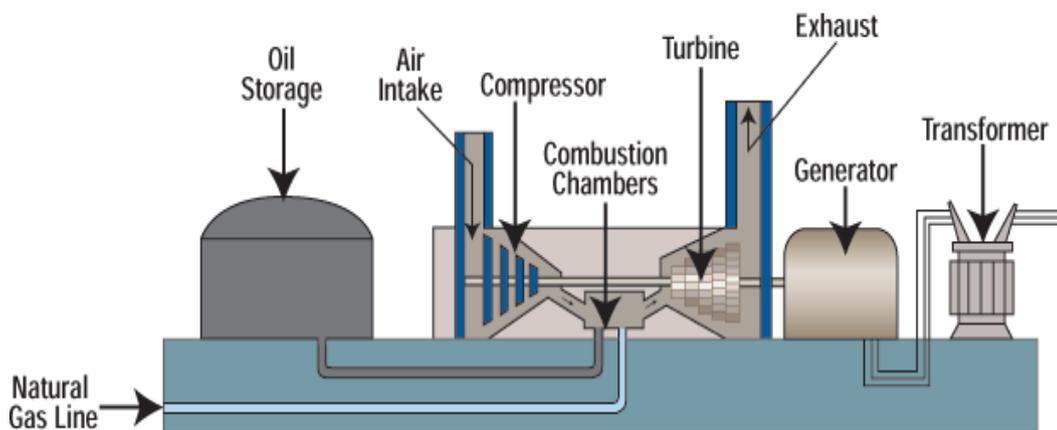


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Prinsip Operasi Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG)

Turbin gas suatu PLTG berfungsi untuk mengubah energi yang terkandung di dalam bahan bakar menjadi mekanis. Fluida kerja untuk memutar turbin gas adalah gas panas yang diperoleh dari proses pembakaran. Proses pembakaran memerlukan tiga unsur utama yaitu bahan bakar, udara dan panas. Skema proses pembangkitan generator turbin gas (GTG) dapat dilihat pada gambar 2.1 di bawah ini:



Gambar 2.1 Skema Proses Pembangkitan Generator Turbin Gas
(sumber: taufikkiilham.blogspot.com)

Udara masuk kedalam kompresor melalui saluran masuk udara (*Air Intake*). Kompresor berfungsi untuk menghisap dan menaikkan tekanan udara tersebut, sehingga temperatur udara juga meningkat. Kemudian udara bertekanan ini masuk kedalam ruang bakar (*Combustion Chamber*). Di dalam ruang bakar dilakukan proses pembakaran dengan cara mencampurkan udara bertekanan dan bahan bakar. Dalam proses pembakaran ini bahan bakar disuplai oleh pompa bahan bakar (*Fuel Oil pump*) apabila digunakan bahan bakar minyak, atau oleh kompresor gas apabila menggunakan bahan bakar gas alam. Pada umumnya kompresor gas disediakan oleh pemasok gas tersebut.

Proses pembakaran tersebut berlangsung dalam keadaan tekanan konstan sehingga dapat dikatakan ruang bakar hanya untuk menaikkan temperatur. Gas hasil pembakaran tersebut dialirkan ke turbin gas melalui suatu nozel yang berfungsi untuk mengarahkan aliran tersebut ke sudu-sudu turbin. Daya yang dihasilkan oleh turbin gas tersebut digunakan untuk memutar kompresornya sendiri dan memutar beban lainnya seperti generator listrik. Setelah melewati turbin ini gas tersebut akan dibuang keluar melalui saluran buang (*exhaust*).

Secara umum proses yang terjadi pada suatu sistem turbin gas adalah sebagai berikut:

- 1) Pemampatan (*compression*) udara di hisap dan dimampatkan
- 2) Pembakaran (*combustion*) bahan bakar dicampurkan ke dalam ruang bakar dengan udara kemudian di bakar.
- 3) Pemuaian (*expansion*) gas hasil pembakaran memuai dan mengalir ke luar melalui nozel (*nozzle*).
- 4) Pembuangan gas (*exhaust*) gas hasil pembakaran dikeluarkan lewat saluran pembuangan.

Pada kenyataannya, tidak ada proses yang selalu ideal, tetap terjadi kerugian-kerugian yang dapat menyebabkan turunnya daya yang dihasilkan oleh turbin gas dan berakibat pada menurunnya performa turbin gas itu sendiri. Kerugian-kerugian tersebut dapat terjadi pada ketiga komponen sistem turbin gas. Sebab-sebab terjadinya kerugian antara lain:

- 1) Adanya gesekan fluida yang menyebabkan terjadinya kerugian tekanan (*pressure losses*) di ruang bakar.
- 2) Adanya kerja yang berlebih waktu proses kompresi yang menyebabkan terjadinya gesekan antara bantalan turbin dengan angin.
- 3) Berubahnya nilai C_p dari fluida kerja akibat terjadinya perubahan temperatur dan perubahan komposisi kimia dari fluida kerja.
- 4) Adanya *mechanical loss*.

