga-gas.html>, diakses pada 19 /5/ 2019, 9:12 pm)



Syarat-Syarat Generator Sinkron :

Bila dua sistem tegangan bolak-balik (AC) akan di paralel, maka kesamaan dari lima kondisi atau parameter berikut ini harus dipenuhi. Kondisi tersebut adalah :

1. Sama Tegangan
2. Sama Frekuensi
3. Sama Perbedaan fasa (sudut fasa)
4. Sama Urutan Fasa
5. Bentuk Gelombang

Menurut *Anderson P.M* (1982), generator sinkron dapat menghasilkan sumber energi, yaitu : tegangan bolak-balik, oleh karena itu generator sinkron disebut juga generator AC. Dikatakan generator 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 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. Fluks putar ini akan memotong kumparan stator, sehingga pada ujung-ujung kumparan stator timbul gaya gerak listrik karena berpengaruh induksi dari fluks putar tersebut. Gaya gerak listrik (ggl) yang timbul pada kumparan stator juga bersifat bolak-balik, atau berputar dengan kecepatan sinkron terhadap kecepatan putar rotor.

Tegangan *output* dari generator sinkron adalah tegangan bolak-balik, karena itu generator sinkron disebut juga generator AC. Perbedaan prinsip antara generator DC dan generator AC adalah untuk generator DC, kumparan jangkar ada pada bagian rotor dan terletak antara kutub-kutub magnet yang tetap ditempat, diputar oleh tenaga mekanik. Pada generator sinkron, konstruksinya sebaliknya, yaitu kumparan jangkar disebut juga kumparan stator karena berada pada tempat yang tetap, sedangkan kumparan rotor bersama-sama dengan kutub magnet diputar oleh tenaga mekanik.



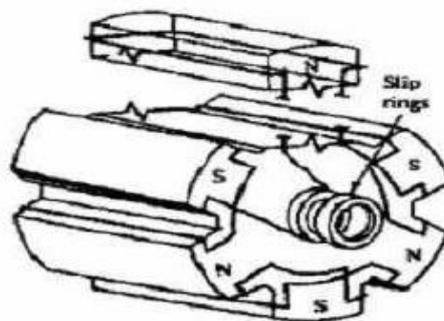
Jika kumparan rotor yang berfungsi sebagai pembangkit kumparan medan magnet yang terletak diantara kutub magnet utara dan selatan. Diputar oleh tenaga air atau tenaga lainnya, maka pada kumparan rotor akan timbul medan magnet atau flux yang bersifat bolak-balik atau flux putar. Flux putar ini akan memotong-motong kumparan stator, sehingga pada ujung-ujung kumparan stator timbul gaya gerak listrik karena pengaruh induksi dari flux putar tersebut.

2.3 Konstruksi Generator Sinkron Tiga Fasa

Menurut *Kundur Prabha* (1993), konstruksi generator sinkron terdiri dari dua bagian utama, yaitu : stator dan rotor. Stator adalah bagian diam yang mengeluarkan tegangan bolak-balik dan rotor adalah bagian bergerak yang menghasilkan medan magnet yang menginduksikan ke stator.

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



Gambar 2.2 Rotor Kutub Sepatu¹⁴

¹⁴ Stephen J.Chapman , *Electric Manhinery and Power System Fundamentals*,2002 ,Hlm. 194.

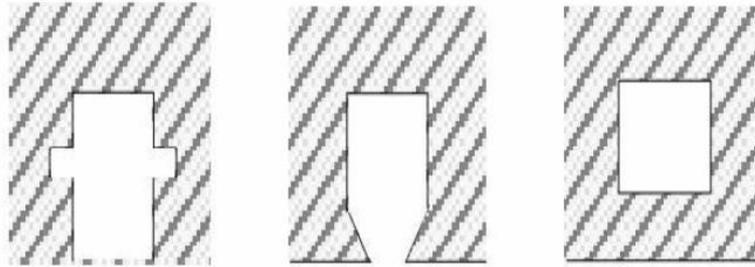


Rotor silinder umumnya digunakan untuk rotor dua kutub dan empat kutub, sedangkan rotor kutub sepatu digunakan untuk rotor dengan empat atau lebih kutub. Pemilihan konstruksi rotor tergantung dari kecepatan putar *primer mover*, frekuensi dan rating daya generator. Generator dengan kecepatan 1500 rpm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

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, oleh karena itu komponen ini juga disebut dengan stator. Lilitan armatur generator dalam bintang (Y) dan titik netral dihubungkan ke tanah. Lilitan dalam bintang (Y) dipilih karena dapat meningkatkan daya *output* dan menghindari tegangan harmonik sehingga *Voltage Line* tetap sinusoidal dalam kondisi beban apapun.

