



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU)

Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap merupakan suatu instalasi peralatan yang berfungsi untuk mengubah energi panas (hasil pembakaran bahan bakar dan udara) menjadi energi listrik yang bermanfaat. Pada dasarnya, sistem PLTGU adalah gabungan antara PLTG dan PLTU (*Combine Cycle*), dimana panas dari gas buang yang dihasilkan PLTG yang masih besar sekitar 500° C dimanfaatkan kembali sebagai bahan bakar untuk memanaskan air yang nantinya akan menghasilkan uap yang digunakan sebagai fluida kerja di PLTU. Bagian yang digunakan untuk proses pemanasan fluida tersebut adalah HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*). PLTU memanfaatkan energi panas dan uap dari gas buang hasil pembakaran di PLTG untuk memanaskan air di HRSG sehingga menjadi uap jenuh kering. Uap jenuh kering inilah yang akan digunakan untuk memutar sudu (baling-baling). Gas yang dihasilkan dalam ruang bakar pada PLTG akan menggerakkan turbin dan kemudian generator akan mengubahnya menjadi energi listrik².

PLTGU merupakan aplikasi dari siklus Brayton dan siklus *rankine* pada teori termodinamika. Siklus *brayton* memanfaatkan gas untuk memutar turbin yang kemudian menggerakkan generator. Sedangkan siklus *rankine* memanfaatkan panas uap (*steam*) untuk memutar turbin. Perpaduan dua siklus ini dalam menghasilkan listrik pada PLTGU dikenal dengan istilah *combined cycle power plant*³.

2.1.1. Prinsip Kerja PLTGU

Prinsip kerja PLTGU adalah sebagai berikut, mula-mula udara dimasukkan dalam kompresor dengan melalui air filter/penyaring udara agar partikel debu tidak ikut masuk ke dalam kompresor tersebut.

²Muhamad Firdaus, "Penentuan Beban Optimal Pada Turbin Gas PLTGU Dengan Menggunakan Nonlinear Programming" (Universitas Indonesia, 2010).

³Faisal Ar Rasyid, "Rancangan Turbin Uap 13 MW Di PLTGU Kapasitas 105 MW" (Politeknik Negeri Bandung, 2017).



Pada kompresor tekanan udara dinaikkan lalu dialirkan ke ruang bakar (*combustor*) untuk dibakar bersama bahan bakar. Disini, penggunaan bahan bakar menentukan apakah bisa langsung dibakar dengan udara atau tidak. Jika menggunakan BBG, gas bisa langsung dicampur dengan udara untuk dibakar, tetapi jika menggunakan BBM harus dilakukan proses pengabutan dahulu pada *burner* setelah itu dicampur udara dan dibakar. Pembakaran bahan bakar dan udara ini akan menghasilkan gas bersuhu dan bertekanan tinggi yang berenergi (*enthalpy*). Gas ini lalu disemprotkan ke turbin dengan menggunakan *nozzle* yang ada didalam *combustor*, di dalam *combustor* ini suhu yang didapat sekitar 3500⁰F sehingga gas yang ditembakkan tadi akan menggerakkan gas turbin yang menghasilkan energi gerak untuk memutar generator setelah itu energi gerak atau mekanik tadi akan di ubah oleh generator menjadi energi listrik yang akan siap dimasukan ke dalam transformator di distribusikan. Selanjutnya gas hasil dari pembakaran GTG tadi masih bisa dimanfaatkan kembali karna suhu gas yang masih tinggi sekitar 500⁰C sehingga gas tersebut di alirkan HRSG untuk dimanfaatkan sebagai bahan bakar untuk menggerakkan *steam turbine*.

Di dalam HRSG ini terdapat proses pemanasan dimana ada 3 proses pemanasan fluida (*economizer, evaporator dan super heater*), sebelum dilakukan pemanasan fluida harus di *treatment* terlebih dahulu untuk menghilangkan kandungan mineral dan zat-zat yang berbahaya yang dapat merusak pump atau peralatan di PLTGU tersebut. Setelah dilakukan pemanasan fluida di HRSG yang telah menghasilkan uap kering maka uap kering tersebut akan di tembakkan untuk menggerakkan *steam turbin* yang kemudian akan menggerakkan generator dan akan mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Setelah uap di tembakan ke turbin maka uap kering tadi akan masuk kedalam *condenser* didalam *condenser* inilah terjadi proses perubahan siklus yang tadi nya uap kering menjadi air kembali, kemudian air tersebut dialirkan melalui *pump* ke *cooling tower* dan *deareator* didalam *deareator* ini air kembali di *treatment* untuk menghilangkan kandungan yang terdapat didalamnya dan melalui *feed water pump* akan di masukan kembali kedalam HRSG untuk dipanaskan.



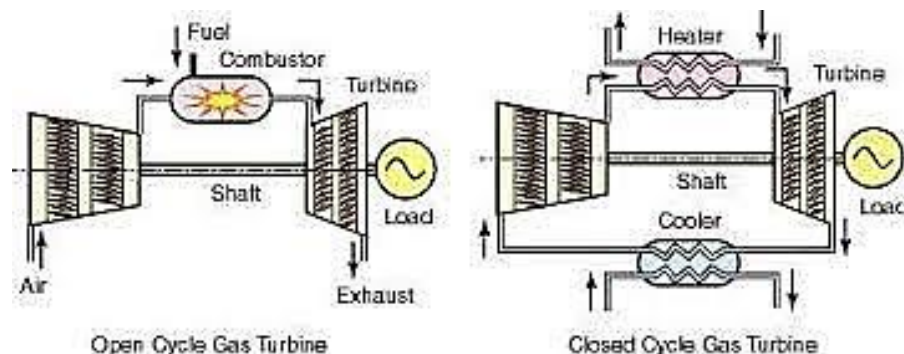
Secara umum sistem produksi tenaga listrik pada PLTGU dibagi menjadi dua siklus, yaitu sebagai berikut:

1. Siklus Terbuka (*Open Cycle*)

Siklus Terbuka merupakan proses produksi listrik pada PLTGU dimana gas buangan dari turbin gas langsung dibuang ke udara melalui cerobong saluran keluaran. Suhu gas buangan di cerobong saluran keluaran ini mencapai 550°C . Proses seperti ini pada PLTGU dapat disebut sebagai proses pembangkitan listrik turbin gas yaitu suatu proses pembangkitan listrik yang dihasilkan oleh putaran turbin gas.

