

II. KONSEP DASAR DEVICE PEMBANGKIT

LISTRIK PADA PESAWAT

1. GENERATOR AC

Pada dasarnya pembangkitan listrik AC menggunakan mesin sinkron yang bekerja sebagai generator AC.

Generator AC disebut juga generator sinkron (serempak) atau alternator yang banyak digunakan pada pembangkit tenaga listrik. Pada generator AC dengan kapasitas kecil, kumparan (belitan) jangkar pada generator AC ditempatkan pada jangkar (rotor), sedangkan belitan medan ditempatkan pada stator. Akan tetapi pada generator AC yang dipergunakan untuk pembangkit dengan kapasitas besar, kumparan jangkar ditempatkan pada stator, sedangkan belitan medan ditempatkan pada rotor dengan alasan :

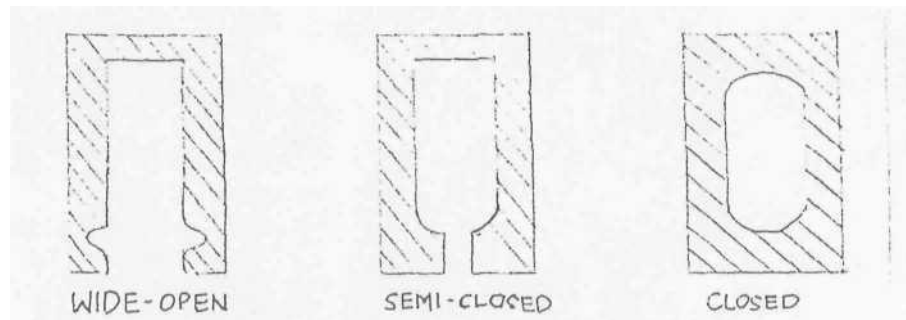
1. Belitan jangkar lebih kompleks daripada belitan medan sehingga lebih mudah dan lebih terjamin ditempatkan pada struktur yang diam serta tegar, yakni stator.
2. Lebih mudah mengisolasi dan melindungi belitan jangkar terhadap tegangan tinggi.
3. Pendingin belitan jangkar mudah karena inti stator yang dibuat cukup besar sehingga dapat didinginkan dengan udara paksa.
4. Belitan medan mempunyai tegangan rendah sehingga dapat efisien bila dipakai pada kecepatan tinggi.

1.1. Konstruksi Generator AC

Konstruksi dasar generator AC terdiri dari:

1. Stator, merupakan bagian dari mesin yang diam dan berbentuk silinder. Inti stator dibuat dari lembaran-lembaran besi elektris yang terlaminsi satu dengan yang lain. Lembaran-lembaran ini kemudian diikat menjadi satu membentuk stator. Laminasi disini digunakan agar rugi arus eddy kecil. Inti stator mempunyai alur-alur (slots) sebagai tempat kumparan stator diletakkan.

Beberapa bentuk alur diberikan pada gambar 2.1



Gambar 2.1¹

Bentuk Alur pada Stator

Jenis alur yang terbuka (*wide open*) mempunyai keuntungan, yaitu mudah untuk memasukkan atau mengeluarkan kumparan stator. Tetapi ini juga mempunyai kerugian, yaitu distribusi fluks di celah udara menjadi tidak baik (*distorted*), ini akan mengakibatkan terjadinya ripples pada tegangan yang dihasilkan oleh generator. Bentuk alur yang agak tertutup (*semi closed*) menghasilkan distribusi

¹ Diktat Mesin-Mesin Listrik I. Hai.4

fluks yang lebih baik pada celah udara, tetapi untuk memasukkan atau mengeluarkan stator ini agak sulit. Lilitan stator harus dimasukkan perlahan-lahan, satu-persatu. Untuk jenis alur tertutup, ini kurang menguntungkan juga karena induktansi dari kumparan menjadi besar, kumparan stator juga harus dimasukkan satu-persatu seperti menjahit, hal ini tentunya memakan waktu yang lama dan tenaga yang tidak sedikit. Selain itu, kesulitan utama dari alur tertutup ini adalah menghubungkan ujung-ujung akhir dari kumparan-kumparan stator. Alur tertutup ini jarang sekali ditemukan, bahkan boleh dikatakan saat ini sudah tidak dipakai lagi.

2. Rotor, merupakan bagian dari mesin yang berputar, terdiri atas dua macam, yaitu:
 - a. Rotor dengan kutub menonjol (*salient pole*), yang dipakai pada generator AC dengan putaran rendah atau menengah (dibawah 1500 rpm).
 - b. Rotor dengan kutub silindris, dimana rotor ini mempunyai kumparan yang terdistribusi secara merata. Kumparan rotor ini diatur sedemikian sehingga terdapat fluks maksimum pada satu posisi tertentu, sehingga untuk putaran tinggi (diatas 3000 rpm), rotor ini mempunyai kekuatan mekanis yang tinggi dibandingkan dengan kutub menonjol, selain itu rotor dengan bentuk ini biasanya lebih *balance* dan juga bekerja pada kebisingan (noise) yang rendah. Generator AC tipe ini pada umumnya

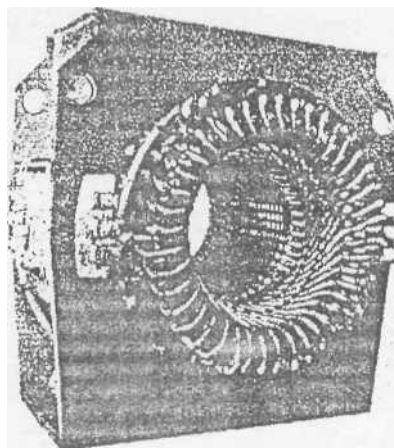
menggunakan penggerak utama turbin uap pada PLTU dan turbin gas pada pesawat terbang.

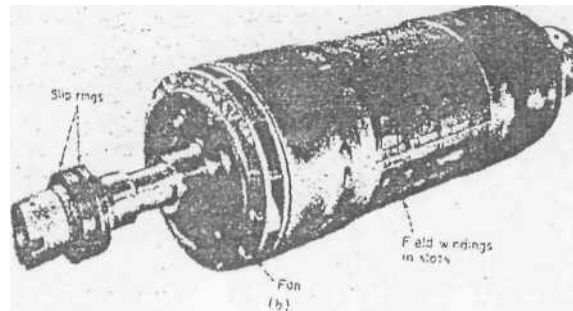
3. Celah udara, yang merupakan ruang yang terdapat di antara stator dan rotor.

Ditinjau dari bentuknya, mesin sinkron dapat dibedakan menjadi dua macam, yaitu:

- mesin sinkron dengan kutub utama berada di dalam
- mesin sinkron dengan kutub utama berada di luar

Yang dimaksud dengan kutub utara adalah kutub medan magnet yang menghasilkan medan magnet Φ . Kutub utama adalah kutub yang berada pada rotor atau bagian yang berputar. Medan magnet ditimbulkan dengan mengalirkan arus listrik searah pada kumparan rotor atau kumparan medan. Untuk pelaksanaannya diperlukan slip ring atau cincin seret bersama dengan sikat arang, kemudian sikat arang ditekan pada slip ring oleh pegas, sehingga terus bersinggungan dengannya agar dapat menyalurkan arus listrik pada satu bagian yang berputar.



Gambar 2.2²

Generator AC 3 phasa (a) Stator (b) Rotor

1.2. Prinsip Kerja Generator

Prinsip kerja generator didapatkan dari hukum Faraday, yang menyatakan bahwa bila ada penghantar yang bergerak pada medan magnet Φ dengan kecepatan n , maka akan timbul tegangan pada penghantar tersebut sebesar E , dengan rumus :

$$E = c n \Phi \quad (2.1)^3$$

dimana : c = konstanta

n = kecepatan penghantar

Φ = medan magnet

Mesin sinkron yang berputar pada kecepatan sinkron akan menghasilkan tegangan yang mempunyai frekwensi dengan persamaan :

² Chailes I. Hubert, *Preventive Maintenance of Electrical Equipment*, Glencoe Macmillan/McGraw-Hill, 1996, USA. Hal.106

³ Tumbelaka, Hanny, *Diktat Dasar Konversi Energi Listrik*, 2000, Elektro-UK Petra. HaJ. 35

$$f = (pn) / 60 \quad (2.2)^4$$

dimana : p = jumlah pasang kitiib mesin

n = putaran per menit (rpm).

1.3. Jenis Generator Berdasarkan Pengiiatannya

Jenis generator berdasarkan penguatannya dibagi menjadi tiga macam, yaitu

1. Generator konvensional

Untuk generator konvensional, arus searah diperoleh dari sebuah generator DC kecil, yang disebut *exciter*. Tegangan yang dihasilkan oleh generator DC ini diberikan pada rotor atau kumparan medan dan menimbulkan medan magnet Φ yang diperlukan untuk dapat menghasilkan tegangan AC, misalnya diesel, raaka dibangkitkan tegangan bolak-balik pada kumparan utama yang terletak di stator.