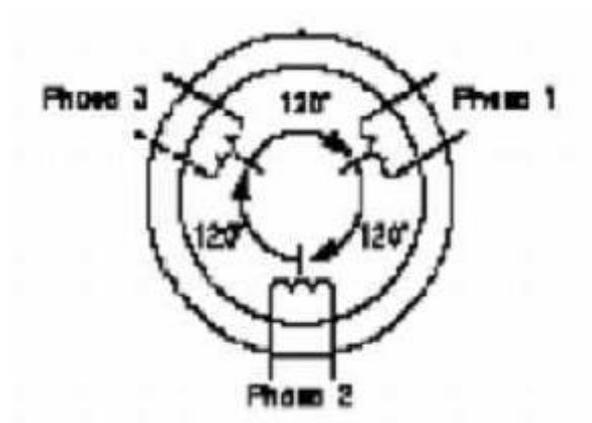
Stator adalah bagian diam yang mengeluarkan tegangan bolak-balik pada generator sinkron yang terdiri dari : rangka stator, inti stator , alur ,gigi stator, serta kumparan stator. Rangka stator merupakan rumah (kerangka) yang menyangga inti jangkar generator. Inti stator terbuat dari laminasi-laminasi baja campuran atau besi magnetik khusus yang terpasang ke rangka stator. Alur (slot) dan gigi stator merupakan tempat meletakkan kumparan stator. Ada tiga bentuk alur stator yaitu : terbuka, setengah terbuka dan tertutup. Ketiga bentuk alur tersebut tampak seperti pada gambar 2.2 Kumparan jangkar biasanya terbuat dari tembaga. Kumparan ini merupakan tempat timbulnya ggl induksi.



Gambar 2.3 Bentuk-Bentuk Alur Stator¹⁶

2.4 Prinsip Kerja Generator

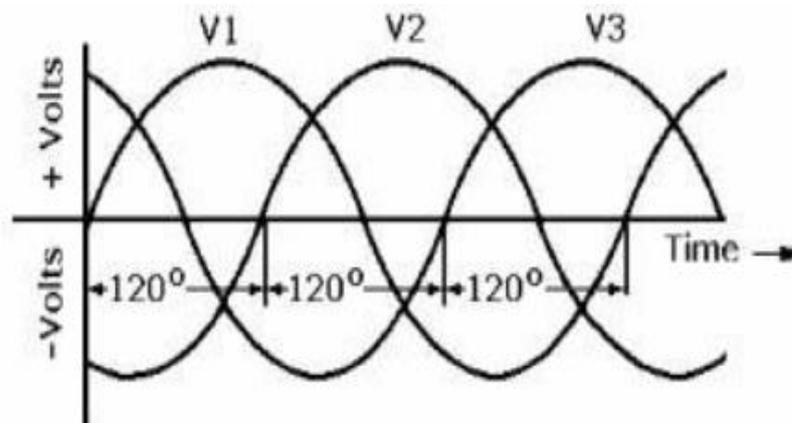
Prinsip dasar generator arus bolak-balik menggunakan hukum Faraday yang menyatakan jika sebatang penghantar berada pada medan magnet yang berubah-ubah, maka pada penghantar tersebut akan terbentuk gaya gerak listrik. Prinsip kerja generator arus bolak-balik tiga fasa (alternator) pada dasarnya sama dengan generator arus bolak-balik satu fasa, akan tetapi pada generator tiga fasa memiliki tiga lilitan yang sama dan tiga tegangan *outputnya* berbeda fasa 120 pada masing-masing fasa. (Kundur Prabha, 1993).



Gambar 2.4 Skema Kumparan Tiga Fasa¹⁷

¹⁶ http://www.4shared.com/photo/qETzGi69/bentuk_alur_stator_generator_s.html, 25/5 2019,9:40 pm

¹⁷ http://dc166.4shared.com/img/oFZWDSwf/preview_html_m1a8cc013.jpg, diakses 17/5/2019 8:55 pm



Gambar 2.5 Grafik Tegangan Generator Sinkron 3 fasa⁷

2.5 Jumlah Kutub Generator

Dalam suatu generator hubungan tertentu antara kecepatan dan putaran (N) dari rotor, frekuensi (f) dari EMF (*Electromotive Force*) atau GGL (Gaya Gerak Listrik) yang dibangkitkan dan jumlah kutub-kutub (P).

Hubungan tersebut adalah :

$$f = P \cdot N / 120 \dots\dots\dots (2.1)^4$$

Dimana :

F = Frekuensi (Hz)

P = jumlah kutub pada generator

N = putaran rotor generator (rpm)

⁷ Neil Sclater, *Electrical Design Details*, 2003, Hlm. 44.

⁴ Kundur Prabha, *Power system stability and control*, 1993, Hlm. 47.