2. Siklus Tertutup (*Closed Cycle*)

Jika pada siklus terbuka gas buang dari turbin gas langsung dibuang melalui cerobong saluran keluaran, maka pada proses siklus tertutup, gas buang dari turbin gas akan dimanfaatkan terlebih dahulu untuk memasak air yang berada di HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*). Kemudian uap yang dihasilkan dari HRSG tersebut akan digunakan untuk memutar turbin uap agar dapat menghasilkan listrik setelah terlebih dahulu memutar generator. Jadi proses siklus tertutup inilah yang disebut sebagai proses Pembangkitan Listrik Tenaga Gas Uap yaitu proses pembangkitan listrik yang dihasilkan oleh putaran turbin gas dan turbin uap. Daya listrik yang dihasilkan pada proses siklus terbuka tentu lebih kecil dibandingkan dengan daya listrik yang dihasilkan pada proses produksi listrik siklus tertutup. Siklus terbuka dan siklus tertutup pada PLTGU ditunjukkan oleh gambar 2.1 berikut.

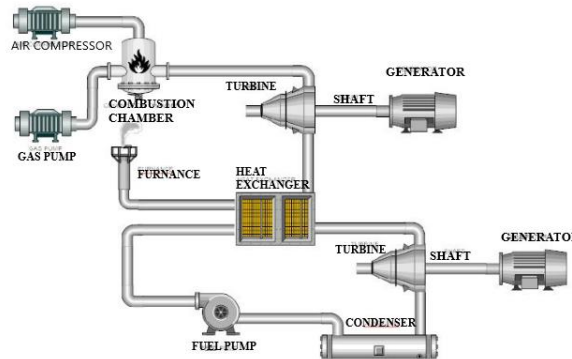


Gambar 2.1 Open and Closed Cycle Gas Turbin



2.1.2. Proses Pembangkitan PLTGU

Proses pembangkitan PLTGU ditunjukkan pada gambar 2.2 sebagai berikut⁴:



Gambar 2.2 Ilustrasi Proses Pembangkitan PLTGU

1. Udara dan bahan bakar dimampatkan oleh kompresor dan pompa bahan bakar di dalam ruang bakar.
2. Selanjutnya setelah campuran gas dan udara bercampur dan terbakar maka akan menghasilkan gas buang bertekanan tinggi. Tekanan gas yang tinggi ini kemudian mengalir menuju turbin gas dan menghasilkan energi listrik dengan bantuan generator.
3. Setelah gas buang melewati turbin, sisa gas buang ini sebelum dibuang ke lingkungan dimanfaatkan kembali oleh boiler pada untuk membuat uap air bertekanan tinggi.
4. Selanjutnya uap air bertekanan tinggi akan mengalir menuju turbin uap sehingga menghasilkan energi listrik dengan bantuan generator.

2.2. Generator Sinkron

Generator sinkron adalah mesin sinkron yang digunakan sebagai generator. Generator sinkron adalah suatu alat yang berfungsi untuk mengonversi energi mekanik menjadi energi listrik dengan arus bolak-balik. Sumber tenaga mekanik penggerak utama dapat berupa mesin diesel, turbin uap, turbin air, atau perangkat serupa lainnya⁵.

⁴Nurhening Yuniarti and Ilham Wisnu Aji, *Modul Pembelajaran Pembangkit Tenaga Listrik, Jurusan Pendidikan Teknik Elektro FT. Universitas Negeri Yogyakarta* (Yogyakarta, 2019).

⁵Stephen J Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, ed. Carlise Paulson and Emily Lupash J, 4th ed. (Melbourne: McGraw-Hill, 2004).



Generator arus bolak-balik dapat juga disebut sebagai alternator. Jenis generator yang digunakan pada pembangkit tenaga listrik adalah jenis generator sinkron atau serempak dimana tegangan dan frekuensi yang dihasilkan sesuai dengan kecepatan putarnya, sehingga diperlukan putaran yang konstan untuk menghasilkan tegangan dan frekuensi yang juga konstan⁶. Untuk mendapatkan tegangan dan frekuensi yang konstan pada terminal generator maka arus jangkar dan sudut daya harus tetap pula. Besarnya perubahan beban generator perlu diketahui dan disesuaikan dengan kemampuan generator sehingga kestabilan kinerja generator dapat tercapai⁷. Bentuk generator sinkron ditunjukkan pada gambar 2.3 berikut.



Gambar 2.3 Generator Sinkron

2.2.1. Prinsip Kerja Generator Sinkron

Prinsip kerja generator sinkron berdasarkan induksi elektromagnetik. Setelah rotor diputar oleh penggerak mula (*prime mover*) dengan demikian kutub-kutub yang ada pada rotor akan berputar. Jika kumparan kutub disuplai oleh tegangan searah maka pada permukaan kutub akan timbul medan magnet (garis-garis gaya magnet) yang berputar, kecepatannya sama dengan putaran kutub. Berdasarkan Hukum Faraday, apabila lilitan penghantar atau konduktor diputar memotong garis-garis gaya magnet yang diam atau lilitan yang diam dipotong

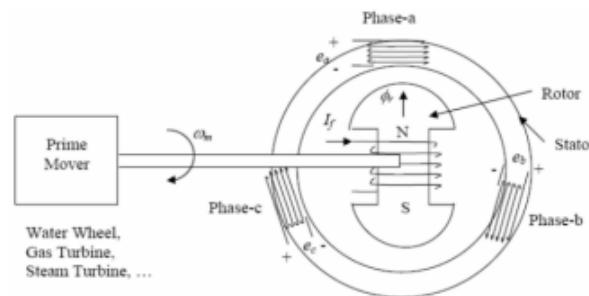
⁶Yuniarti and Aji, *Modul Pembelajaran Pembangkit Tenaga Listrik*.