Pada generator konvensional ini ada beberapa kerugian, yaitu:

- a. Generator DC kecil (*exciter*) merupakan beban tambahan untuk penggerak generator AC ini.
- b. Terdapat sikat arang yang menekan slip ring sehingga timbul nigj gesekan pada generator utamanya. Selain itu, pada generator DC juga terdapat sikat arang yang menekan komutator.
- c. Generator DC keandalannya rendah dan perlu pemeliharaan yang teratur.

¹ Diktat Mesin-Mesin Listrik I. Hal.3

2. Generator dengan penguat statis (*static exciter*)

Pada generator AC dengan pengiiat statis, tegangan searah yang diperlukan untuk membangkitkan medan megnit pada rotor diperoleh pada penyearah elektronik (*rectifier*). Penyearah ini memerlukan tegangan input AC yang diambilkan dari output generator utamanya sendiri. Karena *exciter* ini tidak berputar seperti pada generator dengan sistem konvensional, maka eksitasinya dikatakan statis.

Pada mulanya, pada rotor ada sedikit magnet sisa (*permanent magnet*), yang akan menimbulkan tegangan pada stator, kemudian tegangan ini akan raasuk dalam penyearah dan dimasukkan kembali pada rotor yang kemudian mengakibatkan raedan magnet yang dihasilkan makin besar dan tegangan AC akan naik dan begitii seterusnya, sampai dicapai tegangan nominal dari generator AC tersebut. Penyearah tersebut jnga mempunyai *pengatm/contwller* sehingga tegangan generator dapat diatur konstan. Bersama dengan penyearah, blok tersebut sering disebut AVR (*Aittomatic Vohage RegulatorfPengatur Tegangan Otomatis*).

3. Generator tanpa sikat (*Bmssless Generator*)

Pada prinsipnya, generator tanpa sikat (*brushless*) menggunakan generator AC kecil sebagai *excher*. Generator AC kecil ini mempunyai kutub luar, yang artinya arus searah yang diperlukan untuk menimbulkan medan magnet diberikan pada bagian yang tidak berputar (stator), sedangkan rotor terdiri dari kumparan bolak-balik.

Pada poros generator ini diletakkan juga penyearah (*rectifier*) yang turut berputar bila mesin diputar. Sama dengan *static rectifier generator*, pada mulanya dalam generator tanpa sikat ini dibangkitkan tegangan karena magnet sisa, yang menimbulkan tegangan AC kecil saja. Tegangan ini diserahkan dan dimasukkan pada kutub generator AC yang kecil (di stator) maka timbul arus bolak-balik pada generator AC kecil (*exciter*) di rotornya. Tegangan AC ini dimasukkan pada penyearah yang terdapat pada poros (tunit berputar) dan langsung dimasukkan pada rotor utara, akibatnya timbul tegangan AC yang lebih besar pada stator utama yang akan dipakai untuk menguatkan *exciter* sehingga timbul tegangan yang lebih besar dan seterusnya.

Generator ini mempunyai keuntungan, yaitu tidak ada *sikat/brush*. Dengan kata lain, kerugian yang diakibatkan adanya gesekan menjadi kecil, tetapi penggerak utama diberi beban ekstra, yaitu *exciter* AC kecil.

1.4. Generator AC Berbeban

Jika generator serempak belum berbeban, maka EMF (E) yang dibangkitkan pada kumparan jangkar yang ada di stator sama dengan tegangan terminalnya (V). Waktu generator berbeban, maka EMF (E) tersebut di atas tidak sama dengan tegangan terminalnya, tegangan terminal akan bervariasi karena :

1. Jatuh tegangan [*voltage drop*] karena resistansi jangkar (R_a) sebesar $I R_a$. Tahanan jangkar per fasa (R_a) menyebabkan tegangan drop per fasa yang besarnya $I R_a$ dan tegangan drop ini akan sefasa dengan arus I . Pada kenyataannya, tegangan ini sangat kecil karena R_a kecil.

2. Jatuh tegangan karena reaktans bocor (X_L) dari jangkar sebesar $I X_L$. Bila ada arus yang mengalir pada kumparan jangkar, maka akan ada fluks yang tidak melewati celah udara, fluks tersebut adalah fluks bocor.

Fluks bocor tersebut tergantung dari besar arus I dan juga sudut fasa terhadap tegangan V . Fluks bocor ini menimbulkan emf induksi yang dikenal dengan nama "emf reaktans" yang mendahului arus I dengan sudut sebesar 90° . Karena itu, kumparan jangkar dianggap mempunyai reaktans bocor X_L (reaktans potier X_p) yang besarnya $I X_L$.

Pada generator AC, sebagian tegangan yang dihasilkan digunakan untuk mengatasi drop ini. Secara matematik, dapat ditulis sebagai berikut:

$$E = V + I(R_a + jX_s) \quad (2.3)^s$$

3. Jatuh tegangan karena reaksi jangkar sebesar ($I X_a$).

Reaksi jangkar adalah efek dari fluks jangkar, karena adanya arus" yang mengalir pada kumparan jangkar, pada fluks medan utama. Aras tersebut akan menimbulkan medan yang melawan medan utama

sehingga seolah-oleh jangkar mempunyai reaktansi sebesar X_a . Reaktansi bocor (X_L) dan reaktansi karena reaksi jangkar (X_a) akan menimbulkan reaktansi sinkron sebesar (X_s) yang mengikuti persamaan berikut:

$$X_s = X_L + X_a \quad (2.4)^6$$

Dalam generator AC, *power factor* (p.f. atau faktor daya) mempunyai faktor yang sangat besar pada reaksi jangkar. Ada beberapa keadaan dari power factor, yaitu :

- a. Bila p.f. dari beban = 1

Dalam hal ini, yang terjadi adalah medan jangkar melintang. Akibatnya fluks pada akhir kutub (sisi akhir) akan berkurang, sedangkan fluks pada ujung muka akan bertambah. Hal ini menyebabkan tegangan yang terinduksi akan mempunyai distorsi.

- b. Bila p.f. dari beban adalah nol dan *lagging* (tertinggal)

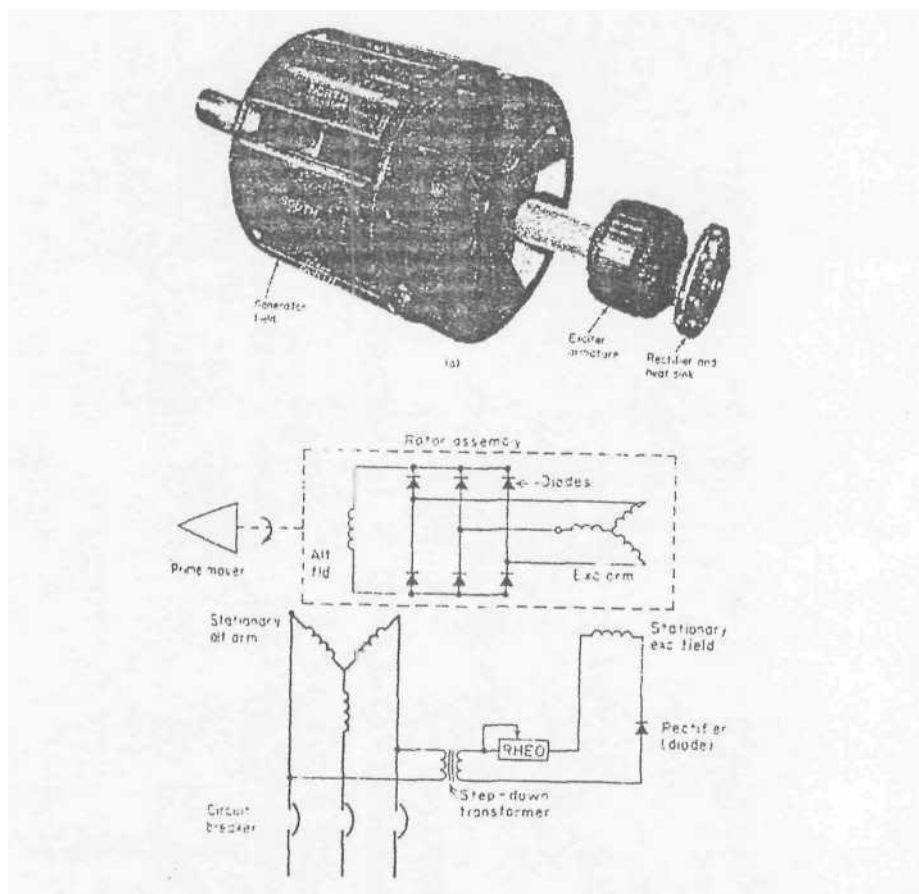
Dalam hal ini, medan jangkar sudah bergeser 90° dan ini menyebabkan medan jangkar melawan/berlawanan dengan medan utama. Akibat dari ini, tegangan yang dihasilkan akan lebih rendah dan untuk membuat agar tegangan konstant, maka arus eksitasi harus dinaikkan.