2.6 Karakteristik Generator Sinkron

2.6.1 Generator sinkron keadaan jalan tanpa beban

Dengan memutar generator sinkron 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 :

$$E_o = c.n. \phi \dots\dots\dots (2.2)^{15}$$

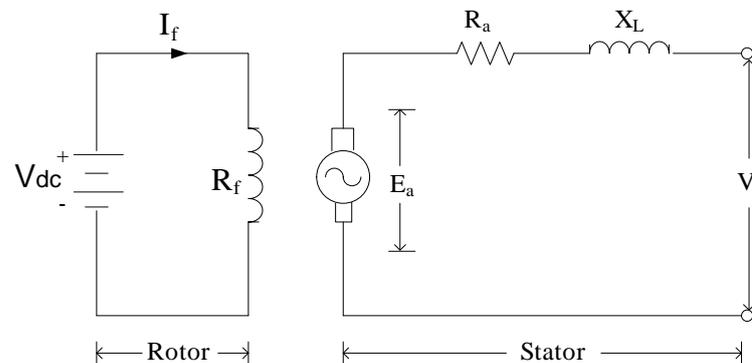
Dimana :

C = konstanta mesin

N = kecepatan putaran (rpm)

ϕ = fluks yang dihasilkan oleh I_f (Wb)

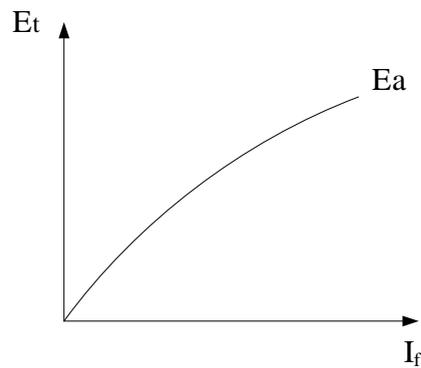
Dalam keadaan tanpa beban arus jangkar tidak mengalir pada stator, karenanya tidak terdapat pengaruh reaksi jangkar. Fluks hanya dihasilkan oleh arus medan (I_f).



Gambar 2.6 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron Tanpa Beban⁹

¹⁵ Zuhail, *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan elektronika daya*, (Jakarta : Gramedia Pustaka Utama, 1988), hlm. 132

⁹ Yon Rijono, op.cit. hlm. 212.



Gambar 2.7 Grafik Hubungan Arus Penguat Medan (I_f) dan E_a ⁹

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

pf = 1

$$E_o = \sqrt{(V_t + I_a R_a)^2 + (I_a X_s)^2} \dots\dots\dots(2.3)$$

pf = tertinggal

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

pf = mendahului

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

Dimana :

E_o = GGL armatur tanpa beban (Volt)

V_t = tegangan terminal *output* per fasa (Volt)

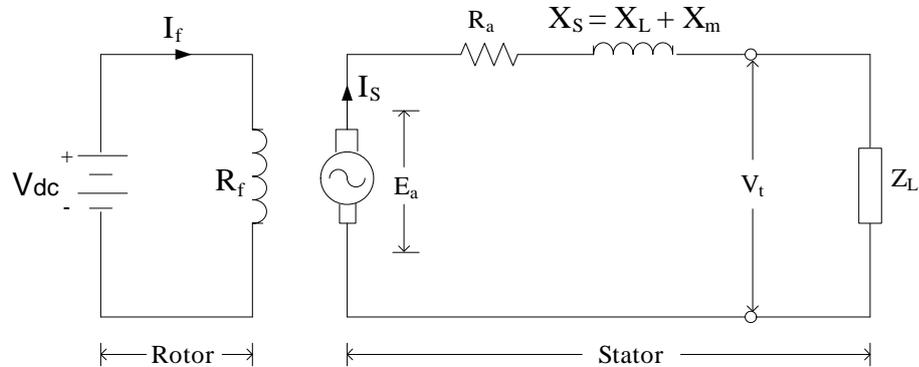
R_a = resistansi jangkar per fasa (ohm)

X_s = reaktansi sinkron per fasa (ohm)

⁹ *ibid.*



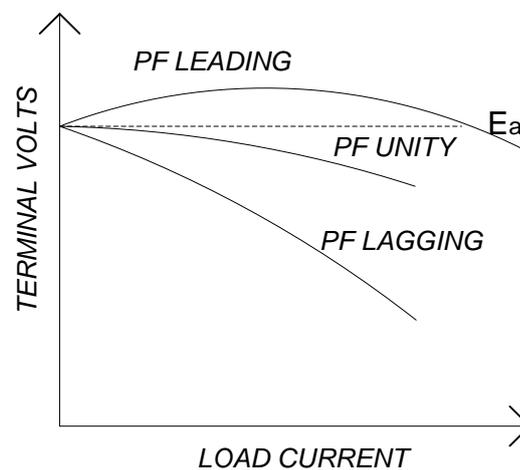
2.6.2 Generator sinkron berbeban



Gambar 2.8 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron Berbeban⁹

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

1. Jatuh tegangan karena resistansi jangkar (R_a).
2. Jatuh tegangan karena reaktansi bocor jangkar (X_L).
3. Jatuh tegangan karena reaksi jangkar.



Gambar 2.9 Karakteristik Generator AC Pada Berbagai Faktor Daya⁹

⁹ Ibid.

⁹ Ibid., hlm. 218.