⁷A Annisa, W Winarso, and Wakhyu Dwiono, "Analisis Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Karakteristik Generator Sinkron," *Jurnal Riset Rekayasa Elektro* 1, no. 1 (July 25, 2019): 37–53, <https://doi.org/10.30595/JRRE.V1I1.4928>.



oleh garis-garis gaya magnet yang berputar maka pada penghantar tersebut timbul EMF (*Electro Motive Force*) atau GGL (*Gaya Gerak Listrik*).

Untuk menentukan arah arus dan tegangan yang timbul pada penghantar dapat menggunakan kaidah tangan kanan atau hukum Fleming. Jempol atau ibu jari akan menunjukkan arah gerak atau putaran, jari telunjuk akan menunjukkan arah medan magnet dan jari tengah menunjukkan arah arus dan tegangan. 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. Prinsip kerja dari generator sinkron ditunjukkan pada gambar 2.4 dan dapat dinyatakan sebagai berikut:



Gambar 2.4 Prinsip Kerja Generator Sinkron

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

$$f = \frac{p \times n}{120} \dots \dots \dots (2.1)^8$$

Dimana:

f = frekuensi (Hz)

p = jumlah kutub

n = kecepatan putaran motor (rpm)

⁸Suad Ibrahim Shahl, e-book Synchronous Generators, 2015, hlm 7.



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

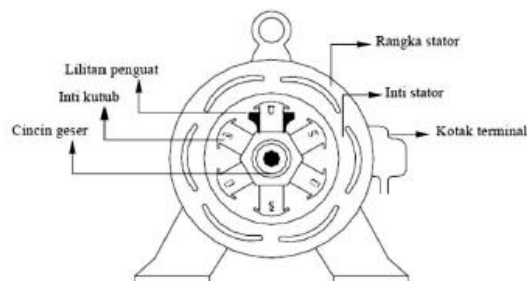
$$E_a/ph = 4,44 \cdot K_c \cdot f \cdot M \cdot \Phi \cdot K_d \dots \dots \dots (2.2)^9$$

Dimana:

- M = Jumlah kumparan per fasa = $Z/2$
 Z = Jumlah konduktor slot per fasa
 K_d = faktor distribusi = $\frac{\sin(\frac{m\beta}{2})}{m \cdot \sin(\frac{\beta}{2})}$
 K_c = Faktor Kisar = $\cos \alpha / 2$
 Φ = Fluks magnet per kutub per fasa (Weber)
 F = Frekuensi (Hz)

2.2.2. Konstruksi Generator Sinkron

Konstruksi generator sinkron terdiri dari dua bagian utama, yaitu stator dan rotor¹⁰. Stator adalah bagian diam yang mengeluarkan tegangan bolak balik dan rotor adalah bagian bergerak yang menghasilkan medan magnet yang menginduksikan ke stator. Konstruksi penampang rotor dan stator pada generator sinkron ditunjukkan pada gambar 2.5 dibawah.



Gambar 2.5 Penampang Rotor dan Stator

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

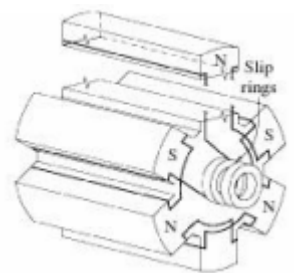
⁹Yon Rijono, *Dasar Teknik Tenaga Listrik*, 1st ed. (Yogyakarta: Andi, 1997), accessed May 22, 2022.

¹⁰Prabha Kundur, *Power System Stability and Control* (California: Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 1993).



menginduksi tegangan tiga fasa pada kumparan stator generator. Konstruksi rotor terdiri dari dua jenis, yaitu:

- a. Rotor kutub menonjol (*salient pole*) untuk generator kecepatan rendah dan menengah (120-400 rpm). Kutub-kutub pada rotor salient pole diberi lapisan laminasi untuk mengurangi panas yang ditimbulkan oleh arus Eddy. Belitan medannya dihubungkan seri, ketika belitan medan ini di suplai oleh eksiter maka kutub yang berdekatan akan menjadi kutub yang berlawanan.
- b. Rotor *cylinder* merupakan rotor yang digunakan pada generator dengan kecepatan putaran yang tinggi (1500 - 3000 rpm.). Rotor dengan konstruksi ini memiliki keseimbangan mekanis yang lebih baik daripada rotor salient pole. Rotor kutub menonjol dan kutub silinder ditunjukkan pada gambar 2.6 dan 2.7 berikut.



Gambar 2.6 Rotor Kutub Menonjol



Gambar 2.7 Rotor Kutub Silinder

2. Stator

Stator adalah bagian generator yang berfungsi sebagai tempat untuk menerima induksi magnet dari rotor. Arus AC yang menuju ke beban disalurkan melalui armatur atau stator, komponen ini berbentuk sebuah rangka silinder

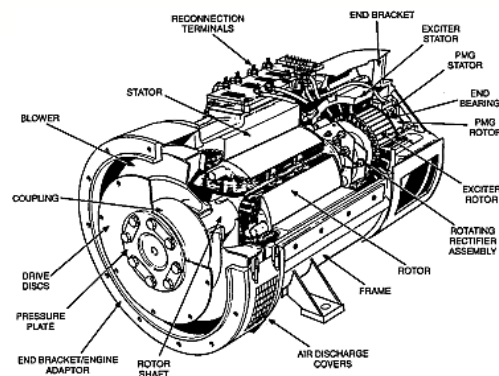


dengan lilitan kawat konduktor yang sangat banyak. Bentuk stator ditunjukkan pada gambar 2.8 berikut.



Gambar 2.8 Stator

Konstruksi stator seperti ditunjukkan pada gambar di bawah terdiri dari:



Gambar 2.9 Kerangka dan Inti Stator

- Kerangka terbuat dari besi tuang untuk menyangga inti jangkar.
- Inti jangkar terbuat dari besi lunak (baja silikon).
- Alur (slot) untuk meletakkan belitan (kumparan).
- Belitan jangkar terbuat dari tembaga yang diletakkan pada alur (slot).