2.2. Komponen Utama Generator Turbin Gas

Turbin gas tersusun atas komponen-komponen utama seperti *air inlet section*, *compressor section*, *combustion section*, *turbine section*, dan *exhaust section*. Berikut ini penjelasan tentang komponen utama turbin gas:

1) ***Air Inlet Section***. Berfungsi untuk menyaring kotoran dan debu yang terbawa dalam udara sebelum masuk ke kompresor. Bagian ini terdiri dari:

1. *Air Inlet Housing*, merupakan tempat udara masuk dimana didalamnya terdapat peralatan pembersih udara.
2. *Inertia Separator*, berfungsi untuk membersihkan debu-debu atau partikel yang terbawa bersama udara masuk.
3. *Pre-Filter*, merupakan penyaringan udara awal yang dipasang pada *inlet house*.
4. *Main Filter*, merupakan penyaring utama yang terdapat pada bagian dalam *inlet house*, udara yang telah melewati penyaring ini masuk ke dalam kompresor aksial.
5. *Inlet Bellmouth*, berfungsi untuk membagi udara agar merata pada saat memasuki ruang kompresor.
6. *Inlet Guide Vane*, merupakan *blade* yang berfungsi sebagai pengatur jumlah udara yang masuk agar sesuai dengan yang diperlukan

2) ***Compressor Section***. Komponen utama pada bagian ini adalah *aksial flow compressor*, berfungsi untuk mengkompresikan udara yang berasal dari inlet air section hingga bertekanan tinggi sehingga pada saat terjadi pembakaran dapat menghasilkan gas panas berkecepatan tinggi yang dapat menimbulkan daya output turbin yang besar. *Aksial flow compressor* terdiri dari dua bagian yaitu:

1. *Compressor Rotor Assembly*. Merupakan bagian dari kompresor aksial yang berputar pada porosnya. Rotor ini memiliki 17 tingkat sudu yang mengompresikan aliran udara secara aksial dari 1 atm menjadi 17 kalinya

sehingga diperoleh udara yang bertekanan tinggi. Bagian ini tersusun dari *wheels, stubshaft, tie bolt* dan sudu-sudu yang disusun kosentris di sekeliling sumbu rotor.

2. *Compressor Stator*. Merupakan bagian dari casing gas turbin yang terdiri dari:

- a. *Inlet Casing*, merupakan bagian dari casing yang mengarahkan udara masuk ke inlet bellmouth dan selanjutnya masuk ke inlet guide vane.
- b. *Forward Compressor Casing*, bagian casing yang didalamnya terdapat empat stage kompresor blade.
- c. *Aft Casing*, bagian casing yang didalamnya terdapat kompresor blade tingkat 5-10.
- d. *Discharge Casing*, merupakan bagian casing yang berfungsi sebagai tempat keluarnya udara yang telah dikompresi.

3) **Combustion Section**. Pada bagian ini terjadi proses pembakaran antara bahan bakar dengan fluida kerja yang berupa udara bertekanan tinggi dan bersuhu tinggi. Hasil pembakaran ini berupa energi panas yang diubah menjadi energi kinetik dengan mengarahkan udara panas tersebut ke *transition pieces* yang juga berfungsi sebagai *nozzle*. Fungsi dari keseluruhan sistem adalah untuk mensuplai energi panas ke siklus turbin. Sistem pembakaran ini terdiri dari komponen-komponen berikut yang jumlahnya bervariasi tergantung besar *frame* dan penggunaan turbin gas. Komponen-komponen itu adalah :

1. *Combustion Chamber*, berfungsi sebagai tempat terjadinya pencampuran antara udara yang telah dikompresi dengan bahan bakar yang masuk.
2. *Combustion Liners*, terdapat didalam *combustion chamber* yang berfungsi sebagai tempat berlangsungnya pembakaran.
3. *Fuel Nozzle*, berfungsi sebagai tempat masuknya bahan bakar ke dalam *combustion liner*.
4. *Ignitors (Spark Plug)*, berfungsi untuk memercikkan bunga api ke dalam *combustion chamber* sehingga campuran bahan bakar dan udara dapat terbakar.

5. *Transition Pieces*, berfungsi untuk mengarahkan dan membentuk aliran gas panas agar sesuai dengan ukuran *nozzle* dan sudu-sudu turbin gas.
 6. *Cross Fire Tubes*, berfungsi untuk meratakan nyala api pada semua *combustion chamber*.
 7. *Flame Detector*, merupakan alat yang dipasang untuk mendeteksi proses pembakaran terjadi.
- 4) ***Turbin Section***. *Turbin section* merupakan tempat terjadinya konversi energi kinetik menjadi energi mekanik yang digunakan sebagai penggerak *compresor aksial* dan perlengkapan lainnya. Dari daya total yang dihasilkan kira-kira 60 % digunakan untuk memutar kompresornya sendiri, dan sisanya digunakan untuk kerja yang dibutuhkan. Komponen-komponen pada *turbin section* adalah sebagai berikut :
1. *Turbin Rotor Case*
 2. *First Stage Nozzle*, yang berfungsi untuk mengarahkan gas panas ke *first stage turbine wheel*.
 3. *First Stage Turbine Wheel*, berfungsi untuk mengkonversikan energi kinetik dari aliran udara yang berkecepatan tinggi menjadi energi mekanik berupa putaran rotor.
 4. *Second Stage Nozzle* dan *Diafragma*, berfungsi untuk mengatur aliran gas panas ke *second stage turbine wheel*, sedangkan diafragma berfungsi untuk memisahkan kedua *turbin wheel*.
 5. *Second Stage Turbine*, berfungsi untuk memanfaatkan energi kinetik yang masih cukup besar dari *first stage turbine* untuk menghasilkan kecepatan putar rotor yang lebih besar.
- 5) ***Exhaust Section***. *Exhaust section* adalah bagian akhir turbin gas yang berfungsi sebagai saluran pembuangan gas panas sisa yang keluar dari turbin gas. *Exhaust section* terdiri dari beberapa bagian yaitu : *Exhaust Frame Assembly* dan *Exhaust gas* keluar dari turbin gas melalui *exhaust diffuser* pada *exhaust frame assembly*, lalu mengalir ke *exhaust plenum* dan kemudian

didifusikan dan dibuang ke atmosfer melalui *exhaust stack*, sebelum dibuang ke atmosfer gas panas sisa tersebut diukur dengan *exhaust thermocouple* dimana hasil pengukuran ini digunakan juga untuk data pengontrolan temperatur dan proteksi temperatur trip. Pada *exhaust area* terdapat 18 buah termokopel yaitu, 12 buah untuk temperatur kontrol dan 6 buah untuk temperatur trip.