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

pf = 1

$$E_a = \sqrt{(V_t + I_a R_a)^2 + (I_a X_L)^2} \dots\dots\dots(2.6)$$

pf = tertinggal

$$E_a = \sqrt{(V_t \cos \theta + I_a R_a)^2 + (V_t \sin \theta + I_a X_L)^2} \dots\dots\dots(2.7)$$

pf = mendahului

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

Dimana :

E_a = 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)

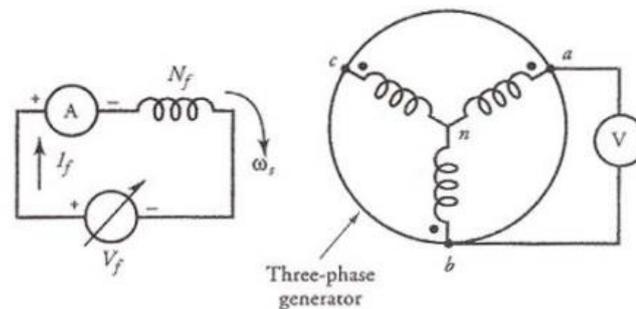
2.7 Tes Generator Sinkron

2.7.1 Tes *Open Circuit*

Tes rangkaian terbuka atau tes tanpa beban dilakukan berdasarkan dengan:

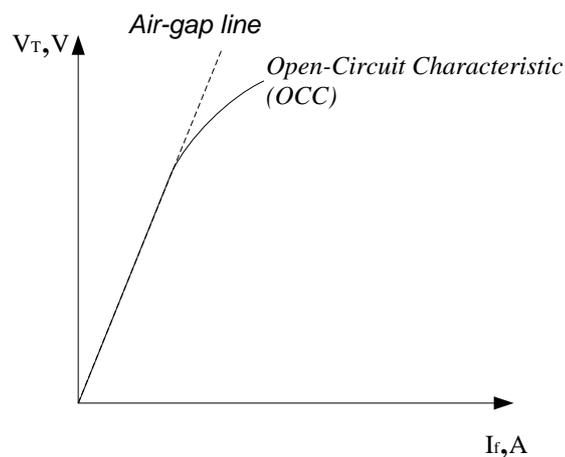
1. Generator diputar dengan kecepatan nominal.
2. Tidak ada beban terhubung pada terminal.
3. Arus medan dinaikkan dari 0 sampai maksimum.
4. Catat nilai tegangan terminal dan arus medan.

Dengan terminal terbuka, $I_A = 0$, sehingga $E_a = V_\phi$. Plot ini disebut *open circuit characteristic* (OCC) atau karakteristik rangkaian terbuka dari generator. Dengan karakteristik ini, adalah mungkin untuk menemukan tegangan internal yang dibangkitkan pada generator untuk berapapun arus medan yang diberikan.



Gambar 2.10 Diagram Rangkaian Tes *Open Circuit*¹¹

Open Circuit Characteristic (OCC) mengikuti sebuah garis lurus yang berhubungan dengan *magnetic circuit* dari generator sinkron yang tidak dibebani. Berhubung dalam daerah yang linear, banyak dari mmf (*magnetic moving force*) hilang oleh *air-gap* (celah udara), garis lurus itu disebut *air-gap line*.



Gambar 2.11 Karakteristik *Open Circuit* Pada Generator¹¹

2.7.2 Tes *Short Circuit*

Tes hubung singkat memberikan informasi tentang kemampuan arus dari generator sinkron. Hal ini dilakukan dengan :

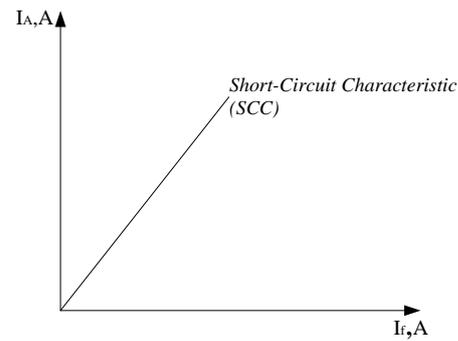
1. Generator diputar pada kecepatan nominal.

¹¹ Shahl, Suad Ibrahim, 2015, *e-book Synchronuous Generator*, hlm. 15.

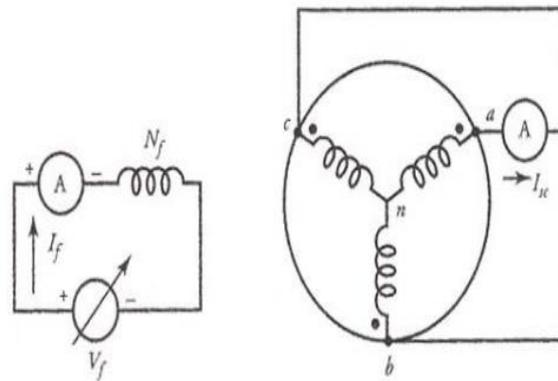
¹¹ Ibid., hlm.16.



2. Atur arus medan ke 0.
3. Hubung singkatkan terminal-terminal.
4. Ukur arus jangkar atau arus line seiring arus medan dinaikkan.



Gambar 2.12 Karakteristik *Short Circuit* Pada Generator¹¹



Gambar 2.13 Rangkaian Untuk Tes Hubung Singkat¹¹

Pada saat terminal-terminal dihubung singkatkan, didapat :

$$I_A = \frac{E_A}{\sqrt{R_A^2 + X_S^2}} \dots\dots\dots (2.9)$$

Dimana :

¹¹ Ibid.

¹¹ Ibid., hlm.17.