2.3. Karakteristik Generator Sinkron

2.3.1. Generator Sinkron Tanpa Beban¹¹

Apabila sebuah mesin sinkron difungsikan sebagai generator dengan diputar pada kecepatan sinkron dan rotor diberi arus medan (I_f), maka tegangan

¹¹Zuhal, *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*, Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 1995, hlm. 132.



(E_o) akan terinduksi pada kumparan jangkar stator. Bentuk hubungannya diperlihatkan pada persamaan berikut:

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

Dimana: c = konstanta mesin

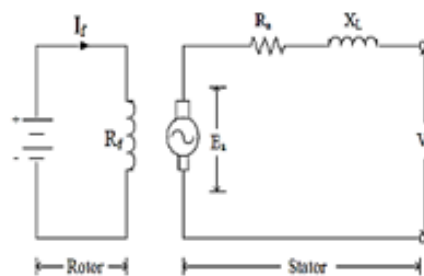
n = kecepatan putar (rpm)

ϕ = fluks yang dihasilkan oleh I_f

Dalam keadaan tanpa beban arus jangkar tidak mengalir pada stator $I_a=0$, karenanya tidak terdapat pengaruh reaksi jangkar¹². Fluks hanya dihasilkan oleh arus medan (I_f). Dengan demikian besar tegangan terminal adalah:

$$V_t = E_a = E_o \dots \dots \dots (2.4)^{13}$$

Rangkaian ekuivalen generator sinkron tanpa beban ditunjukkan pada gambar 2.10 berikut.



Gambar 2.10 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron Tanpa Beban

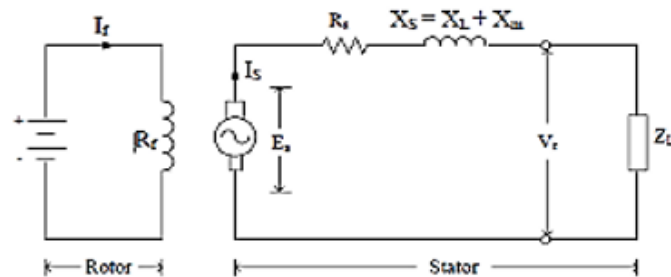
2.3.2. Generator Sinkron Berbeban¹⁴

Dengan adanya beban yang terpasang pada output generator sinkron, maka arus armatur (I_a) akan mengalir. Dengan adanya arus armatur ini, pada kumparan armatur atau kumparan jangkar timbul fluks putar jangkar (Φ_a). Fluks putar jangkar ini bersifat mengurangi atau menambah fluks yang dihasilkan oleh kumparan rotor (Φ_f). Hal ini bergantung pada faktor daya beban. Rangkaian ekuivalen generator sinkron berbeban ditunjukkan oleh gambar 2.11 berikut.

¹²Ibid

¹³Suad Ibrahim Shahl, e-book Synchronus Generators, 2015, hlm 7.

¹⁴Yon Rijono, Dasar Teknik Tenaga Listrik, 1st ed. (Yogyakarta: Andi, 1997)

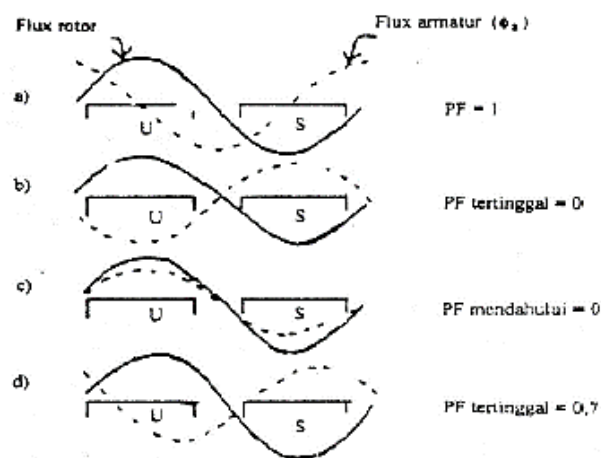


Gambar 2.11 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron Berbeban

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

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

Karakteristik generator sinkron pada berbagai faktor daya ditunjukkan pada gambar 2.12 berikut.



Gambar 2.12 Karakteristik Generator Sinkron Pada Berbagai Faktor Daya

Untuk beda fase 0 sampai 90° , arus armature mendahului terhadap tegangan beban dan disebut faktor daya beban menengah mendahului, sedangkan untuk beda fasa 0 sampai 90° , arus armature tertinggal terhadap tegangan beban dan disebut faktor daya beban menengah tertinggal. Pada faktor daya beban menengah mendahului, fluks armature yang timbul fasenya agak bergeser ke kanan terhadap fluks putar rotor. Sehingga pada kejadian ini terjadi proses dimagnetisasi sebagai dan bentuk sinyal GGL armature yang dihasilkan ada cacat



armature. Dengan adanya fluks putar armature akibat timbulnya arus armature, maka pada kumparan timbul reaktansi pemagnet X_m , reaktansi pemagnet bersama-sama dengan reaktansi bocor dikenal dengan nama reaktansi sinkron X_s dan secara matematis ditulis:

$$X_s = X_L + X_m \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana:

X_L = Reaktansi armatur

X_m = Reaktansi magnet

X_s = Reaktansi sinkron

Pada generator sinkron berbeban, pada kumparan armatur timbul I_a dan X_m yang mengakibatkan timbulnya penurunan ggl armature tanpa beban. E_o menjadi $E_a = E_o - jI_a X_m$ dan tegangan terminalnya menjadi $(V_t)_{bp}$. Ggl armatur tanpa beban (E_o) besarnya adalah;

$$E_o/ph = V_t + I_a(R_a + jX_s) \dots \dots \dots (2.6)$$

atau

$$E_o/ph = V_t + I_a Z_s \dots \dots \dots (2.7)$$

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

- $PF=1$

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

- PF = tertinggal

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

- PF = mendahului

$$E_o = \sqrt{(V_t \cos \theta + I_a R_a)^2 + (V_t \sin \theta - I_a X_L)^2} \dots \dots \dots (2.10)$$

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

V_t = tegangan terminal output per fasa (Volt)