- c. Bila p.f. beban = nol dan *leading* (mendahului)

Dalam hal ini, gelombang fluks jangkar sudah digeser 90° . Karena medan jangkar searah dengan medan utama, maka

efeknya adalah memperkuat medan utama. Untuk menjaga tegangan tetap pada beban dengan p.f. *leading*, maka arus eksitasi atau medan utama dari generator sinkron harus dikurangi.

- d. Untuk p.f. diantara kedua ekstrim diatas akibat reaksi jangkar adalah distorsi pada tegangan dan juga penurunan tegangan bila p.f. adalah *lagging*.



Gambar 2.3⁷

Sistem Generator AC taipa sikat. (a) Rotor Assembly (b) Diagram

Dasar Sederhana dari Kontrol Sirkuit Manual

1.5. Pengaturan Tegangan (*Voltage Regulation*)

Tegangan pada terminal dari generator sinkron tergantung dari beban yang terpasang dan juga faktor daya (*power factor*) beban tersebut. Pengaturan tegangan (*voltage regulation*) dari suatu generator sinkron didefinisikan sebagai perubahan tegangan dari beban nol ke beban penuh dengan menjaga eksitasi (penguatan) tetap dan juga putaran tetap. Pengaturan tegangan ini dinyatakan dalam persen (%) dari tegangan nominal dan perbedaan tegangan bukan secara vektor, tetapi besaran.

$$\text{Regulasi \%} = [(E_0 - V) / V] \times 100 \% \quad (2.5)^8$$

Untuk beban induktif (*p.f. lagging*) regulasi yang diperoleh positif.

Cara menentukan pengaturan tegangan untuk mesin-mesin kecil dapat diperoleh dengan cara langsung, yaitu generator sinkron diputar pada kecepatan nominal, eksitasi diatur sehingga menghasilkan tegangan nominal V pada beban penuh, kemudian baban dilepas dengan menjaga agar putaran tetap konstan, selain itu arus eksitasi juga harus dijaga konstan. Dengan demikian, maka akan diperoleh harga tegangan nol (E_0) dengan regulasi tegangan seperti pada rumus diatas.

Untuk mesin yang besar, metoda menentukan regulasi dengan cara langsung sering kali tidak dapat dilakukan. Maka regulasi tegangan diperoleh dengan cara tak langsung, yaitu :

1. Metoda impedans (X_s) sinkrun atau emf

⁸ Ir, Berahim, Hamzah, *Teknik Tenaga Listrik*, Andi Offset, Yogyakarta, 1996. Hal.176

2. Metoda mmf
3. Metoda Potier atau p.f. nol

Cara-cara tersebut memerlukan data :

- a. R jangkar atau tahanan stator

Tahanan jangkar atau stator diperoleh dengan mengukur secara langsung. Tetapi pada keadaan kerja harga Ra naik karena pengaruh “*Skin Effect*”, harga Ra sebenarnya bisa naik kira-kira 60%. Jadi biasanya Ra yang diukur dikalikan faktor 1,6.

- b. Karakteristik beban nol atau *open circuit*

Mesin diputar pada putaran nominal, lalu digambar hubungan antara arus eksitasi dan tegangan jepit.

- c. Karakteristik hubung singkat (p.f. = Nol untuk metode Portier)

Dengan menghubungkan singkatkan kumparan stator melalui amperemeter. Arus eksitasi diatur hingga diperoleh arus stator satu atau dua kali nominal. Selama test ini kecepatan yang mungkin bukan kecepatan sinkron harus dijaga konstan.

1.6. Hubungan Belitan dalam Generator AC

Hubungan belitan ini menggambarkan hubungan belitan antara rotor dan stator. Jenis hubungan belitan di dalam generator AC dibagi menjadi dua macam ,yaitu hubungan delta (Δ) dan hubungan star (Y), seperti yang ditunjukkan pada tabel hubungan belitan dibawah ini.

Tabel 2.r
Hubungan Belitan

Connection	Current	Voltage
Bintang (Y)	$I_{line} = I_{phasa}$	$V_{line} = 1,73 V_{phasa}$
Delta (Δ)	$I_{line} = 1,73 I_{phasa}$	$V_{line} = V_{phasa}$

2. TNVERTER

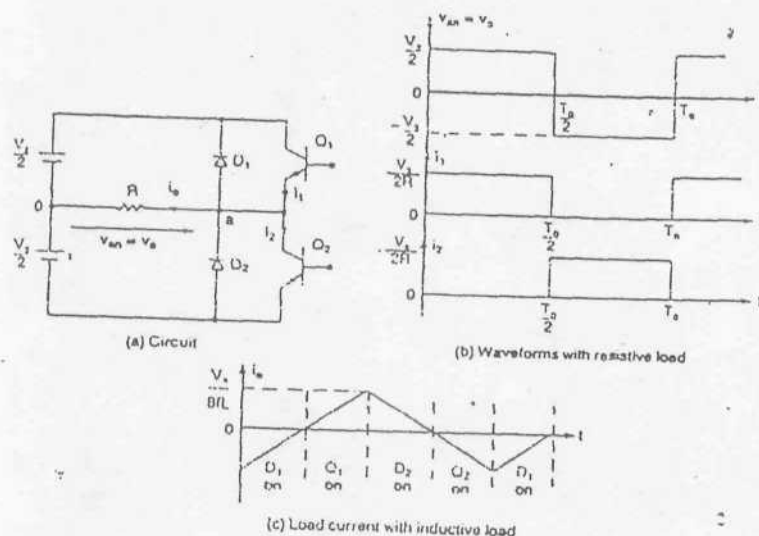
Inverter berfungsi untuk mengubah tegangan input DC menjadi tegangan output AC yang simetris secara magnitude dan frekwensi.

Tegangan output variabel atau pada variabel frekwensinya dapat diperbaiki. Tegangan output variabel dapat diperoleh dengan mengubah tegangan input DC dan mengatur gain konstan pada inverter. Sebaliknya, jika input tegangan DC tetapi tidak dikontrol, tegangan output variabel dapat diperoleh dengan mengatur gain inverter yang dimana hal tersebut dapat dicapai dengan hasil yang normal melalui Pulse Width Modulation (PWM) meter yang terdapat pada inverter. Gain inverter dapat didefinisikan sebagai rasio tegangan output AC terhadap tegangan input DC.

Gelombang tegangan output (waveforms) pada inverter seharusnya sinusoidal, namun pada prakteknya yang terjadi adalah non sinusoidal dan sering terdapat harmonisa. Untiik aplikasi daya rendah dan medium dapat memakai tegangan dengan gelombang square-wave atau quasi-square-wave, dan untuk aplikasi daya tinggi, gelombang sinusoidal dengan distorsi rendah dapat diterima.

2.1. Prinsip Kerja Inverter Satu Phasa

Prinsip kerja inverter satu phasa dapat dilihat pada gambar 2.4a. Sirkuit inverter terdiri atas dua chopper. Ketika transistor Q1 menyala pada waktu $T_0/2$, dengan segera tegangan yang melewati beban V_O adalah $V_s/2$. Jika transistor Q2 hanya dinyalakan pada waktu $T_0/2$, $-V_s/2$ tampak melewati beban. Sirkuit logika seharusnya didesain dengan tidak menyalakan Q1 dan Q2 secara bersamaan. Gambar 2.4b. Memperlihatkan gelombang tegangan output dan arus transistor dengan beban resistive. Inverter ini bisa mendapat tiga sumber DC, dan jika sebuah transistor mati, maka hal tersebut akan membalikkan tegangan V_s menjadi $V_s/2$. Inverter ini dapat kita sebut sebagai half-bridge inverter.



Gambar 2.4¹⁰

Inverter Half Bridge Satu Phasa

¹⁰ Rashid. H. Muhammad, Power Electronics, Circuits, Devices and Application. Hal. 227.

Untuk beban induktif, arus beban tidak dapat diganti dengan tegangan output secara tepat. Jika Q1 mati pada $t = T/2$, arus beban akan mengalir secara continue pada D2, pada beban dan kurang dari setengah sumber DC hingga arus mencapai nol. Untuk penjelasan lebih dekat, ketika Q2 mati pada $t = T$, arus beban mengalir pada D1, pada beban dan lebih dari setengah sumber DC. Ketika dioda D1 dan D2 dialiri, maka energi kembali pada sumber DC dan dioda itu disebut feedback diode. Sebuah transistor hanya dapat mengalirkan untuk $T/2$ atau 90° , tergantung dari power factor. Periode pengaliran transistor akan bervariasi dari 90° hingga 180° .

Transistor dapat digantikan dengan GTOs atau forced-commutated thyristor. Jika t_{off} mati pada thyristor, pasti ada waktu delay minimum t_{off} antara thyristor outgoing dan firing pada saat thyristor incoming. Selain itu, kondisi short circuit akan berhasil melewati dua thyristor. Oleh sebab itu, waktu pengaliran maksimum thyristor akan menjadi $T/2 - t_{off}$. Pada prakteknya, meskipun transistor menerima beberapa waktu hidup dan mati, untuk kesuksesan operasi inverter, hendaknya mengambil hal tersebut sebagai acuan.