I_A = arus jangkar (Ampere)

E_A = GGL pada jangkar (Volt)

R_a = resistansi jangkar per phasa (ohm)

X_S = reaktansi sinkron (ohm)

Dari kedua tes diatas, maka didapat nilai impedansi (E_A dari OCC dan I_A dari SCC) :

$$Z_S = \sqrt{R_A^2 + X_S^2} = \frac{E_A}{I_A} \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana :

Z_S = impedansi sinkron (ohm)

R_a = resistansi jangkar per phasa (ohm)

X_S = reaktansi sinkron (ohm)

I_A = arus jangkar (Ampere)

E_A = GGL pada jangkar (Volt)

2.8 Pengaturan Tegangan Generator

Jika beban ditambahkan pada generator ac yang sedang bekerja pada kecepatan 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)

$$= \frac{\text{tegangan tanpa beban} - \text{tegangan beban penuh}}{\text{tegangan beban penuh}} \times 100 \% \dots\dots\dots(2.11)$$

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).⁵

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.

2.9 Pembebanan Generator

Pembebanan generator ada dua, yaitu generator tanpa beban dan generator berbeban.

2.9.1 Generator Tanpa Beban

Apabila sebuah mesin sinkron difungsikan sebagai alternator dengan diputar pada kecepatan sinkron dan rotor diberi arus medan (I_f), maka pada kumparan jangkar stator akan diinduksikan tegangan tanpa beban (E_O), Adapun Besar ggl induksi kumparan stator atau ggl induksi armatur per fasa adalah :

$$E_a = 4,44 \cdot f \cdot M \cdot \Phi \cdot K_d \dots\dots\dots (2.12)^9$$

Dimana :

E_a = Gaya gerak listrik armatur per-fasa (Volt)

F = Frekuensi *output* generator (Hz)

M = Jumlah kumparan per-fasa

Z = Jumlah konduktor seluruh slot per-fasa

⁵ Lister, *Mesin dan Rangkaian Listrik*, (Jakarta: Erlangga, 1998), hlm. 202.

⁹ Yon Rijono, *Dasar Teknik Tenaga Listrik*, (Yogyakarta : Andi, 1997), Cet. 3, hal. 210.



K_d = Faktor distribusi.

Φ = Fluks magnet per kutub per-fasa

Sehingga persamaan 2.12 dapat juga ditulis

$$E_a = \frac{4,44 \cdot f \cdot Z}{2} \cdot \Phi \cdot K_d \dots\dots\dots (2.13)^9$$

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

2.9.2 Generator Berbeban

Tiga macam sifat beban generator, yaitu : beban resistif, beban induktif, dan beban kapasitif. Akibat pembeban ini akan berpengaruh terhadap tegangan beban dan faktor dayanya. Jika beban generator bersifat resistif mengakibatkan penurunan tegangan relatif kecil dengan faktor daya sama dengan satu. Jika beban generator bersifat induktif terjadi penurunan tegangan yang cukup besar dengan faktor daya terbelakang (lagging). Sebaliknya, Jika beban generator bersifat kapasitif akan terjadi kenaikan tegangan yang cukup besar dengan faktor daya mendahului (leading).

Pada generator sinkron berbeban, maka pada kumparan armatur timbul I_a dan X_m , akibatnya timbul penurunan GGL armatur tanpa beban. menjadi $E_a = E_0 - j I_a X_m$ dan tegangan terminal menjadi (V_t). GGL armatur tanpa beban (E_0) besarnya adalah :

$$\frac{E_0}{ph} = V_t + I_a (R_a + j X_s) \dots\dots\dots (2.14)$$

Atau

$$\frac{E_0}{ph} = V_t + I_a \cdot Z \dots\dots\dots (2.15)^9$$

⁹ Ibid. Hal.211



2.10 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 :

1. Rumus Reaktansi Induktif (X_L) :

$$X_L = 2 \times \pi \times f \times l \dots\dots\dots (2.16)^4$$

2. Rumus Reaktansi Kapasitif (X_C) :

$$X_C = \frac{1}{1} \times \pi \times f \times C \dots\dots\dots (2.17)$$

Dimana :

X_L = Reaktansi induktif (Ω)

X_C = Reaktansi Kapasitif (Ω)

Π = 3.14 atau 22/7

f = Frekuensi (Hz)

L = Nilai induktansi pada inductor (H)

C = Nilai kapasitas pada kapasitor (F)

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

⁹ Ibid. Hal.211

⁴ Kundur Prabha, Power system stability and control, 1993, Hal 87



$$Z = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{X_L}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C}\right)^2}} \dots\dots\dots (2.18)$$

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 :

$$Z = \frac{V}{I} \dots\dots\dots (2.19)^{12}$$

$$Z_s = \sqrt{(R_a)^2 + (X_s)^2} \dots\dots\dots (2.20)^9$$

Dimana :

V = Tegangan listrik pada rangkaian (V)

I = Arus listrik pada rangkaian (A)

R_a = Resistansi jangkar (Ω)

Z_s = Impedansi Sinkron (Ω)

X_s = Reaktansi sinkron (Ω)