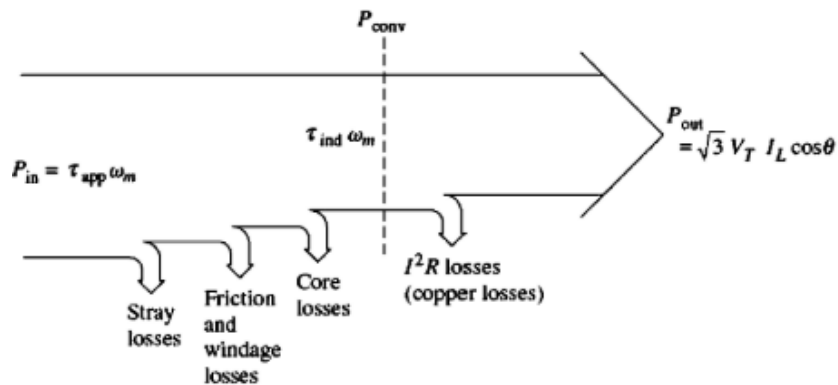


R_a = resistansi jangkar per fasa (ohm)

X_s = reaktansi bocor per fasa (ohm)

2.4. Rugi-Rugi Daya Generator Sinkron

Rugi-rugi daya total pada generator sinkron terdiri dari rugi-rugi tembaga, rugi besi, dan rugi mekanik yang dapat diperhatikan pada gambar diagram di bawah ini¹⁵:



Gambar 2.13 Diagram Aliran Daya Generator Sinkron

Tidak semua daya mekanik akan menjadi tenaga elektrik keluaran pada generator. Perbedaan atau selisih antara daya keluaran dan daya masukan menunjukkan rugi-rugi pada generator. Diagram aliran daya untuk generator sinkron ditunjukkan pada Gambar 2.15. Daya mekanik masukan adalah daya poros pada generator $P_{in} = \tau_{app} \omega_m$, sedangkan daya yang diubah dari mekanik ke listrik ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$P_{conv} = \tau_{ind} \omega_m \dots \dots \dots (2.11)^{16}$$

$$= 3E_o I_a \dots \dots \dots (2.12)$$

Selisih antara daya input ke generator dan daya converter dalam generator menunjukkan rugi-rugi mekanis, rugi inti, dan rugi stray pada generator snkron. Daya keluaran aktif dari generator sinkron dapat dinyatakan sebagai berikut¹⁷:

$$P_{out} = \sqrt{3} V_T I_L \cos \theta \dots \dots \dots (2.13)$$

¹⁵Chapman, *Electric Machinery Fundamnetals*, hlm 280-281.

¹⁶Ibid.

¹⁷Ibid.



2.4.1. Rugi Besi

Rugi besi atau rugi inti terjadi di dalam jangkar generator sinkron yang disebabkan oleh perputaran jangkar di dalam medan magnet kutub-kutub dari kumparan medan. Rugi ini diperoleh pada besi magnetis di dalam stator dan rotor akibat timbulnya efek histeris dan arus pusar (arus eddy). Rugi besi timbul ketika besi jangkar atau struktur rotor mengalami perubahan fluks terhadap waktu. Rugi-rugi ini tidak tergantung pada beban, tetapi merupakan fungsi dari pada fluks dan kecepatan generator. Rugi-rugi arus eddy adalah rugi yang disebabkan oleh arus pusar pada inti besi dan tergantung pada kuadrat dari kerapatan fluks dan frekuensi¹⁸. Pada keadaan mesin normal besarnya dapat didekati dengan:

$$P_e = K_e \cdot F^2 B_{max}^2 \dots \dots \dots (2.14)^{19}$$

Dimana:

- P_e = Rugi-rugi arus *eddy*
- B_{maks} = Kerapatan *fluks* maksimum
- f = Frekuensi
- K_e = Ketetapan perbandingan

Harga tergantung pada satuan yang digunakan, volume besi dan resistensivitas besi. Ragam dari rugi-rugi histerisis dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan secara empiris saja. Persamaan yang banyak dipergunakan adalah:

$$P_h = \eta h \cdot B_{max}^{1.6} \cdot f \cdot v \dots \dots \dots (2.15)^{20}$$

Dimana:

- ηh = koefisien Steinmetz histerisis. Perhatikan table 2.1 tentang nilai ηh dari berbagai macam bahan baja.
- B = kerapatan fluks (Wb/m²)
- v = volume inti (m³)
- f = frekuensi (Hz)

¹⁸Rahmat Septiyan, Mayda Waruni K, and Bambang Sugeng, "Analisa Hilang Daya Pada Generator Sinkron 3 Fasa (6,6 KV) 11 MVA TYPE 1DT4038-3EE02-Z," *Jurnal Teknik Elektro Uniba (JTE Uniba)* 4, no. 1 (2019): 7–11.

¹⁹Ibid.

²⁰Rijono, *Dasar Teknik Tenaga Listrik*.



Tabel 2.1 Nilai Koefisien Steinmetz Histerisis

| Bahan | ηh (joule/m ³) |
|-----------------|----------------------------------|
| Sheet Steel | 502 |
| Silicon Steel | 191 |
| Hard Cast Steel | 7040 |
| Cast Steel | 750-3000 |
| Cast Iron | 2700-4000 |

Pada mesin induksi, rugi-rugi intinya terdapat di stator dan rotor hampir boleh diabaikan karena frekuensi di rotor relatif kecil. Jadi, total rugi-rugi inti adalah sebagai berikut:

$$P_i = P_h + P_e \dots \dots \dots (2.16)$$

Dimana:

P_i = Total rugi-rugi inti

P_h = Rugi-rugi histerisis

P_e = Rugi-rugi *eddy current*

2.4.2. Rugi Tembaga²¹

Rugi tembaga sering disebut juga rugi belitan yang terdiri dari kumparan armatur dan kumparan medan. Rugi-rugi tembaga ditemukan pada semua belitan pada mesin, dihitung berdasarkan tahanan dc dari lilitan pada suhu 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%-40% dari rugi total beban penuh. Sedangkan rugi kumparan medan shunt ($P_{sh} = 3 \cdot I_{sh}^2 \cdot R_{sh}$) bersama-sama dengan kumparan medan seri ($P_{sr} = I_{sr}^2 \cdot R_{sr}$) sebesar sekitar 20%-30% dari rugi beban penuh.