2.2. Inverter Bridge Satu Fasa

Pada gambar 2.5a, inverter ini mengandung 4 dioda, Ketika transistor Q1 dan Q2 hidup secara bersamaan, tegangan input V_s melewati beban. Ketika transistor Q3 dan Q4 hidup pada saat yang bersamaan, tegangan yang melewati beban adalah reverse dan tegangan

menjadi $-V_s$. Tegangan output dapat dilihat pada gambar 2.5b, dan mempunyai nilai :

$$V_0 = \sum_{n=1,2,3} [(4V_s) / (n \pi)] \sin \omega t \quad (2.6)^{11}$$

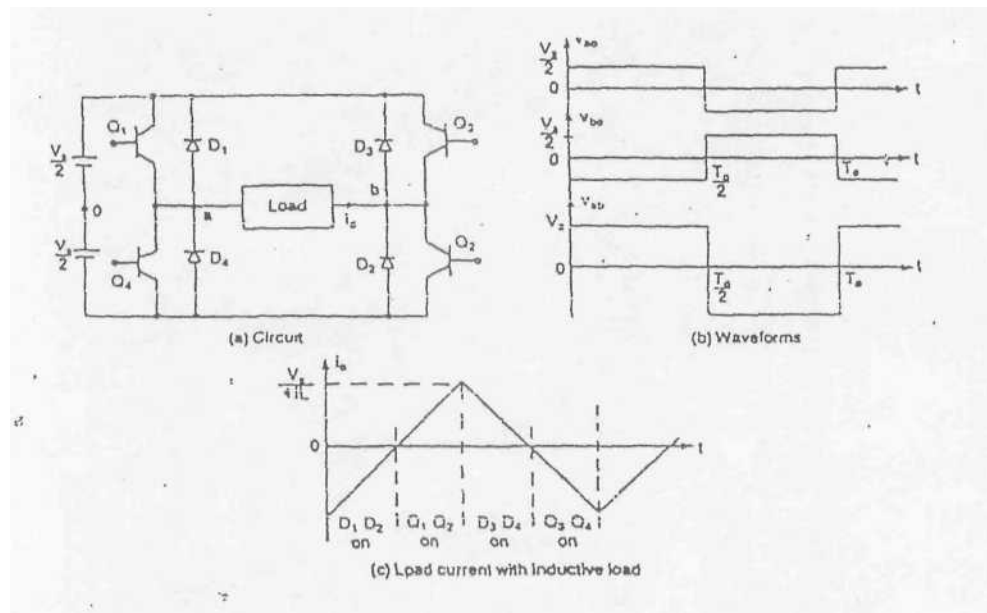
Ketika dioda D1 dan D2 mengkonduksi, energi kembali pada sumber DC dan disebut sebagai feedback. Untuk tegangan revers blocking puncak seluruh transistor dan kualitas tegangan output untuk inverter half-bridge maupun full-bridge adalah sama. Bagaimanapun juga inverter full-bridge dengan beban resistif, daya outputnya empat kali lebih besar dan komponen dasarnya juga lebih banyak dari inverter half-bridge.

Pada sistem tertentu dan peralatan pada pesawat terbang, biasanya membutuhkan tegangan sebesar 26 volt dan frekuensi 400 Hz, dengan suplai AC, dan selain itu juga adayang membutuhkan tegangan 115 volt dengan frekuensi 400 Hz. Untuk mencapai itii semua hanis raenggunakan inverter.

Inverter pada pesawat besar biasanya hanya digunakan untuk saat darurat. Dalam hal ini, *engine-driver generator (alternator)* dari pesawat menjadi sumber suplai dari sumber AC selama pengoperasian pada kondisi normal. Jika semua generator AC mengalami masalah, inverter akan digunakan untuk mengkonversikan baterai yang memiliki sumber

¹¹ Ibid. Hal. 228.

DC untuk menghasilkan sumber AC yang dapat menjalankan peralatan essential.



Garabar2.5¹²

Inverter Full Bridge Satu Fasa

Banyak pesawat kecil (ringan) yang menggunakan *static inverters* selama kondisi pengoperasian normal. Pesawat ini membutuhkan sedikit sumber AC, jadi untuk mencukupi kebutuhan listrik mereka, biasanya menggunakan generator DC atau *alternators*.

Ada dua macam tipe dari inverter yang biasa digunakan pada pesawat terbang, yaitu *rotary* dan *static* inverter.

1. Rotary Inverter

"

Rotary inverter terdiri dari motor DC yang digerakkan oleh generator AC. Rotor dari motor dan *alternator* diseimbangkan secara dinamis dan

¹² Ibid. Hal. 230.

diletakkan di batang yang sama, begitu juga dengan kipas yang digunakan untuk menghasilkan udara pendingin.

Motor yang digunakan memiliki empat kutub, kompartemen, kumparan medan yang terkorapensasi dan sebuah *wave-wound armature* (lilitan jangkar). Lilitan pengatur pada salient pole dari *alternator* menjaga agar bentuk gelombang output tetap pada kondisi pengoperasian pada fasa tunggal.

Inverter ini memerlukan tegangan input 26 hingga 29 volt DC dengan output yang dihasilkan 115 volt, satu fasa atau 115 volt, tiga fasa dengan frekwensi 400 Hz untuk semua fasa yang dihasilkan.

2. Static Inverter

Static inverter bisa juga disebut solid-state inverter mempunyai fungsi yang sama dengan inverter lain. Namun, tidak ada komponen yang bergerak dan oleh karena itu lebih praktis perawatannya jika dibandingkan rotary inverter.

Static inverter terdiri dari komponen standart dan komponen listrik seperti diode kristal, transistor, kapasitor dan trafo. Inverter ini menghasilkan frekwensi 400 Hz. Arus yang timbul dialirkan melalui trafo dan difilter untuk menghasilkan bentuk gelombang dan tegangan yang diinginkan. Inverter ini memerlukan tegangan 18 hingga 30 volt DC dan menghasilkan output 115 volt AC, satu fasa dengan frekwensi 400 Hz.

3. BATERAI

Baterai adalah sebuah sel elektrokimia yang digunakan untuk merubah energi kimia menjadi energi listrik. Pada dasarnya, setiap sel adalah dua logam atau konduktor-konduktor yang tak sama, yang dicelupkan dalam cairan penghantar. Tipe dasar dari baterai dikelompokkan menjadi dua jenis, yaitu primer dan sekunder.

Sel primer tidak dapat diubah secara kimia. Dengan demikian, sel-sel tersebut tidak dapat diisi ulang dan harus dibuang bila sudah habis atau tidak berguna lagi, yang dimana material aktifnya dikonsumsi selama baterai tersebut dipakai atau selama baterai tersebut menghasilkan listrik.

Sel sekunder dapat disebut sebagai sel penyimpan, yang didalam pemakaiannya dapat diisi ulang dan material aktifnya tidak dikonsumsi saat pakai. Pengisian atau charge ulang dilakukan dengan langsung menghubungkannya dengan arus listrik pada arah yang berlawanan.

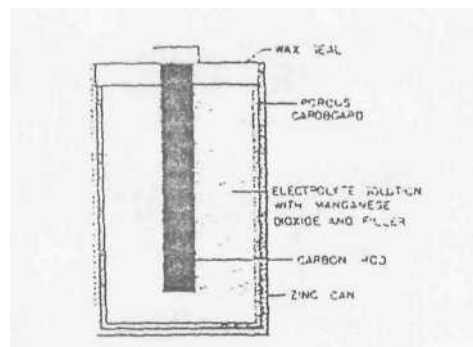
3.1. Sel Primer

Jika konduktor yang tak sama ditempatkan didalam larutan-larutan yang akan bereaksi secara kimia dengan salah satu konduktor maka akan dihasilkan gaya gerak listrik antara kedua konduktor. Konduktor tersebut dinamakan plat atau elektrode, dan larutannya disebut elektrolit.

Jika electrode dihubungkan oleh konduktor, maka arus akan mengalir dari electrode yang satu ke electrode yang lainnya melalui konduktor, kemudian melalui elektrolit. Elektrode dari mana arus meninggalkan sel disebut elektrode positif dan yang lainnya disebut

elektrode negatif. GGL (gaya gerak listrik) yang dihasilkan dalam setiap sel tergantung dari bahan elektrode dan elektrolit yang digunakan, misalnya elektrode dari seng dan timah hitam ditempatkan dalam larutan asam sulfat (H_2SO_4), GGL yang dihasilkan kira-kira 0,5 V. Seng dan air raksa oksida dalam kalium hidroksida kira-kira 1,35 V. Seng dan mangan oksida dalam kalium hidroksida kira-kira 1,5 V. Ukuran dan jarak elektrode tidak mempengaruhi GGL yang dihasilkan, tetapi mempengaruhi karakteristik lain dari sel.