Dan faktor daya cos phi dapat diketahui dengan rumus :

$$R = Z \cdot \cos \Phi \dots\dots\dots (2.21)^{19}$$

¹² Sudirham sudharyanto, Analisa Rangkaian Listrik (Jilid-1), Hlm 231

⁹ Yon Rijono, Dasar teknik listrik , hlm 216

¹⁹ (https://www.academia.edu/10658674/Rangkaian_Seri_RL_dan_RC_pada_Rangkaian_Listrik,
diakses 24/5/ 2019 8:26 pm



Yang merupakan pecahan dari rumus :

$$Z = Z \cos \Phi + j Z \sin \Phi \dots\dots\dots(2.22)$$

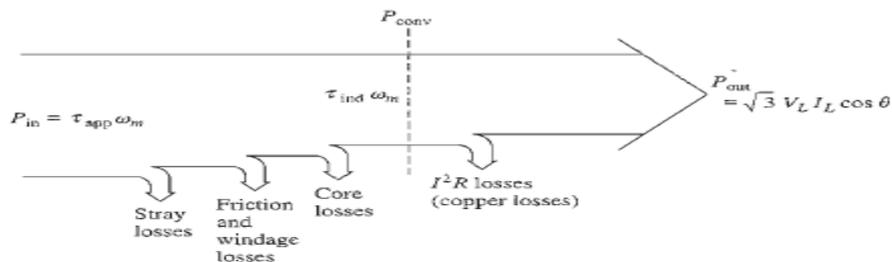
Dimana :

R = Nilai hambatan atau resistansi (Ω)

Z = Nilai impedansi pada rangkaian (Ω)

2.11 Rugi – Rugi Pada Generator Sinkron

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 2.14 Diagram Rugi-Rugi Pada Generator Sinkron¹⁴

Dimana tidak semua tenaga mekanik akan menjadi tenaga elektrik keluaran pada generator. Perbedaan antara daya keluaran dan daya masukan diwakilkan oeh 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 :

$$P_{conv} = P_a = 3 \cdot E_0 \cdot I_a \dots\dots\dots(2.23)^{14}$$

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

¹⁴ Stephen J Chapman, Electric Machinery and fundamentals, Hlm 201

¹⁴ Stephen. J Chapman, Electrical machinery and fundamentals, Hlm 206



2.11.1 Rugi Listrik

Rugi 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 750°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 ($P_{sr} = I_{sr}^2 \cdot R_{sr}$) sebesar sekitar 20 sampai 30% dari rugi beban penuh.

Sangat berkaitan dengan rugi $I^2 \cdot R$ 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 2 V keseluruhannya jika dipergunakan sikat arang dan grafit dengan shunt.

2.11.2 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 :



$$P_h = \eta_h \cdot B_{max}^{1.6} \cdot f \cdot v \text{ (watt)} \dots\dots\dots (2.24)^9$$

Dimana :

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

B = kerapatan flux (Wb/m²)

v = volume inti (m³)

f = frekuensi

Tabel 2.1 Nilai Koefisien Steinmentz Histerisis

Bahan	η_h (joule / m³)
Sheet steel	502
Silicon steel	191
Hard Cast steel	7040
Cast steel	750 – 3000
Cast iron	2700 – 4000

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

$$P_h = F(f) \dots\dots\dots (2.25)^9$$

Jadi makin besar frekuensi sinyal tegangan output makin besar rugi histerisis yang diperoleh. Adapun rugi arus pusar besarnya adalah:

$$P_e = K \cdot B_{max}^2 \cdot f^2 \cdot T^2 \cdot V \text{ (Watt)} \dots\dots\dots (2.26)^9$$

Dimana :

⁹ Yon Riyono, Dasar Teknik Tenaga Listrik, hlm. 143

⁹ Yon Riyono, Dasar Teknik Tenaga Listrik, hlm. 144

⁹ Ibid.



k = konstanta arus pusar yang tergantung pada ketebalan laminasi masing-masing lempengan dan volume inti armature.

Oleh karena nilai k dan B adalah konstan, maka besar kecilnya rugi arus pusar adalah tergantung pada nilai frekuensi kuadrat yang ditulis:

$$P_e = F (f)^2 \dots\dots\dots (2.27)^9$$

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

2.11.3 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 keadaan tanpa beban.

2.12 Arus Rotor (*Field Current*)

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

$$P_{cu,s} = I_s^2 \times R_s \dots\dots\dots (2.28)^{14}$$

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

Dimana :

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

I_s = Arus medan maksimum (ampere)

R_s = Resistansi belitan medan (ohm)

⁹ Ibid.

¹⁴ Stephen J.Chapman, Electric Machinery and Power System Fundamentals, 2002, Hlm 206.