2.3. Komponen Penunjang Generator Turbin Gas

Adapun beberapa komponen penunjang dalam sistem turbin gas adalah sebagai berikut:

- 1) **Starting Equipment.** Berfungsi untuk melakukan *start up* sebelum turbin bekerja. Jenis-jenis *starting equipment* yang digunakan di unit-unit turbin gas pada umumnya seperti *diesel engine* (PG-9001 A/B), *induction motor* (PG-901 C/H dan KGT 4X01, 4X02 dan 4X03), dan *gas expansion turbine*.
- 2) **Coupling dan Accessory Gear.** Berfungsi untuk memindahkan daya dan putaran dari poros yang bergerak ke poros yang akan digerakkan. Ada tiga jenis *coupling* yang digunakan, yaitu:
 1. *Jaw Cluth*, menghubungkan *starting turbine* dengan *accessory gear* dan HP turbin rotor.
 2. *Accessory Gear Coupling*, menghubungkan *accessory gear* dengan HP turbin rotor.
 3. *Load Coupling*, menghubungkan LP turbin rotor dengan kompressor beban.
- 3) **Fuel System.** Bahan bakar yang digunakan berasal dari *fuel gas system* dengan tekanan sekitar 15 kg/cm². Fuel gas yang digunakan sebagai bahan bakar harus bebas dari cairan kondensat dan partikel-partikel padat. Untuk mendapatkan kondisi tersebut diatas maka sistem ini dilengkapi dengan *knock out drum* yang berfungsi untuk memisahkan cairan-cairan yang masih terdapat pada *fuel gas*.

4) **Lube Oil System.** *Lube oil system* berfungsi untuk melakukan pelumasan secara kontinu pada setiap komponen sistem turbin gas. *Lube oil* disirkulasikan pada bagian-bagian utama turbin gas dan trush bearing juga untuk accessory gear dan yang lainnya. *Lube oil system* terdiri dari:

1. Oil Tank (Lube Oil Reservoir)
2. Oil Quantity
3. Pompa
4. Filter System
5. Valving System
6. Piping System
7. Instrumen untuk oil

Pada turbin gas terdapat tiga buah pompa yang digunakan untuk mensuplai lube oil guna keperluan lubrikasi, yaitu:

1. *Main Lube Oil Pump*, merupakan pompa utama yang digerakkan oleh HP *shaft* pada *gear box* yang mengatur tekanan discharge lube oil.
2. *Auxiliary Lube Oil Pump*, merupakan pompa *lube oil* yang digerakkan oleh tenaga listrik, beroperasi apabila tekanan dari *main pump* turun.
3. *Emergency Lube Oil Pump*, merupakan pompa yang beroperasi jika kedua pompa diatas tidak mampu menyediakan *lube oil*.

5) **Cooling System.** Sistem pendingin yang digunakan pada turbin gas adalah air dan udara. Udara dipakai untuk mendinginkan berbagai komponen pada *section dan bearing*. Komponen-komponen utama dari *cooling system* adalah:

1. *Off base Water Cooling Unit*
2. *Lube Oil Cooler*
3. *Main Cooling Water Pump*
4. *Temperatur Regulation Valve*
5. *Auxiliary Water Pump*

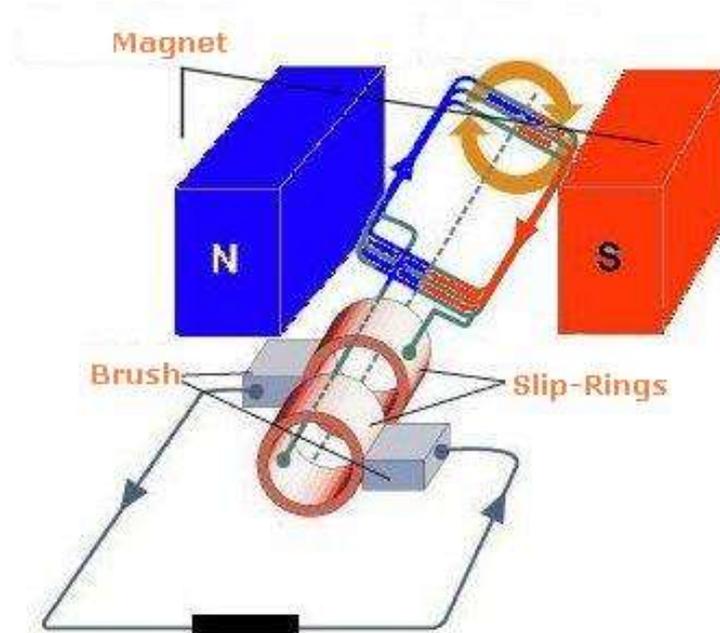
2.4. Generator

Generator adalah mesin yang dapat mengubah tenaga mekanis menjadi tenaga listrik melalui proses induksi elektromagnetik. Generator ini memperoleh energi mekanis dari *prime mover* atau penggerak mula.

Prinsip kerja dari generator sesuai dengan hukum Lenz, yaitu arus listrik yang diberikan pada stator akan menimbulkan momen elektromagnetik yang bersifat melawan putaran rotor sehingga menimbulkan EMF pada kumparan rotor.