Sel primer kerap kali dikategorikan berdasarkan penggunaan tertentu. Kelakuan sel primer bergantung pada kondisi penggunaannya seperti temperatur, kecepatan pengosongan, dan apakah pengosongan tersebut terus-menerus atau berselang-selang. Contoh dari sel primer adalah sel kering seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6 adalah tipe sel primer yang umum, yang mempunyai batang karbon sebagai anoda atau terminal positif dan sebuah kontainer zinc sebagai katoda atau terminal negatif.



Gambar 2.6¹³

Konstruksi Sel Kering Sederhana

¹³ Eismen, Thomas K, *Aircraft Electricity & Electronics*, McGraw-Hill International Editions, Fifth Edition. Chap. 3. Hal. 31

3.2. Sel Sekunder atau Penyimpanan

Sel yang keadaan fisik dan kondisi kimiawi dari electrode dan elektrolitnya dapat disimpan kembali dengan mengisinya disebut sel sekunder atau penyimpan (*storage cell*). Pengisian sel yang demikian, raelwatkan arus melalui sel dalam arah yang berlawanan dengan aliran arus pengosongan. Dalam pemakaian, ada beberapa macam sel penyimpan dan yang paling umum yaitu asam timbal (lead-acid) dan nikel-cadrnium-alkaline.

Seperti dalam sel primer, GGL sel sekunder bergantung pula pada bahan yang digimakan untuk elektrode dan elektrolit. Tegangan terminal rata-rata dari sel asam timbal kira-kira 2 V, sedangkan sel nikel-cadmium-alkaline kira-kira 1,2 V. Kapasitas sel untuk ketebalan tertentu tergantung pada luas total plat, makin besar luas plat maka semakin besar kapasitasnya. Sel tipe mi pada umumnya terdapat pada baterai nikel-cadmium. Dalam sel nikel-cadmium, bahan aktif terpenting dalam plat positif adalah nikel hidroksida dan plat negatif adalah cadmium hidroksida. Elektrolitnya adalhd kalium hidroksida. Selama pengisian atau pengosongan, praktis tidak ada perubahan berat jenis elektrolit. Satu-satunya fungsi elektrolit c.dalah beq)eran sebagai konduktor untuk mengalihkan ion hidroksil (paitikel bermuatan listrik) dari satu plat ke plat yang lainnya tergantung pada apakah sel itii sedang diisi atau dikosongkan.

Tegangan pengosongan rata-rata setiap sel dari baterai nikel-cadmium adalah 1,2 V. Tetapi tegangan setiap sel dapat mencapai 1,40 ~

14 V jika sel tetap dijaga pada keadaan terisi penuh oleh alat pengisi. Sepuluh sel membentuk baterai 12 V yang biasanya diisi pada tegangan 14 V.

Baterai ini mempunyai karakteristik, antara lain biaya pemeliharaannya rendah, umurnya panjang dan andal pada kondisi kerja yang berat. Baterai ini dapat dibiarkan menganggur dalam waktu yang lama dalam setiap keadaan muatan tanpa menjadi aus. Selain itu, baterai ini juga tidak akan beku sekalipun dalam kondisi kosong sama sekali. Sel tertutup dan baterai mempunyai harapan hidup lebih dari 300 ~ 500 kali pengisian dan pengosongan pada kondisi kerja normal. Harapan hidup sel berlubang dalam kerja daur diperkirakan lebih dari 2000 kali.

3.3. Aplikasi Baterai Penyimpan

Penggunaan yang sangat penting dari baterai penyimpanan adalah untuk melengkapi daya siap pakai untuk berbagai sistem kelistrikan. Dalam beberapa sistem kelistrikan, baterai penyimpanan dihubungkan secara paralel dengan generator dan beban. Jika generator dalam keadaan bekerja, baterai menarik cukup arus untuk menjaga agar ia tetap terisi penuh. Jika generator berhenti, baterai yang mencatu beban. Baterai juga merupakan bagian penting dari catu daya yang tak boleh diinterupsi.

Dalam instalasi generator pembangkit listrik bolak-balik, baterai penyimpanan digunakan untuk memberi energi bagi peralatan pengendali, dan selama generator berhenti dan irat, digunakan untuk mencatu lampu atau beban berat darurat lainnya.

3.4. Pengisian Baterai

Selama proses charge (pengisian baterai), arus dilewatkan baterai dengan arah yang berlawanan dengan proses discharge (melepaskan muatan/listrik). Oleh karena itu, terminal negatif baterai harus tersambung pada terminal negatif sumber tegangan. Ketika proses pengisian listrik (*charging*) berlangsung dari sebuah sumber AC, sebuah *rectifier*, unit motor-generator atau sumber lain yang lainnya berhubungan langsung harus digunakan. Ketika proses pengisian satu atau lebih baterai dalam rangkaian seri, kutub positif baterai yang satu harus tersambung pada kutub baterai negatif yang lainnya.

4. KABEL

Kabel umumnya dibuat dari sebuah konduktor yang terdiri dari sekumpulan kawat tunggal yang disatukan untuk memberikan fleksibilitas yang lebih besar, dan ditutup dengan pelindung luar dan badan isolasi. Kabel bisa berupa tipe inti tunggal, yaitu dengan inti-inti yang digabung sebagai sebuah konduktor tunggal, juga bisa tipe multi inti yang memiliki sejumlah kabel inti tunggal dalam pelindung luar yang umum.

Kawat dan kabel dirancang dan dibuat untuk digunakan pada kondisi lingkungan tertentu dan kondisi lingkungan ini menjadi dasar dari penyeleksian kabel. Ini menjamin fungsi sistem konsumen dan distribusi, selain itu juga membantu meminimalkan resiko kebakaran serta kerusakan struktur dalam segala bentuk kegagalan

Kabel yang digunakan untuk sistem elektrik pada pesawat diukur berdasarkan *American Wire Gage (AWG)*. Ukuran dari kabel merupakan **fungsi** dari diameter dan diindikasikan dengan unit yang disebut *circular mil*. Satu circular mil sama dengan 0,001 inci dari diameter kabel seluruhnya, diukur dalam ribuan dalam satu inci

Sedangkan *square mil* adalah unit ukuran untuk konduktor berbentuk persegi, seperti busbar. Satu *square mil* adalah ukuran untuk konduktor persegi yang memiliki sisi 0,001 inch dari panjangnya.

Pada pesawat ada dua prinsip yang diperlukan dalam menentukan kabel, yaitu kawat harus bisa mengalirkan arus yang dibutuhkan tanpa mengalami overheating dan terbakar, selain itu juga tidak boleh ada voltage drop dari ketentuan yang diijinkan.

Tabel 2.2¹⁴

Voltage Drop Maximum Yang Diijinkan

Nominal system voltage	Allowable voltage drop	
	Continuous operation	Intermittent operation
14	0.5	1.0
28	1.0	2.0
115	4.0	8.0
200	7.0	14.0

Pada pesawat, pemilihan kabel ditentukan dari beberapa syarat¹⁵, yaitu :

1. Tentukan aliran arus yang dibutuhkan, apakah arus mengalir secara terus-menerus (continuous) atau terputus-putus (intennittent). Dalam hal ini, continuous berarti arus mengalir lebih dari 2 menit, sedangkan untuk intermittent aliran arus berselang tiap 2 menit atau kurang dari 2 menit.
2. Tentukan tegangan yang digunakan, apakah 200, 115, 28 atau 14 volt.
3. Tentukan panjang kabel yang dibutuhkan. Panjang kabel adalah panjang dari bus ke load.
4. Tentukan arus maksimum yang mengalir pada rangkaian. Arus maksimura ini ditentukan berdasarkan rating arus dari circuit breaker.
5. Temukan titik potong dari garis diagonal (arus) dan garis horizontal (panjang kabel). Jika titik potong berada di atas kurva yang menggambarkan instalasi kabel, temukan ukuran kabel berdasarkan titik potong ini.
6. Jika ukuran kabel berada diantara dua garis vertikal (dua ukuran kabel), pilih ukuran kabel yang lebih besar (angka yang lebih kecil).
7. Jika garis horizontal yang dipilih memotong kurva terlebih dahulu atau belum menemukan titik potong dengan garis diagonal, maka titik potong ditentukan dengan mengikuti kurva ke arah kanan hingga menemukan titik potong yang diinginkan.

¹⁵ Eismín, Thomas K, *Aircraft Electricity & Electronics*, McGraw-Hill International Editions, Fifth Edition. Chap. 4. Hal. 58.

8. Pada umiranya, kabel yang besar tidak akan berdampak merugikan pada aplikasi yang terpasang, namun jika kabel terlalu kecil maka dapat mengakibatkan panas (overheating).