Total kerugian I^2R adalah jumlah dari rugi-rugi I^2R stator dan rugi-rugi I^2R rotor. Rugi-rugi I^2R dalam belitan sebenarnya tidak hanya tergantung pada arus, tetapi juga pada tahanan belitan di bawah kondisi operasi. Sedang tahanan efektif dari belitan selalu berubah dengan perubahan temperatur, *skin effect* dan

²¹Septiyan, Waruni K, and Sugeng, "Analisa Hilang Daya Pada Generator Sinkron 3 Fasa (6,6 KV) 11 MVA TYPE 1DT4038-3EE02-Z."



sebagainya. Rugi tembaga pada stator dan rotor dinyatakan dalam persamaan berikut.

$$P_{cuS} = 3 \times I_a^2 \times R_a \dots \dots \dots (2.17)$$

$$P_{cuR} = I_f^2 \times R_f \dots \dots \dots (2.18)$$

Dimana:

P_{cuS} = Rugi-rugi tembaga pada stator

P_{cuR} = Rugi-rugi tembaga pada rotor

I_a = Arus pada stator

I_f = Arus pada rotor

R_a = Tahanan atau resistansi pada stator

R_f = Tahanan atau resistansi pada rotor

2.4.3. Rugi Mekanik²²

Rugi-rugi gesekan dan angin adalah energi mekanik yang dipakai dalam motor listrik untuk menanggulangi gesekan batalan poros, gesekan sikat melawan komutator atau slip ring, gesekan dari bagain yang berputar terhadap angin, terutama pada daun kipas pendingin. Kerugian energi ini selalu berubah menjadi panas seperti pada semua rugi-rugi lainnya. Rugi-rugi mekanik dianggap konstan dari beban nol hingga beban penuh dan ini adalah masuk akal tetapi tidak sepenuhnya tepat seperti halnya pada rugi-rugi inti.

2.4.4. Rugi Stray Load²³

Rugi-rugi beban stray merupakan rugi-rugi yang disebabkan oleh arus pusar di dalam tembaga dan rugi-rugi inti tambahan di dalam besi, yang timbul karena pendistorsian fluks magnetik oleh arus beban (tidak termasuk yang disebabkan oleh jatuh tegangan IR) dan rugi-rugi hubung singkat komutasi. Besarnya rugi-rugi ini dinyatakan sebesar ± 1 % dari beban penuhnya.

²²Ibid

²³Ibid



2.5. Efisiensi Generator

Efisiensi adalah perbandingan antara daya output dengan daya input. Seperti halnya mesin-mesin listrik lain maupun transformator, efisiensi generator sinkron ditulis dengan persamaan berikut:

$$\tilde{\eta} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.19)^{24}$$

Atau,

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \sum rugi} \times 100\% \dots \dots \dots (2.20)^{25}$$

Dari persamaan di atas, perlu dipelajari faktor-faktor yang menyebabkan efisiensi selalu dibawah 100%. Untuk itu perlu diketahui kerugian daya apa saja yang ditimbulkan selama generator beroperasi.

1. Kerugian belitan dalam generator yang dinamakan rugi-rugi listrik.
2. Kerugian belitan yang timbul langsung karena putaran generator yang dinamakan rugi-rugi rotasi. Rugi-rugi rotasi ini terbagi menjadi dua jenis, yaitu rugi mekanis akibat putaran dan rugi inti besi akibat kecepatan putaran dan fluks magnet.

2.6. Karakteristik Beban Listrik

Beban listrik merupakan pemakaian tenaga listrik dari para pelanggan. Oleh karenanya, besar kecilnya beban beserta perubahannya tergantung pada kebutuhan pelanggan akan tenaga listrik²⁶. Dalam sistem listrik arus bolak-balik, jenis beban dapat diklasifikasikan menjadi 3 macam, yaitu beban resistif, beban induktif dan beban kapasitif²⁷.

2.6.1. Beban Resistif (R)

Beban resistif (R) yaitu beban yang terdiri dari komponen tahanan Ohm (*resistance*) saja, seperti elemen pemanas (*heating element*) dan lampu pijar.

²⁴Prih Sumardjati, Sofian Yahya, and Ali Mashar, *Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik Jilid 3*, ed. Miftahu Soleh (Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional, 2008).

²⁵Juhari, *Generator Semester 3* (Jakarta: Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia, 2014).

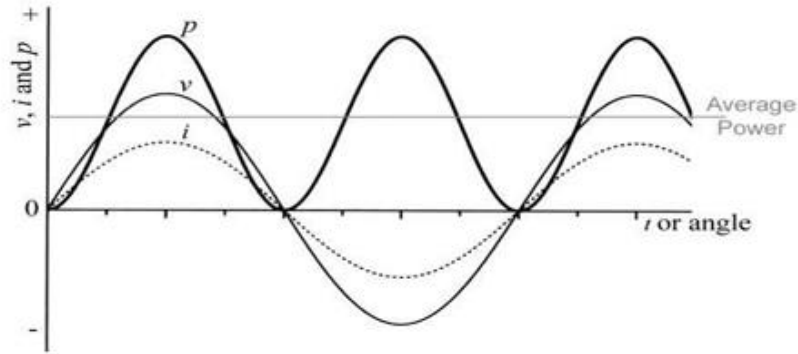
²⁶Djiteng Marsudi, *Operasi Sistem Tenaga Listrik Edisi 3* (Jakarta: Graha Ilmu, 2015), hlm 26

²⁷Jumadi, "Analisis Pengaruh Jenis Beban Listrik Terhadap Kinerja Pemutus Daya Listrik Di Gedung Cyber Jakarta," *Jurnal Energi & Kelistrikan* 7, no. 2 (2015): 108–17.