2.13 Arus Stator (*Armature current*)

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

$$P_{cu,r} = 3 \cdot I_a^2 \times R_a \dots\dots\dots (2.29)^{14}$$

Dan tegangan tembaga per phase untuk generator adalah :

$$V_T = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots (2.30)^9$$

Dimana :

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

I_a = Arus armatur maksimum (ampere)

I_L = Arus pada tembaga/ line (ampere)

R_a = Resistansi belitan armatur (ohm)

2.14 Efisiensi Generator

Pada umumnya yang disebut dengan 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 :

$$\eta (\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.31)^{13}$$

Atau,

$$\eta (\%) = \frac{P_{out}}{P_{out} + \Sigma R_{ugi-rugi}} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.32)^1$$

Dimana :

$$\Sigma R_{ugi} = (\text{Rugi variabel} + \text{rugi konstan}) \dots\dots\dots (2.33)$$

¹⁴ Ibid.hlm 216.

⁹ Yon Rijono, Dasar Teknik Tenaga Listrik, hlm 249

¹³ Prid sumardjati, Teknik pemanfaatan tenaga listrik jilid 3,Hlm 404.

¹ Juhari, Generator kelas XI Kemendikbud, Hlm 31.



Keterangan :

P_{Out} = Daya keluaran generator (MW).

P_{In} = Daya masukan generator (MW).

$\Sigma Rugi$ = Total Rugi-rugi daya (MW).

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

Rugi konstan = Rugi konversi = Rugi besi = Rugi Mekanik

Rugi konstan = $P_{conv} / P_a = 3 \cdot E_0 \cdot I_a$

Pada waktu generator sinkron berbeban, rugi-rugi yang terjadi terdiri dari¹ :

1. Rugi-rugi rotasi yang terdiri dari :
 - a. Rugi angin dan gesekan.
 - b. Rugi gesekan sikat pada cicin seret.
 - c. Rugi ventilasi pada waktu pendinginan mesin.
 - d. Rugi histerisis dan arus pusar di stator.
2. Rugi-rugi listrik yang terdiri dari :
 - a. Rugi pada kumparan medan.
 - b. Rugi pada kumparan jangkar.
 - c. Rugi pada kontak sikat.
3. Rugi eksitasi yang dipakai untuk penguatan.
4. Rugi beban sasar (*stray load loss*).

2.15 Matlab

2.15.1 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 pemograman yang mudah digunakan. Sehingga Matlab banyak digunakan sebagai :

¹ Juhari.2014.*Generator Semester 3 kelas XI* .Hal.31



1. Kalkulator, ketika bertindak sebagai kalkulator, Matlab memberikan hasil seketika setelah perintah operasi diberikan.
2. 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 :

1. Matematika dan Komputansi.
2. Pengembangan dan Algoritma.
3. Pemrograman modeling, simulasi dan pembuatan prototipe.
4. Analisa data, eksplorasi dan visualisasi.
5. Analisis numerik dan statistik.
6. Pengembangan aplikasi teknik.

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

1. Skalar : berupa bilangan real atau kompleks.
2. Matriks dan Vektor : dengan elemen bidang real atau kompleks.
3. Teks : pengolahan data.

Tabel 2.2 Simbol Operasi Aritmatika⁸

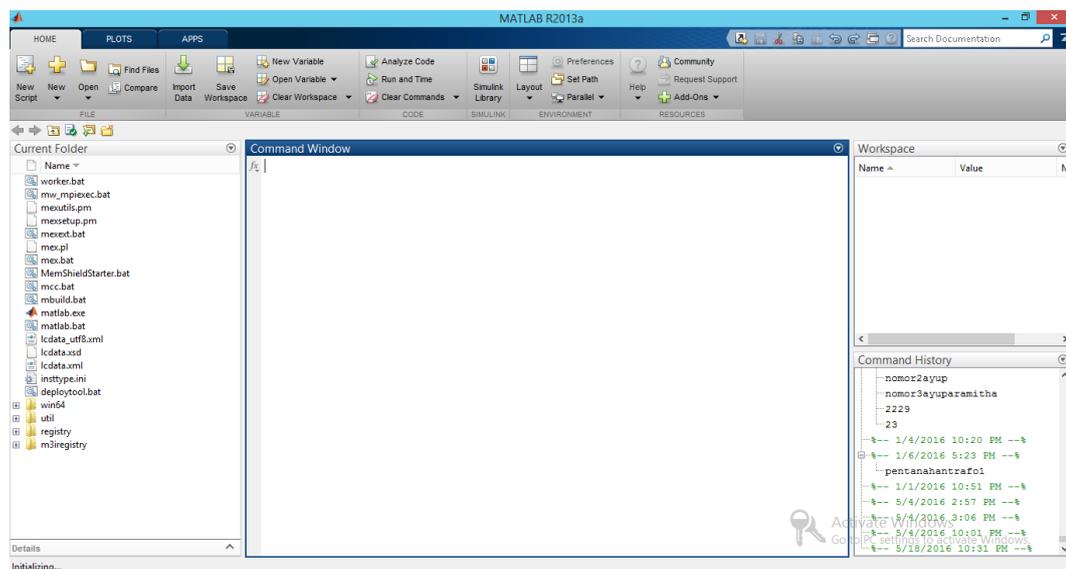
Operasi Aritmatika	Simbol	Contoh
Penjumlahan	+	$6 + 3 = 9$
Pengurangan	-	$6 - 3 = 3$
Perkalian	*	$6 * 3 = 18$
Pembagian Kanan	/	$6/3 = 2$
Pembagian Kiri	\	$6 \setminus 3 = 3/6 = 1/2$
Eksponensial	^	$6^3 (6^3 = 216)$