Tabel 2.3¹⁶

Kapasitas, Berat, dan Resistansi untuk

Stranded Copper Electric Wire

Wire size, AWG	Maximum amperes		Resistance Ω /1000 ft (20°C)	Area, cmil	Weight, lb/1000 ft
	Free air	Conduit or bundled			
20	11	7.5	10.25	1.119	5.6
18	16	10	6.44	1.779	8.4
16	22	13	4.76	2.409	10.8
14	32	17	2.99	3.830	17.1
12	41	23	1.98	6.088	25.0
10	55	33	1.10	10.443	42.7
8	73	46	0.70	16.864	69.2
6	101	60	0.436	26.813	102.7
4	135	80	0.274	42.613	162.5
2	181	100	0.179	66.832	247.6
1	211	125	0.146	81.807	288.0
0	245	150	0.114	104.118	382
00	293	175	0.090	133.665	482
000	328	200	0.072	167.332	620
0000	380	235	0.057	211.954	770

Tabel 2.4¹⁷

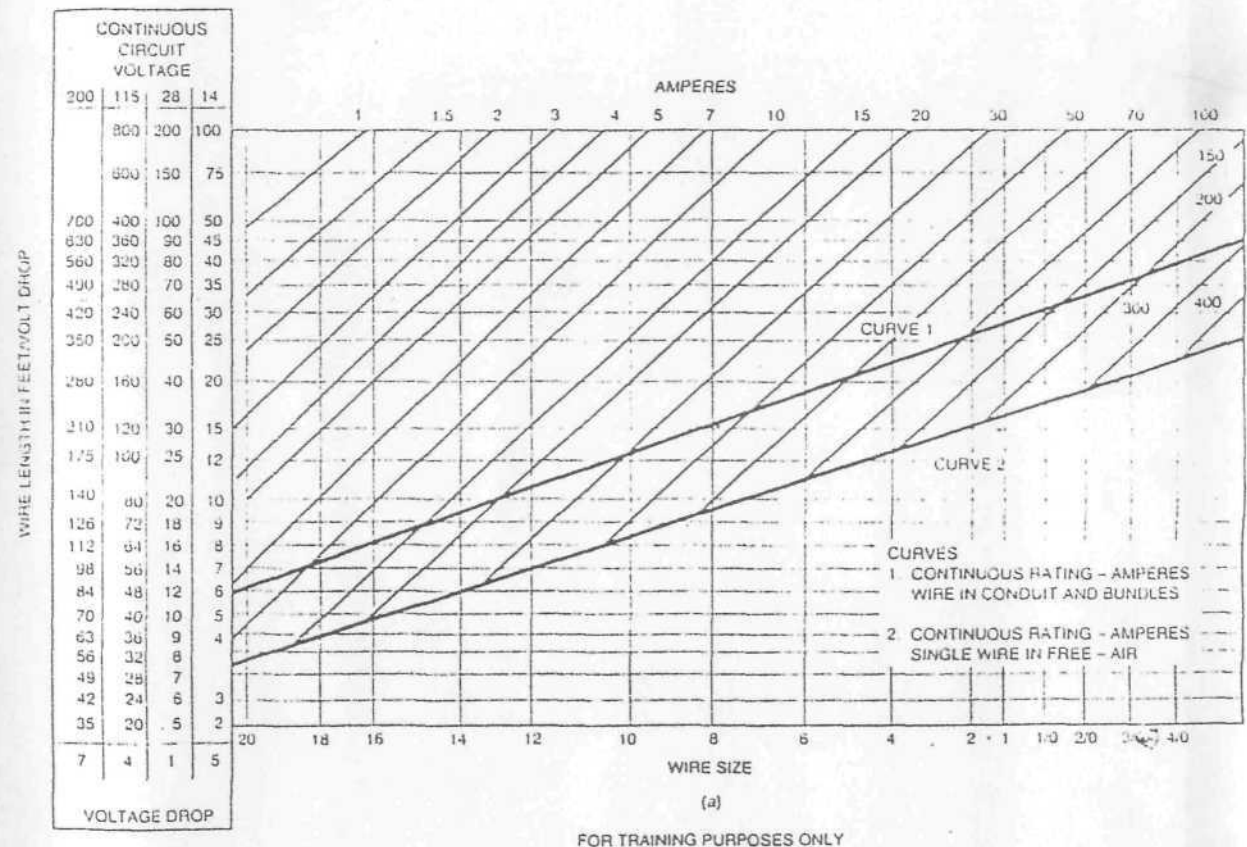
Tabel Proteksi Kabel dan Kawat

Wire AN gage: copper	Circuit breaker, A	Fuse, A
22	5	5
20	7.5	5
18	10	10
16	15	20
14	20	15
12	25(30)*	20
10	35(40)	30
8	50	50
6	80	70
4	100	70
2	125	100
1		150
0		150

¹⁶ Ibid. Hal. 59.¹⁷ Ibid. Hal. 100.

Grafik Pemilihan Kabel

Gambar 2.7¹⁸



5. ALTERNATOR

5.1. Alternator Pesawat Terbang

Ada dua tipe *alternator* yang biasanya digunakan pada pesawat terbang, yaitu *alternator* DC dan *alternator* AC. *Alternator* DC banyak dijumpai pada pesawat terbang ringan (kecil) dimana beban listrik yang dibutuhkan relatif kecil. *Alternator* AC banyak dijumpai pada pesawat-pesawat komersial yang besar dan berbagai macam pesawat militer. Sejak pesawat terbang membutuhkan banyak tenaga listrik, penggunaan sistem AC menciptakan tingkat berat yang aman, yang sangat penting bagi penerbangan. Dengan menggunakan *transformator*, transmisi dari tenaga listrik AC dapat dihasilkan dengan lebih efektif dengan menggunakan peralatan yang lebih ringan. Dengan transmisi listrik tegangan tinggi dengan arus yang rendah, *power loss* dapat ditekan seminimum mungkin.

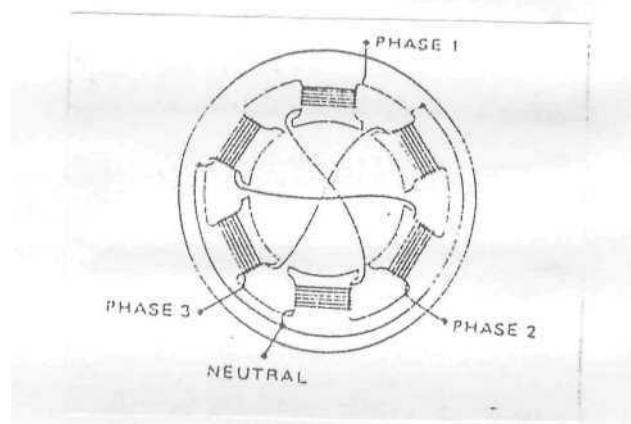
Pada pesawat yang besar, tenaga AC digunakan langsung untuk menjalankan fungsi sistem kelistrikan pada pesawat untuk sistem kontrol dan motor listrik yang nantinya digunakan untuk menyuplai berbagai macam alat. Pada pesawat terbang kecil, sebagian besar dari peralatan listriknya dioperasikan pada tegangan DC 14 V atau 28 V. Jika sejumlah kecil dari arus AC dibutuhkan untuk peralatan yang spesifik, maka digunakan inverter untuk mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC. Tegangan AC kemudian digunakan untuk menyuplai alat-alat yang khusus menggunakan arus AC untuk keperluan pengoperasiannya.

Hampir semua *altemator* untuk sistem pembangkit pada pesawat menggunakan konstruksi *rotating field* dan sebuah *stationary armature*. Sejak tegangan *steady* digunakan sebagai pembangkit tegangan pada sistem listrik pada pesawat, kuat medan dari altemator berbeda-beda tergantung dari kebutuhan beban. Untuk itu, maka digunakan regulator yang dapat mengontrol arus DC yang berubah-ubah yang mengalir pada kumparan rotor dari *altemator*, selain itu sistem voltage regulator (pengatur tegangan) digunakan untuk mengubah arus ini sesuai kebutuhan untuk menjaga agar output dari *alternator* tetap konstan.

Alternator pesawat dan generator memiliki kesamaan, misalnya sama-sama digunakan untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Perbedaan yang utama adalah banyaknya desain yang ada. Sejak generator memiliki *rotating armature*, semua arus output langsung disuplai melalui komutator dan *brush* (sikat). Sedangkan *alternator*, memiliki *armature* yang *stationary* (tetap), dapat mensuplai arus melalui hubungan langsung pada bus pesawat. Sistem dari hubungan langsung output *alternator* pada bus dapat mencegah/menghilangkan masalah-masalah atau problem yang disebabkan jeleknya hubungan antara *rotating commutator* dan *stationary brushes*. Pada level tegangan tinggi, *rotating contact* sangatlah tidak efisien untuk dipraktekkan, karena itu, *alternator* lebih disukai untuk digunakan pada kebanyakan pesawat terbang.

5.2. Prinsip dari Alternator Pesawat Terbang

Alternator pesawat lebih menggunakan unit tiga fasa daripada type fasa tunggal (*single phase*). Hal ini menunjukkan bahwa stator (*stationary armature*) memiliki tiga kumparan yang terpisah dengan sudut yang berbeda sebesar 120° . Medan berputar yang disebut rotor. Pada gambar 2.8 menunjukkan bagaimana kumparan stator disusivn, meskipun susuoan kumparan pada stator sebenarnya tampak agak sedikit berbeda.