2.4.1 Generator AC

Generator arus bolak-balik yang kadang-kadang disebut dengan generator sinkron atau alternator adalah sebuah peralatan listrik yang berfungsi untuk mengubah energi gerak (mekanis) menjadi energi listrik AC dimana kecepatan putaran medan dan kecepatan putaran rotornya sama atau tidak ada slip. Kumparan medan pada generator sinkron terletak pada rotornya sedangkan kumparan jangkarnya terletak pada stator. Berikut contoh generator AC yang ditunjukkan pada gambar 2.2 di bawah ini:



Gambar 2.2 Generator AC
(sumber: www.ncert.nic.in)

Pada mesin arus searah, kumparan medan yang berbentuk kutub sepatu merupakan stator (bagian tidak berputar) dan kumparan jangkar merupakan rotor (bagian yang berputar) bila kumparan jangkar berputar dalam medan magnet, akan dibangkitkan tegangan (ggl) yang berubah-ubah arah setiap setengah putaran, sehingga merupakan tegangan arus bolak-balik.

$$e = E_{\text{maks}} \sin \omega t \quad (2.1)$$

untuk tegangan arus searah diperlukan alat penyearah yang disebut komutator dan sikat.

2.4.2 Generator DC

Generator DC merupakan sebuah perangkat mesin listrik dinamis yang mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Prinsip pembangkitan tegangan induksi oleh sebuah generator diperoleh melalui dua cara:

- 1) Dengan menggunakan cincin-seret, menghasilkan tegangan induksi bolak-balik
- 2) Dengan menggunakan komutator, menghasilkan tegangan DC

Untuk tegangan induksi, berlaku hubungan:

$$E_a = Cn \phi \text{ Volt} \quad (2.2)$$

Keterangan:

ϕ = fluks per kutub

n = kecepatan rotasi per menit

$C = (p/a) \times (z/60) = \text{konstanta}$

P = jumlah kutub

Z = jumlah penghantar jangkar

Berdasarkan cara memberi fluks pada kumparan meannya, generator arus searah dapat dikelompokkan menjadi dua yaitu generator berpengaut bebas dan generator berpenguat sendiri.

1) Generator Berpenguat Bebas

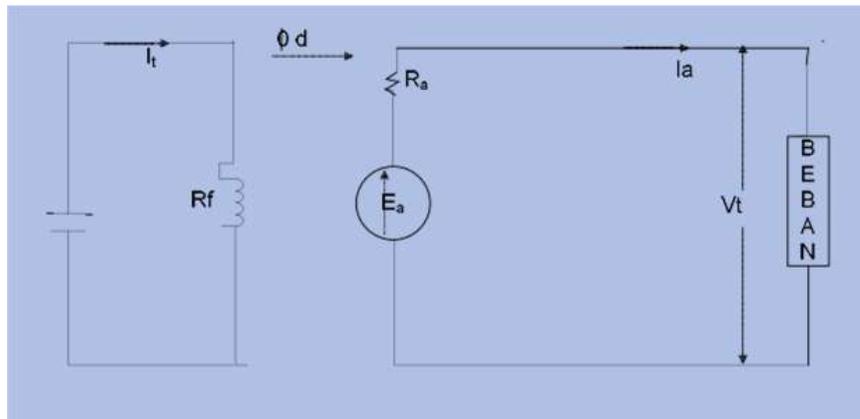
Tegangan searah yang ditetapkan pada kumparan medan magnet yang mempunyai tahanan R_f akan menghasilkan arus I_f dan menimbulkan fluks pada kedua kutub. Tegangan induksi akan dibangkitkan pada generator.

Jika generator dihubungkan dengan beban dan R_a adalah tahanan dalam generator maka hubungan yang dapat dinyatakan adalah:

$$V_f = I_f R_f \quad (2.3)$$

$$E_a = V_t + I_a R_a \quad (2.4)$$

Berikut merupakan gambar berpenguat bebas yang ditunjukkan pada gambar 2.3 di bawah ini:



Gambar 2.3 Rangkaian Generator Berpenguat Bebas

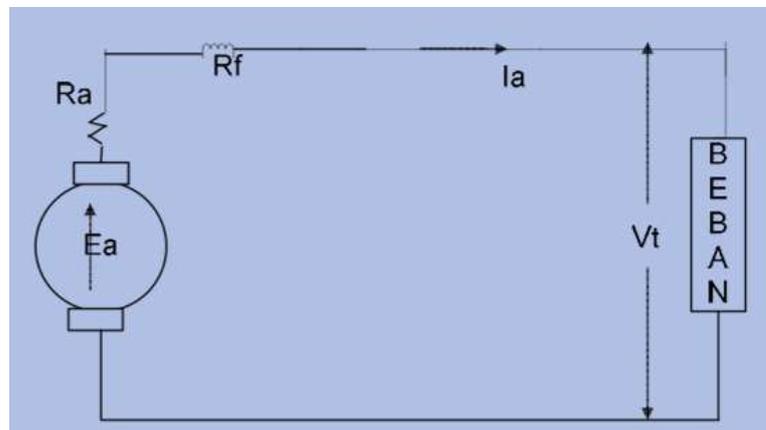
2) Generator Berpenguat Sendiri

Generator ini terdiri atas generator searah seri dan generator shunt. Untuk generator searah seri berlaku hubungan.

$$V_f = I_f R_f \quad (2.5)$$

$$E_a = I_a (R_a + R_f) + V_t \quad (2.6)$$

Gambar di bawah ini menunjukkan rangkaian generator seri:



Gambar 2.4 Rangkaian Generator Seri

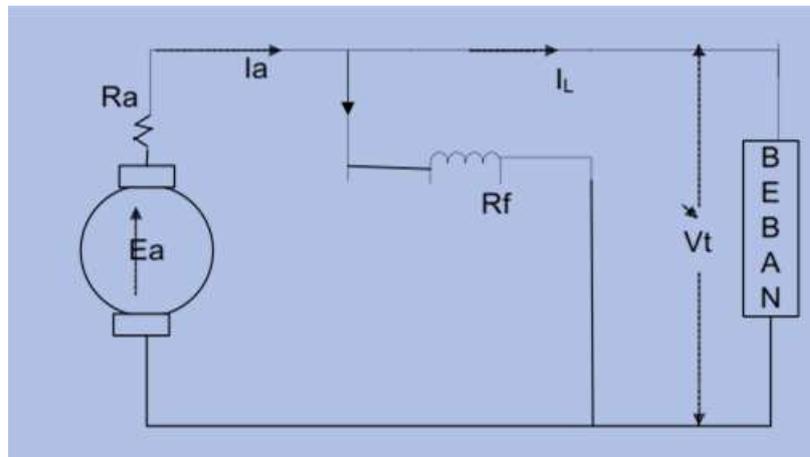
Untuk generator shunt berlaku hubungan:

$$V_f = I_f R_f \quad (2.7)$$

$$E_a = I_a R_a + V_t \quad (2.8)$$

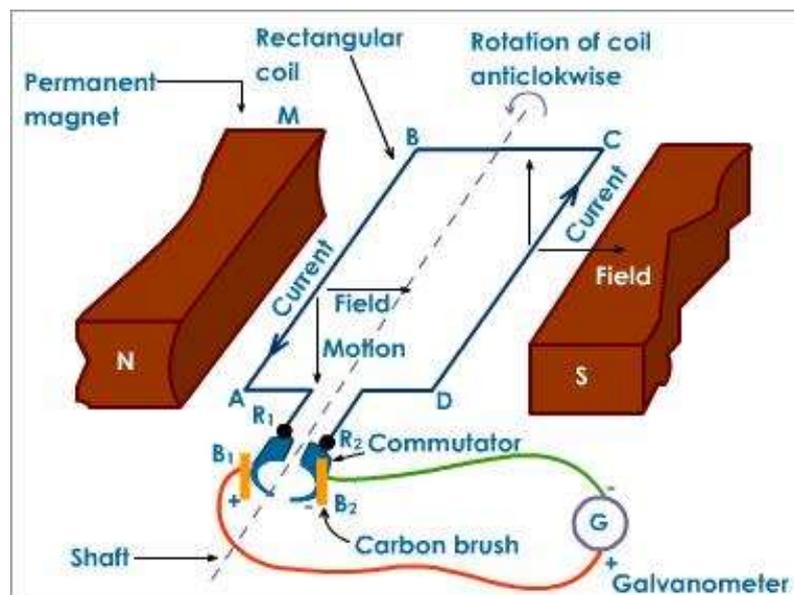
Gambar di bawah ini menunjukkan rangkaian generator shunt

:



Gambar 2.5 Rangkaian Generator Shunt

skema rangkaian generator DC secara keseluruhan dapat ditunjukkan pada gambar 2.6 di bawah ini:



Gambar 2.6 Generator DC
(sumber: www.tutorvista.com)

2.4.3 Pengaturan Tegangan Generator

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

Pengaturan generator ac didefinisikan sebagai presentase kenaikan tegangan terminal ketika beban dikurangi dari arus beban penuh ternilai sampai nol, dimana kecepatan dan eksitasi medan dijaga konstan.

Faktor-faktor yang mempengaruhi pengaturan generator adalah sebagai berikut:

1. Penurunan tegangan IR pada lilitan jangkar
2. Penurunan tegangan IX_L pada lilitan jangkar
3. Reaksi jangkar (Pengaruh magnetisasi dari arus jangkar)

Untuk menghitung tegangan yang dibangkitkan generator maka dapat dilihat dari persamaan berikut:

$$E_o = \sqrt{(V_t \cdot \cos\theta + I_a \cdot R_a)^2 + (V_t \cdot \sin\theta + I_a \cdot X_s)^2} \quad (2.9)$$

Dimana :

E_o = Tegangan yang dibangkitkan (Volt)

V_t = Tegangan per phasa (Volt)

I_a = Arus nominal (A)

R_a = Reaktansi

X_s = Induktansi

Untuk mengatasi generator terhindar dari beban lebih, maka diperlukan pengaturan tegangan beban atau presentase regulasi tegangan. Ada dua macam presentase regulasi tegangan, yaitu:

$$1. \text{Regulasi Naik} = \frac{E_o - V_t}{V_t} \times 100\% \quad (2.10)$$

$$2. \text{Regulasi Turun} = \frac{E_o - V_t}{E_o} \times 100\% \quad (2.11)$$

Keterangan:

E_o = Tegangan terminal atau tegangan output generator tanpa beban

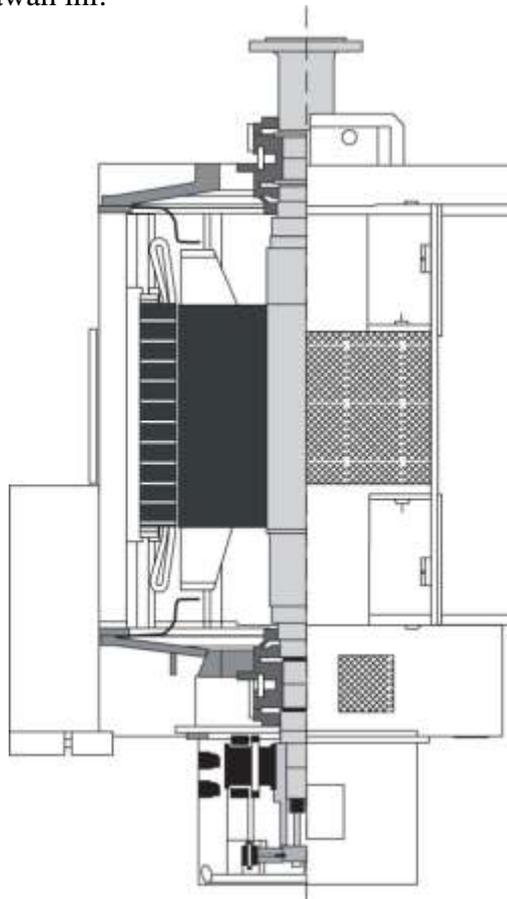
V_t = Tegangan terminal beban penuh

$$\text{Dimana, } = \mathbf{Vt} = \frac{\mathbf{VL}}{\sqrt{3}} \quad (2.12)$$

2.5. Turbin

Turbin adalah sebuah mesin berputar yang mengambil energi dari aliran fluida. Turbin sederhana memiliki satu bagian yang bergerak, “asembli rotor-blade” fluida yang bergerak menjadikan baling-baling berputar dan menghasilkan energi untuk menggerakkan rotor. Contoh turbin awal adalah kincir angin dan roda air.

Turbin gas, uap dan air biasanya memiliki “casing” sekitar baling-baling yang memfokus dan mengontrol fluid. “casing” dan baling-baling mungkin memiliki geometri variabel yang dapat membuat operasi efisien untuk beberapa kondisi aliran fluida, gambaran generator turbin secara umum dapat dilihat pada gambar 2.7 di bawah ini:

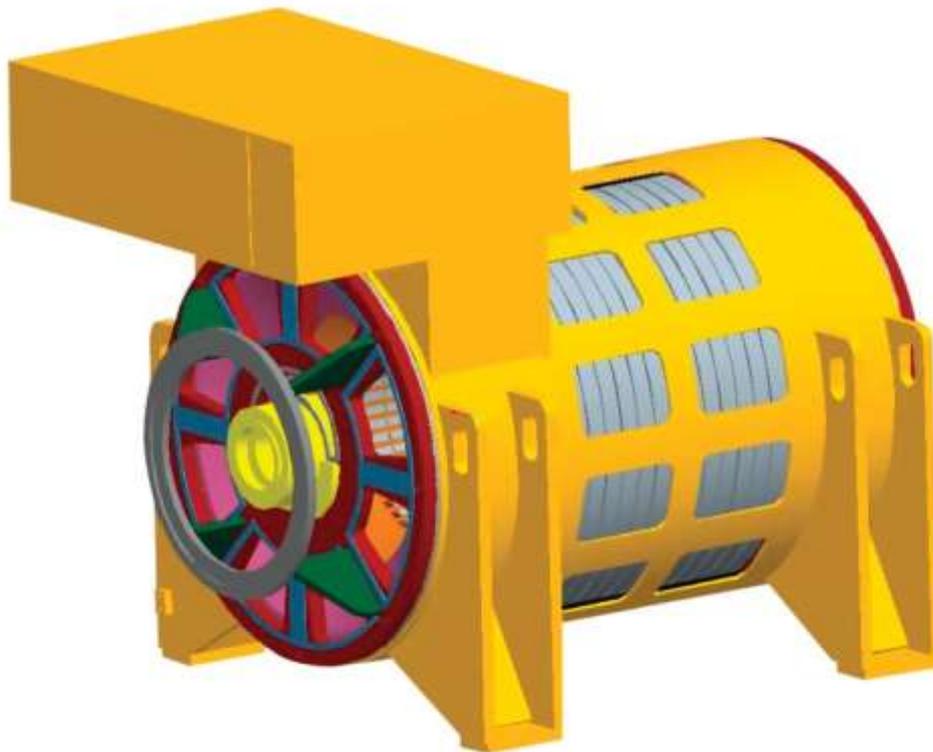


Gambar 2.7 Generator Turbin Secara Umum
(*sumber: manual book kato engineering inc*)

2.6. Stator

Stator adalah bagian dari generator yang tidak ikut berputar (diam) yang terdiri dari rangka stator, inti stator, dan gabungan kawat pada bagian inti stator. Pada inti stator dibuat alur-alur dalam arah aksial dan pada alur tersebut ditempatkan kumparan stator. Dari kumparan stator dihasilkan arus bolak-balik tiga phasa.

Kumparan stator dibuat dari tembaga yang diisolasi. Inti stator menyalurkan medan magnet yang polaritasnya selalu berubah sesuai dengan fungsi frekuensi arus bolak-balik (50 Hz). Untuk mengurangi arus pusar dan panas yang timbul, maka inti stator dibuat dari lempengan baja tipis dan isolasi satu terhadap yang lain. Berikut tampilan bingkai generator yang ditunjukkan pada gambar 2.8 di bawah ini:

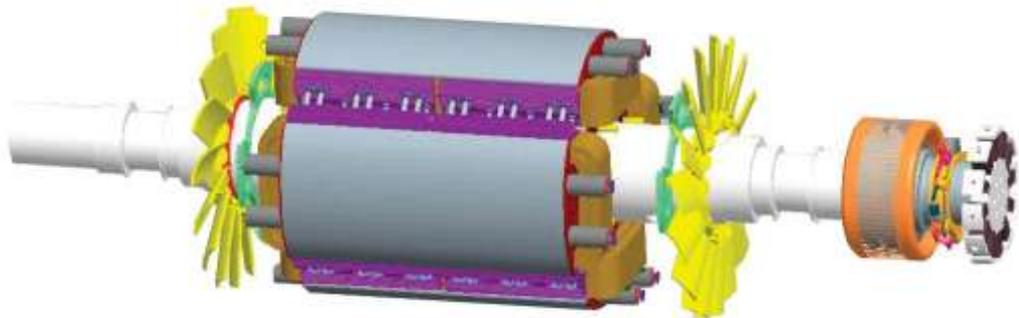


Gambar 2.8 Bingkai Generator
(sumber: manual book kato engineering inc)

2.7. Rotor

Rotor adalah bagian generator yang bergerak atau berputar. Antara rotor dan stator dipisahkan oleh celah udara (*air gap*). Rotor terdiri dari dua bagian umum yaitu inti kutub dan kumparan medan.