⁸ Rao V. Dukkipati, *Analysis and Design of Control Systems Using MATLAB*, (USA: New Age Science, 2009), hlm. 28



2.15.2 Window-Window Pada Matlab

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



Gambar 2.15 Tampilan awal Matlab²⁰

Adapun beberapa macam *window* pada matlab diantaranya :

1. *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 75, maka pada *command window* kita dapat mengetikkan seperti pada gambar 2.18 :

²⁰ Software Matlab R2013a



```

Command History | Command Window
-----
Program Phitungan Efisiensi Generator
===== by : Ayu Paramitha =====
-----
Selamat Datang di Program perhitungan Efisiensi Generator :)

Masukkan Daya      (MW) =
Masukkan Arus      (A)  =
Masukkan Tegangan  (V)  =
Masukkan Faktor Daya (PF) =
Rugi Rugi Generator = MW
Efisiensi Generator = %
Apakah anda ingin kembali ke menu awal ?
bila ingin keluar ketik exit
1. YA
2. Tidak
fx Pilihan anda =...?

```

Gambar 2.16 Tampilan *Command Window*²⁰

2. *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*.

²⁰ Ibid.



```

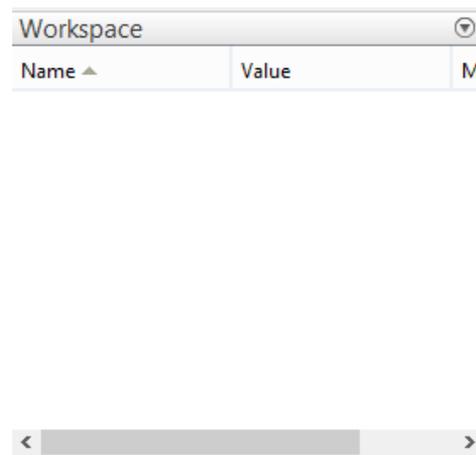
Current Folder Command History
9.8
479
11500
0.85
2
6/4/2016 12:20 AM --
efisiensi_generator
17.6
930
10350
0.98
1
17.5
930
efisiensi_generator
17.5
920
10350
0.98
6/12/2016 7:41 AM --
efisiensi_generatorormfile
6/12/2016 7:55 AM --
efisiensi_generatorormfile
6/12/2016 7:56 AM --
efisiensi_generatorormfile
2
6/12/2016 8:00 AM --

```

Gambar 2.17 Tampilan *Command History*²⁰

3. *Workspace*

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



Gambar 2.18 Tampilan *Workspace*²⁰

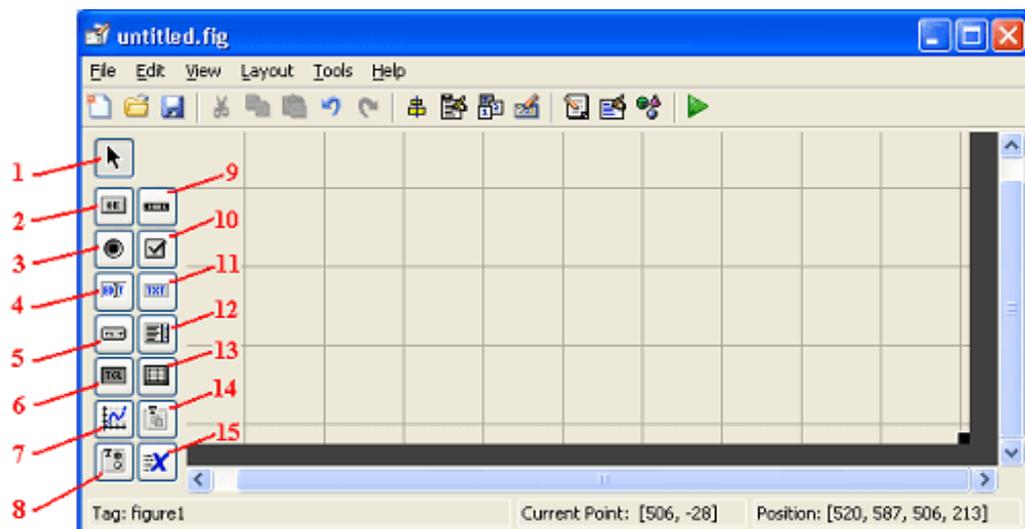
²⁰ Ibid.

²⁰ Ibid.



2.15.3 Graphical User Interface (GUI)³

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 2.19 Bagian-Bagian *Graphical User Interface*³

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*).

³ Karimariza, “*Pengenalan Gui Matlab*” (<http://karimariza.blogspot.com/2017/02/pengenalan-gui-matlab.html>, Diakses pada 6 Juni 2019, 2019)

³ *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 *push button*. Perbedaannya adalah saat *push button* 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*, dapat diprogram agar pemakai dapat berinteraksi dengan *axes* dan objek grafik yang ditampilkan melalui *axes*.

8. *Button Group*

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

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