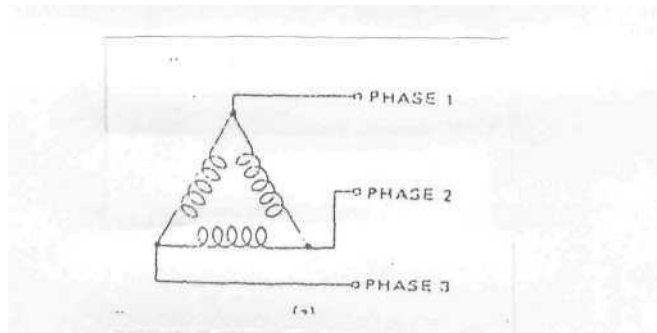


Gambar 2.8¹⁹

Kumparan Stator Hubungan Star (Y)

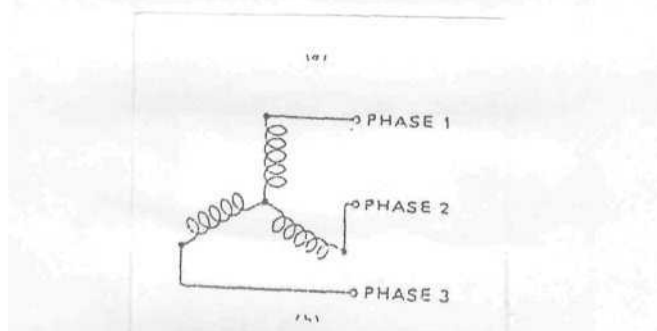
Selain itu, kumparan pada stator juga dihubungkan dengan dua macam jenis hubungan, yaitii hubungan Y (*Y-connected*) dan hubungan delta (*A-connected*), seperti yang tampak pada gambar 2.9.

¹⁹ Eismin, Thomas K, *Aircraft Electricity & Electronics*, McGraw-Hill International Editions, Fifth Edition. Chap. 11. Hal. 211



Gambar 2.9²⁰

Diagram dari Stator Hubungan Delta (Δ)



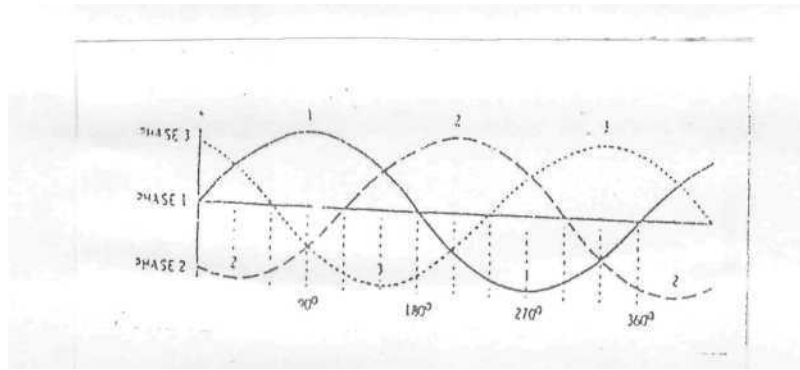
Gambar 2.10²¹

Hubungan Star (Y)

Output yang dihasilkan oleh *alternator* tiga fasa merupakan gelombang sinusoidal (Gambar 2.10.). Terlihat bahwa ada tiga bagian tegangan 120° yang terpisah, dan setiap tegangan mencapai harga maksimum pada arah yang sama di titik 120° yang terpisah. Selama rotor dari alternator berputar, tiap fasa berputar penuh sebesar 360° dari putaran dimana tiap-tiap tegangan mencapai maksimum pada satu arah, melewati nol (*zero*), mencapai maksimum pada arah yang berlawanan, dan kemudian kembali mulai dari titik 360° .

²⁰ Ibid

²¹ Ibid



Gambar2.11

Output dari Altenator 3 Fasa

6. PEMUTUS

Fungsi dari komponen-komponen ini adalah untuk merautuskan atau menghubungkan rangkaian pada saat berbeban atau tidak berbeban serta akan membuka dalam keadaan terjadi gangguan arus lebih atau arus hubungan singkat. Jadi berbeda dengan saklar biasa, pemutus dapat berfungsi sebagai saklar pada kondisi normal ataupun tidak serta dapat memutus arus lebih dan arus hubimg singkat.

Arus lebih maupun arus hubung singkat dapat merusak peralatan dan instalasi suplai daya jika dibiarkan mengalir dalam kondisi yang cukup lama.

Pemutus secara mekanis dirancang memiliki selang waktu pemutusan dan penyambingan secara singkat/cepat agar dapat memperkecil keraimgkinan terjadinya lompatan bungan api pada saat proses pemutusan atau penyambungan berlangsung. Biinga api yang timbul pada saat switching ini bila tidak diredam akan menimbulkan kerusakan terutama pada koraponen-komponen kontak pemutus.

Dalam perannya sebagai pemutus dalam keadaan rangkaian sedang dilalui arus, pemutus juga dirancang dapat bekerja secara manual (dioperasikan dengan tenaga manusia, yaitu dengan menggunakan engkol/tuas) dan dapat juga bekerja secara otomatis pada saat terjadi gangguan setelah mendapat perintah dari sistem pengaman *relay*. Jadi pengaman dapat bekerja secara normal maupun tidak normal, secara otomatis maupun tidak otomatis (manual).

Rating pengaman²² ditentukan oleh :

1. Besarnya rating arus (*current carrying capacity*) dari bahan konduktor busbar-nya.
2. Besarnya rating tegangan dan frekwensi phasanya.
3. Besarnya *interrupting current-nya* (besarnya arus yang mampu diputuskan oleh pemutus pada saat kutub pemutus terpisah pada saat awal pemutusan).
4. Besarnya *momentary duty rating current-nya* (besarnya arus maksimum tepat pada saat terjadinya hubung singkat).

Besarnya *breaking capacity-nya* (batas kapasitas kemampuan daya CB, yang besarnya ditentukan berdasarkan besarnya arus gangguan yang mengalir tersebut, ditentukan oleh besarnya impedansi equivalent saluran

pada lokasi gangguan terjadi). *Breaking Capacity* dihitung menurut

$$P = k I_{sw} U \sqrt{3} \quad (2.7)$$

Dimana : P = Breaking capacity

K = Faktor pengali (1,1 – 1,2)

²² Moelyono W, Nono, *Pengantar Sistem Distribusi Tenaga Listrik*, Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS. Surabaya. 1999. Hal. 79

Isw = Arus hubung singkat awal

U = Tegangan line

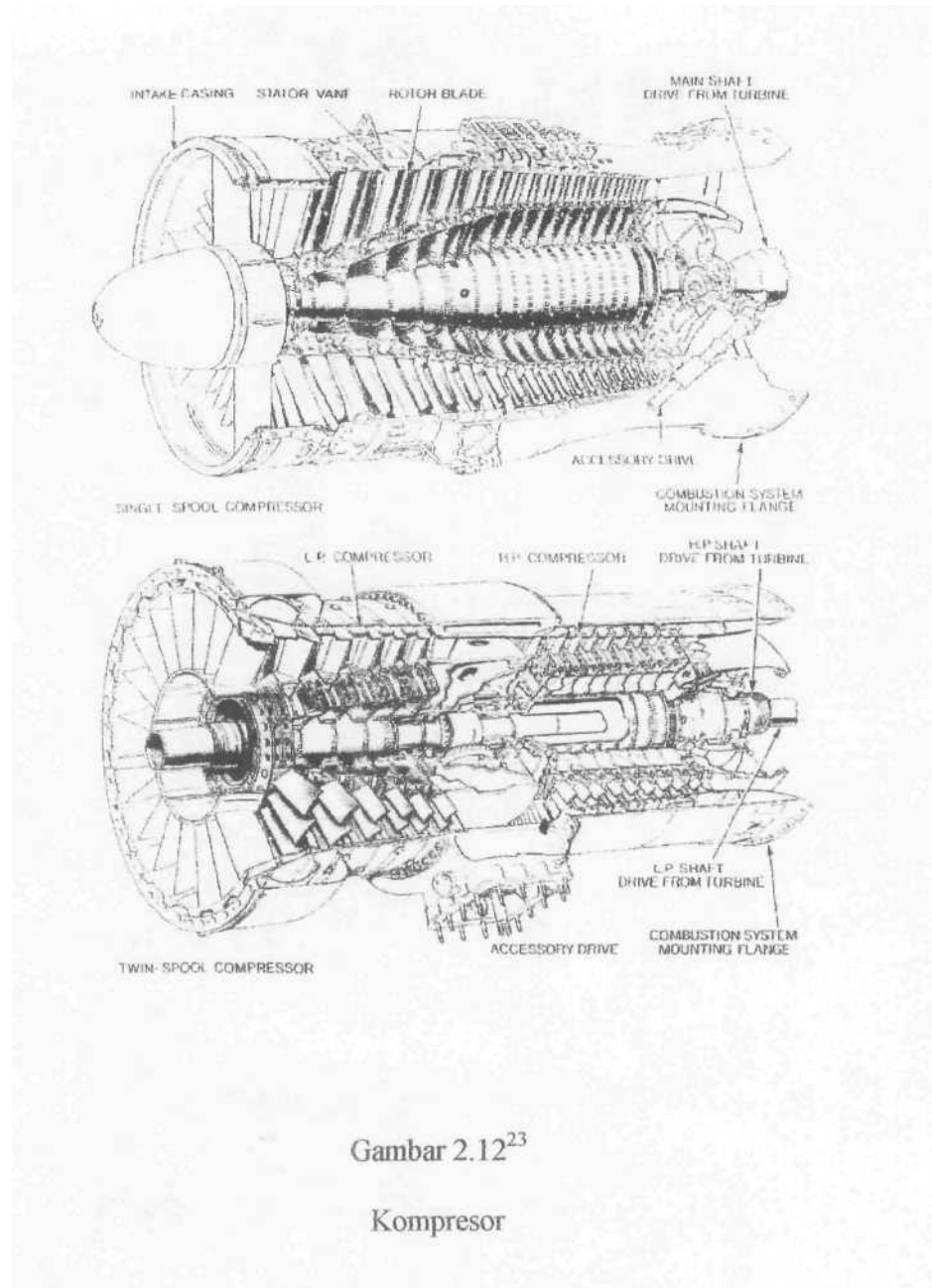
5. Besarnya *breaking time rating*-nya
6. Besar tingkat tegangan isolasinya (BIL)