Beban jenis ini hanya mengkonsumsi beban aktif saja dan mempunyai faktor daya sama dengan satu. Secara matematis dinyatakan dengan:

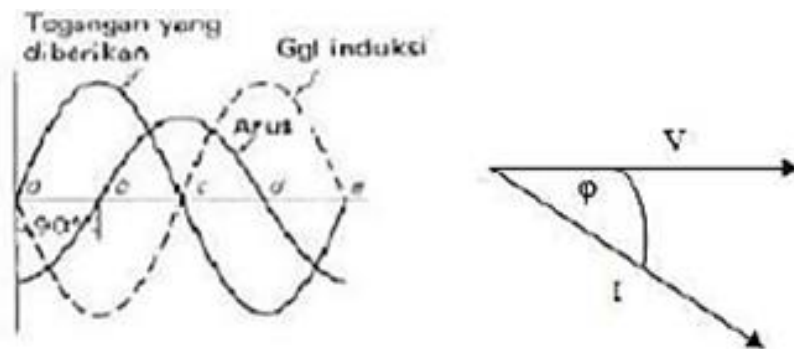
$$P = V \times I \dots \dots \dots (2.21)$$



Gambar 2.14 Tegangan, Arus dan Daya Pada Beban Resistif

2.6.2. Beban Induktif (L)

Beban induktif (L) yaitu beban yang terdiri dari kumparan kawat yang dililitkan pada suatu inti, seperti *coil*, transformator, dan solenoida. Beban ini dapat mengakibatkan pergeseran fasa (*phase shift*) pada arus sehingga bersifat *lagging*. Hal ini disebabkan oleh energi yang tersimpan berupa medan magnetis akan mengakibatkan fasa arus bergeser menjadi tertinggal terhadap tegangan. Beban jenis ini menyerap daya aktif dan daya reaktif. Bentuk gelombang dan vektor arus pada beban induktif ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 2.15 Gelombang Dan Vektor Arus Beban Induktif

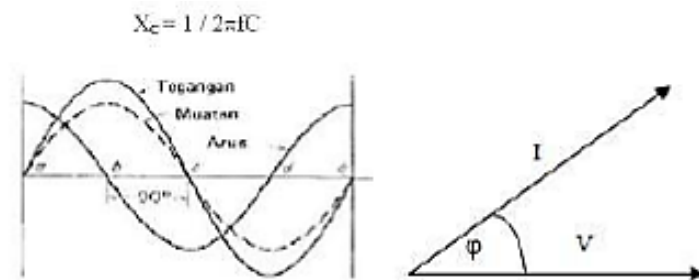
Persamaan daya aktif pada beban induktif adalah sebagai berikut:

$$P = V \times I \times \cos \phi \dots \dots \dots (2.22)$$



2.6.3. Beban Kapasitif (C)

Beban kapasitif (C) yaitu beban yang memiliki kemampuan kapasitansi atau kemampuan untuk menyimpan energi yang berasal dari pengisian elektrik (*electrical discharge*) pada suatu sirkuit. Komponen ini dapat menyebabkan arus leading terhadap tegangan. Beban jenis ini menyerap daya aktif dan mengeluarkan daya reaktif. Bentuk gelombang dan vektor arus pada beban kapasitif ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 2.16 Bentuk Gelombang Dan Vektor Arus Beban Kapasitif

Persamaan daya aktif untuk beban kapasitif adalah sebagai berikut:

$$P = V \times I \times \cos \varphi \dots \dots \dots (2.23)$$

2.7. MATLAB (MATrix LABoratory)

MATLAB merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk pemrograman, analisis, serta koputasi teknik dan matematis berbasis matriks. Pada MATLAB tersedia *toolbar* yang dapat digunakan untuk aplikasi khusus, seperti pengolahan sinyal, sistem kontrol, pengolahan citra digital, optimasi, bioinformatika, simulasi dan berbagai teknologi lainnya²⁸.

MATLAB adalah suatu program untuk analisis dan komputasi numerik dan merupakan suatu bahasa pemrograman matematika lanjutan yang dibentuk dengan dasar pemikiran menggunakan sifat dan bentuk matriks²⁹. Pada awalnya, program ini merupakan *interface* dari proyek LINPACK dan EISPACK, serta dikembangkan menggunakan bahasa FORTAN. namun, sebagai bahasa pemrograman untuk

²⁸Amir Tjolleng, *Pengantar Pemrograman Matlab* (Jakarta: PT. Elex Media Komputindo, 2017).

²⁹Budi Cahyono, "Penggunaan Software Matrix Laboratory (Matlab) Dalam Pembelajaran Aljabar Linier," *Phenomenon : Jurnal Pendidikan MIPA* 1, no. 1 (2013): 45–62, <https://doi.org/10.21580/phen.2013.3.1.174>.



berinteraksi antara manusi dan komputer saat ini dibuat semakin mudah dan berkembang sangat cepat. Sebagai contoh, dapat dilihat dari perkembangan bahasa pemrograman Pascal yang terus memunculkan varian baru sehingga akhirnya menjadi Delphi, demikian pula dengan Basic dengan Visual Basicnya serta C dengan C++ Buildenya.

MATLAB secara umum dapat digunakan untuk matematika dan komputasi, pengembangan dan algoritma, pemodelan, simulasi dan pembuatan prototype, analisa data, eksplorasi dan visualisasi, pembuatan aplikasi termasuk pembuatan *Graphical User Interface*.

Salah satu bentuk pemrograman dalam MATLAB adalah file-m. pemrograman dalam matlab tidak efektif jika dilakukan langsung di jendela kerja karena fungsi pemrograman pada jendela kerja sangat terbatas. Oleh karena itu munculah istilah file-m. File-m adalah tempat dimana kita dapat menuliskan program sebelum dieksekusi pada jendela kerja. File-m sendiri secara garis besar terbagi menjadi dua tipe file-m, kedua tipe file-m ini memiliki karakteristik yang berbeda. Kedua tipe file-m tersebut adalah:

1. Script

Script dalam matlab merupakan salah satu tipe dari file-m. variabel yang digunakan dalam script berlaku global. Penamaan dalam *script* bebas (tidak ditentukan dan sesuai kebutuhan).