Pada bagian inti kutub terdapat poros dan inti rotor yang memiliki fungsi sebagai jalan atau jalur fluks magnet yang dibangkitkan oleh kumparan medan. Pada bagian medan ini juga terdapat dua bagian, yaitu bagian penghantar sebagai jalur untuk arus pemacuan dan bagian yang diisolasi. Isolasi pada bagian ini harus benar-benar baik dalam hal kekuatan mekanisnya, ketahanannya akan suhu yang tinggi dan ketahanannya terhadap gaya sentrifugal yang besar. Tampilan rotor generator dapat dilihat pada gambar 2.9 di bawah ini:

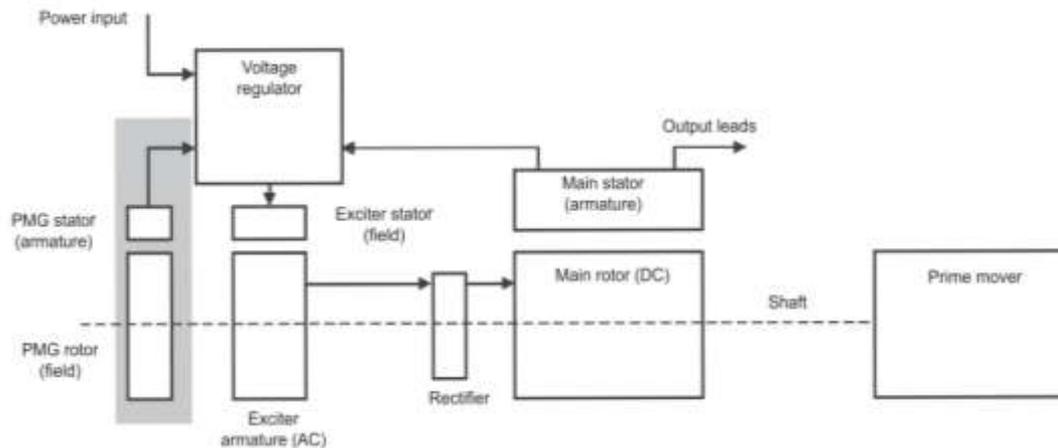


Gambar 2.9 Rotor Generator
(sumber: manual book kato engineering inc)

Rotor perakitan utama terpasang pada field. Ini terdiri dari gulungan dalam inti, yang pada gilirannya dipasang pada poros baja. Angker dari exciter perakitan dan permanen magnet generator (PMG) rotor juga dipasang pada poros seperti kipas (s) dan aksesoris opsional lainnya. Inti terdiri dari laminasi, lembaran tipis dari baja listrik, yang ditumpuk bersama-sama. Inti membuat tiang menonjol. Lihat Gambar 2.9 Gulungan rotor terdiri dari isolasi kawat magnet luka di sekitar setiap tiang. V-blok atau spreader bar antara masing-masing tiang menjaga rotor gulungan di tempat. Gulungan Damper terdiri dari tembaga atau aluminium batang yang dimasukkan melalui setiap permukaan tiang dan brazing untuk tembaga atau pelat aluminium peredam akhir pada setiap akhir laminasi stack.

2.8. Sistem Eksitasi

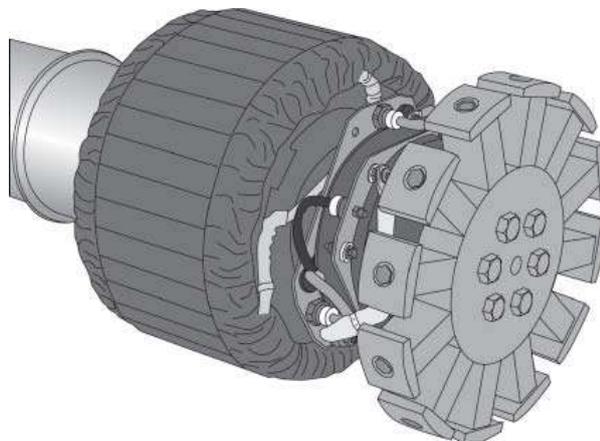
Sistem eksitasi beserta kontrol *Automatic Voltage Regulator* dapat di lihat pada gambar 2.10 di bawah ini:



Gambar 2.10 Sistem Eksitasi Beserta Kontrol AVR
(sumber: manual book kato engineering inc)

Sistem eksitasi adalah sistem pasokan listrik DC sebagai penguatan pada generator listrik atau sebagai pembangkit medan magnet, sehingga suatu generator dapat menghasilkan energi listrik dengan besar tegangan keluaran generator bergantung pada besarnya arus eksitasinya.