7. TURBINGAS

Turbin gas merupakan suatu turbin dengan gas hasil pembakaran bahan bakar dan udara sebagai fluida kerja. Turbin gas juga disebut sebagai heat engine, karena merupakan penggerak mula yang mengubah energi panas menjadi energi mekanik. Turbin gas terdiri dari beberapa komponen, yaitu:

1. Kompresor

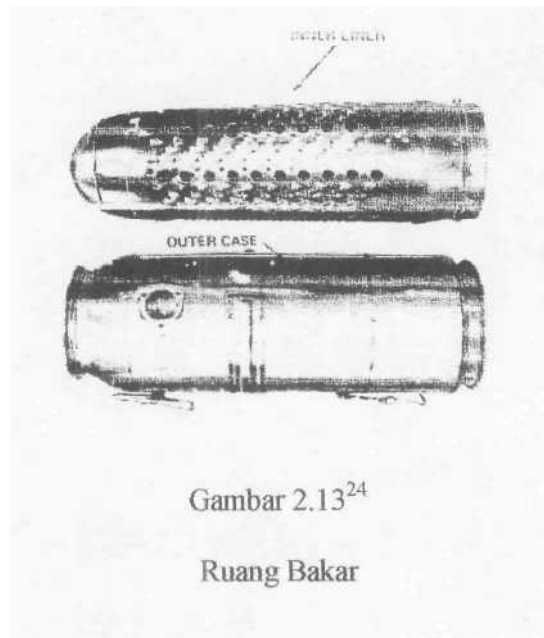
Komponen ini berfungsi untuk mengambil dan menekan udara hingga mencapai nilai kompresi tertentu sebelum udara tersebut dicampur secara merata dengan bahan bakar.



2. Ruang Bakar

Ruang ini merupakan ruang dimana udara yang terkompresi dari kompresor dibakar dengan bahan bakar (*fuel*).

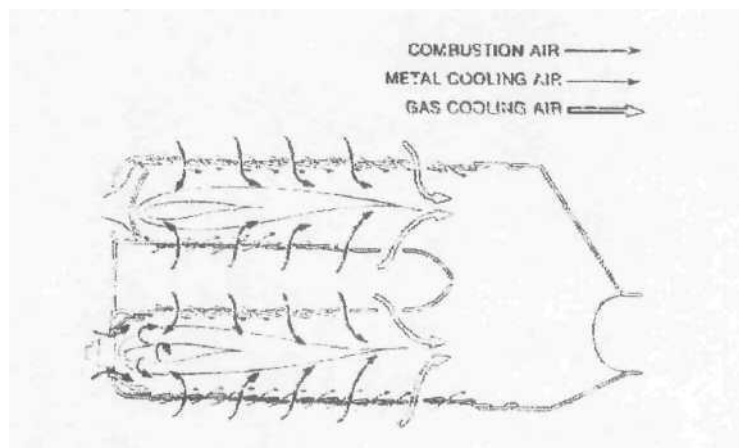
²³ Kroes, Michael J and Wild, Thomas W, *Aircraft Powerplants*, Glencoe Aviation Technology Series, 1995. Hal. 291

Gambar 2.13²⁴

Ruang Bakar

Udara yang terkompresi dari kompresor sebanyak 25% digunakan untuk pembakaran, sedangkan 10% hingga 15% lainnya masuk melalui bagian samping ruang bakar ke dalam bagian pertama zona pembakaran untuk menciptakan kecepatan re-sirkulasi yang rendah, dimana bahan bakar diinjeksikan. Sisanya dibagi dua, yang satu masuk ke tabung api mengurangi suhu gas sebelum masuk ke bagian turbin dan setengahnya lagi digunakan untuk melakukan pendinginan tabung api. Udara meninggalkan kompresor dengan kecepatan hingga 150 m/s.

²⁴ Ibid. Hal. 295



Gambar2.14²⁵

Proses Pencampuran Udara Terkompresi Dengan Bahati Bakar

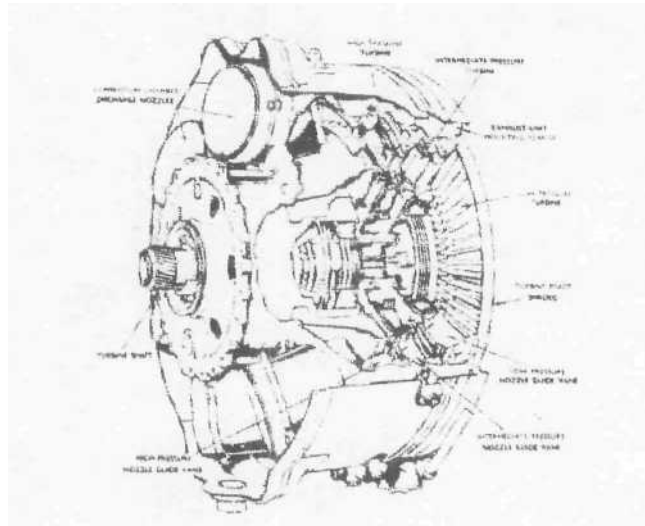
3. Turbin

Turbin merupakan komponen penggerak beban, terutama penggerak generator dalam sistem pembangkit listrik. Di dalam turbin ini terjadi perubahan energi dari energi panas diubah menjadi energi gerak.

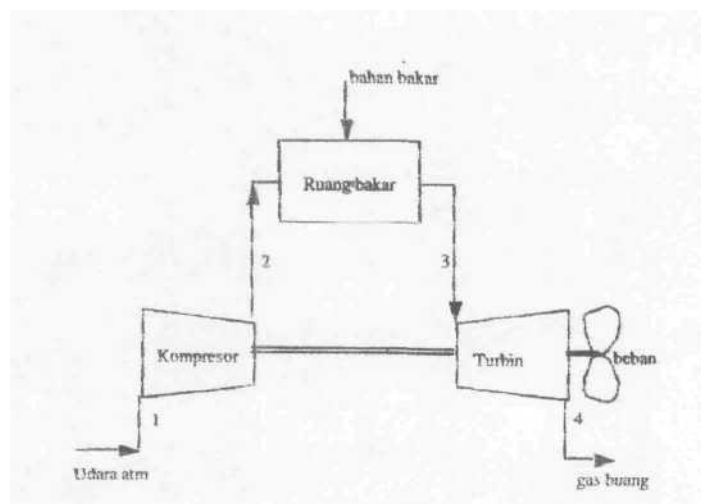
Proses kerjanya yaitu, gas panas yang berasal dari ruang bakar dipercepat dan diarahkan ke dalam rangkaian turbin yang menghasilkan tenaga untuk menggerakkan beban.

Prinsip kerja dari sistem turbin gas ini adalah memanfaatkan energi yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar untuk menaikkan energi total dari aliran udara yang melewati motor. Udara yang masuk dari sisi depan motor dikompresi di dalam kompresor dan masuk ke dalam ruang bakar dimana total energinya akan bertambah dengan pembakaran bahan bakar.

²⁵ Ibid.

Gambar 2.15²⁶

Turbin

Gambar 2.16²⁷

Prinsip Kerja Sistem Turbin Gas

²⁶ Dr. Tirtoatmodjo, Rahardjo. *Penggerak Mula*, Universitas Kristen Petra, Surabaya, 1996. Hal.145

²⁷ Ibid. Hal.133