2. Function

Function dalam matlab adalah salah satu tipe dari file m yang paling banyak digunakan, karena hampir semua file m yang ada di matlab berbentuk function. Variabel dalam function berlaku local, function menerima nilai dan mengeluarkan nilai, dan penamaan function tidak boleh sembarangan harus sesuai dengan nama functionnya. Matlab merupakan integrasi komputasi, visualisasi dan pemrograman yang mudah digunakan. Sehingga Matlab banyak digunakan sebagai:

- a. Kalkulator, ketika bertindak sebagai kalkulator, memberikan hasil seketika setelah perintah operasi diberikan.
- b. Bahasa pemrograman dengan tingkat tinggi berbasis pada matriks sering digunakan untuk teknik komputasi numeric, yang digunakan untuk

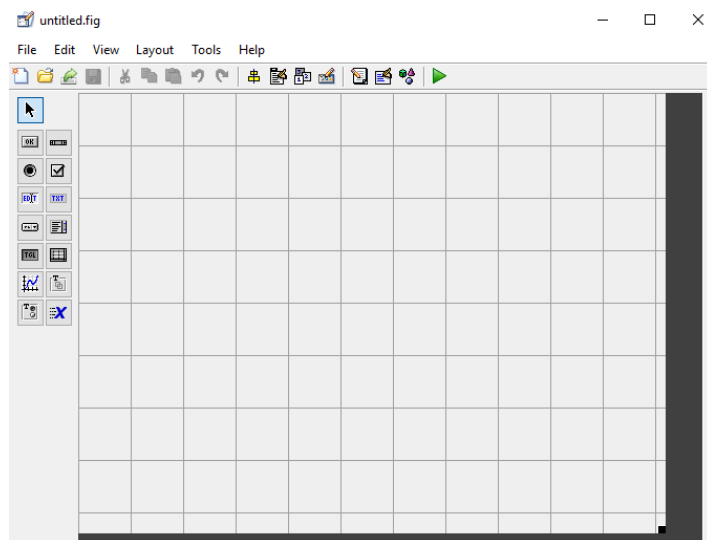


menyelesaikan masalah-masalah yang melibatkan operasi matematika elemen, matrik, optimasi, aproksimasi dan lain-lain.

2.8. Graphical User Interface (GUI) MATLAB

Guide atau GUI *Builder* merupakan sebuah *user interface* yang dibangun dengan objek grafis seperti tombol (*pushbutton*), *edit*, *slider*, *text*, *combo*, sumbu (*axes*), maupun menu dan lain-lain yang bisa digunakan³⁰. Aplikasi yang menggunakan GUI umumnya lebih mudah dipelajari dan digunakan karena orang yang menjalankannya tidak perlu mengetahui perintah yang ada dan bagaimana perintah bekerja. Untuk memulai menggunakan GUI MATLAB dapat dilakukan dengan cara:

1. Melalui *command window* MATLAB ketikkan `>> guide`
2. Selanjutnya akan muncul tampilan *Blank GUI* seperti gambar 2.19 berikut.
 - a. *Blank GUI*



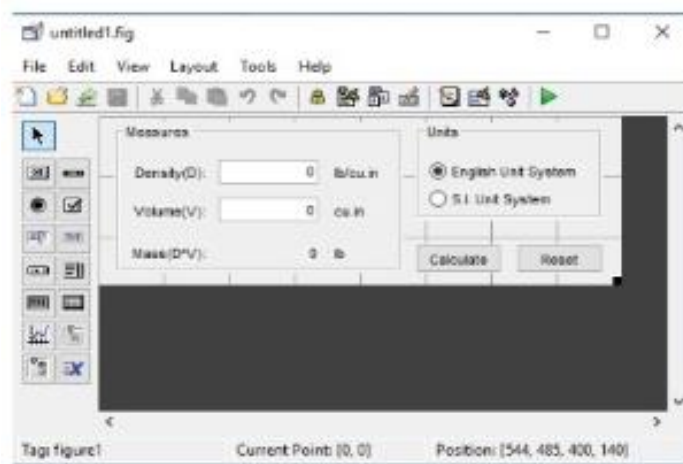
Gambar 2.17 Blank GUI MATLAB (Default)

Blank GUI merupakan sebuah GUI dengan *figure* kosong. Kita dapat mengatur sendiri komponen yang dibutuhkan sesuai dengan aplikasi yang kita buat.

³⁰Nela Guspita, “Graphical User Interface (GUI) MATLAB Untuk Pembelajaran Fisika” (Institut Teknologi Bandung, 2020).



- b. GUI *with Uicontrols*, kita dapat membuat sebuah aplikasi MATLAB dengan beberapa kontrol, misalnya *frame*, *radiobutton*, *pushbutton*, *edit text*, dan lain-lain. Jika kita ingin membangun sebuah aplikasi dengan *layout* yang mirip, maka kita dapat memilih *template* ini, selanjutnya beberapa properti yang dapat kita atur kembali sesuai aplikasi kita. Berikut adalah tampilan GUI *with Uicontrols* ditunjukkan pada gambar 2.20 berikut.



Gambar 2.18 GUI With Uicontrols

Langkah-langkah dasar yang dilakukan dalam membuat GUI adalah sebagai berikut:

1. Mengatur *layout* komponen GUI

Setelah membuka *guide* MATLAB pada *command window* dan telah menentukan *template* GUI yang akan digunakan, Langkah selanjutnya adalah mendesain *figure* dengan menggunakan komponen GUI sesuai dengan kebutuhan, seperti *pushbutton*, *edit text*, *radiobutton*, dan lain-lain. Selanjutnya kita dapat mengatur *layout* masing-masing komponen, baik *string (caption)*, *font*, *color*, *size*, dan sebagainya menggunakan *property inspector*. Jika selesai mendesain, selanjutnya simpan file *figure* yang secara *default* akan memiliki ekstensi *.fig. Maka MATLAB secara otomatis akan membuatkan sebuah file-*m* dengan nama yang sama tetapi dengan ekstensi *.m.



2. Membuat program komponen GUI

M-file yang telah dibuat pada langkah sebelumnya akan otomatis terbuka dan kita harus menulis programnya agar komponen control dapat bekerja. Untuk dapat membuat program dalam m-file kita cukup memperhatikan fungsi-fungsi MATLAB bertanda callback dimana perintah disisipkan, yaitu dengan cara klik kanan pada tombol yang akan diberikan perintah. Pastikan program yang diinginkan benar berada pada bagian callback tombol.