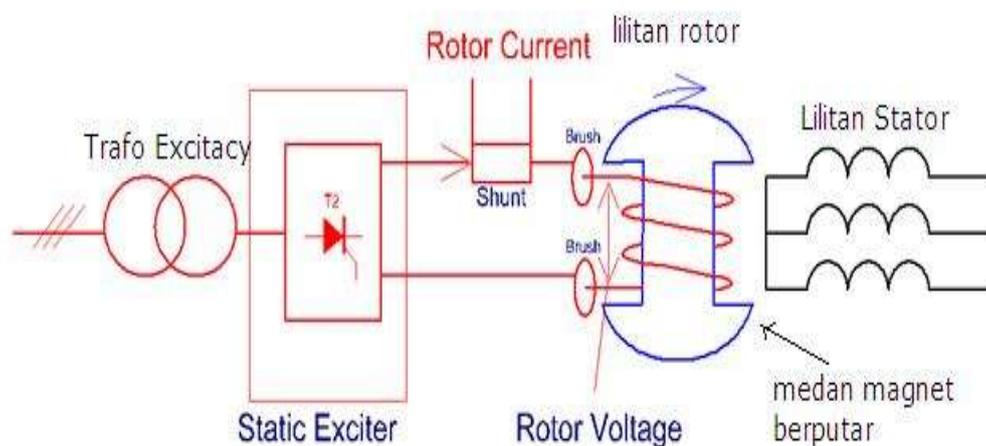
Sistem ini merupakan sistem yang vital pada proses pembangkitan listrik dan pada perkembangannya. Berikut *overview* dari sistem eksitasi dapat di lihat pada gambar 2.11 di bawah ini:



Gambar 2.11 Overview Sistem Eksitasi
(sumber: manual book kato engineering inc)

2.8.1 Sistem Eksitasi Dengan Sikat (*Brush Excitation*)

Pada sistem eksitasi menggunakan sikat, sumber tenaga listriknya berasal dari generator arus searah (DC) atau generator arus bolak balik (AC) yang disearahkan terlebih dahulu dengan menggunakan rectifier. Jika menggunakan sumber listrik yang berasal dari generator AC atau menggunakan *permanent magnet generator* (PMG) medan magnetnya adalah magnet permanent. Dalam lemari penyearah tegangan listrik arus bolak balik diubah atau disearahkan menjadi tegangan arus searah untuk mengontrol kumparan medan eksiter utama (*main exciter*). Untuk mengalirkan arus eksitasi dari *main exciter* ke rotor generator menggunakan *slip ring* dan sikat arang, demikian juga penyaluran arus yang berasal dari *pilot exciter* ke *main exciter*. Sistem eksitasi dengan sikat di tunjukkan pada gambar 2.12 di bawah ini:



Gambar 2.12 Sistem Eksitasi Dengan Sikat
(sumber: dunia-listrik.blogspot.com)

2.8.1.1 Prinsip Kerja Sistem Eksitasi dengan Sikat (*Brush Excitation*)

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

Pengaturan tegangan pada generator utama dilakukan dengan mengatur besarnya arus Eksitasi (arus penguatan) dengan cara mengatur potensiometer atau tahanan asut. Potensiometer atau tahanan asut mengatur arus penguat generator pertama dan generator penguat kedua menghasilkan arus penguat generator utama. Dengan cara ini arus penguat yang diatur tidak terlalu besar nilainya (dibandingkan dengan arus generator penguat kedua) sehingga kerugian daya pada potensiometer tidak terlalu besar.

2.8.2 Sistem Eksitasi Tanpa Sikat (*Brushless Excitation*)

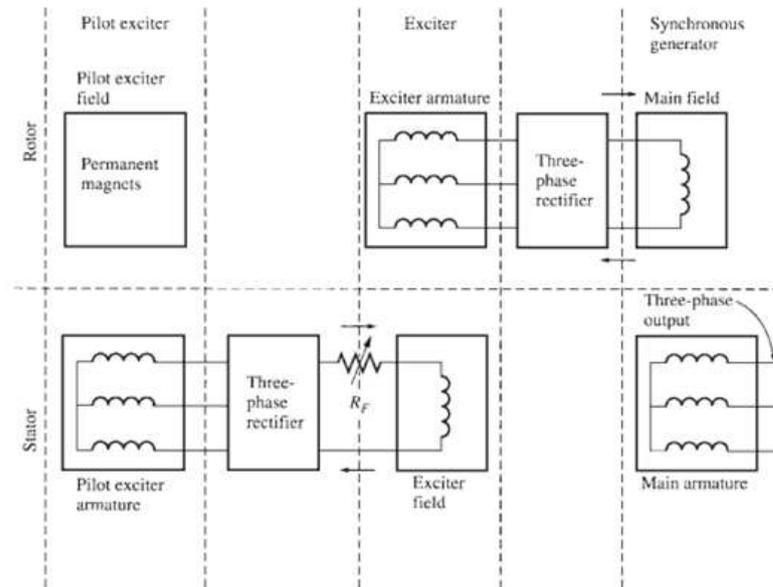
Penggunaan sikat atau slip ring untuk menyalurkan arus eksitasi ke rotor generator mempunyai kelemahan karena besarnya arus yang mampu dialirkan pada sikat arang relatif kecil. Untuk mengatasi keterbatasan sikat arang, digunakan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (*brushless excitation*).

Keuntungan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (*brushless excitation*), antara lain adalah :

- 1) Energi yang diperlukan untuk Eksitasi diperoleh dari poros utama (*main shaft*), sehingga keandalannya tinggi.
- 2) Biaya perawatan berkurang karena pada Sistem Eksitasi tanpa sikat (*brushless excitation*) tidak terdapat sikat, komutator dan slip ring.
- 3) Pada sistem Eksitasi tanpa sikat (*brushless excitation*) tidak terjadi kerusakan isolasi karena melekatnya debu karbon pada farnish akibat sikat arang.
- 4) Mengurangi kerusakan (*trouble*) akibat udara buruk (*bad atmosphere*) sebab semua peralatan ditempatkan pada ruang tertutup.
- 5) Selama operasi tidak diperlukan pengganti sikat, sehingga meningkatkan keandalan operasi dapat berlangsung terus pada waktu yang lama.
- 6) Pemutus medan generator (*Generator field breaker*), *field* generator dan bus *exciter* atau kabel tidak diperlukan lagi.
- 7) Biaya pondasi berkurang, sebab aluran udara dan bus *exciter* atau kabel tidak memerlukan pondasi.

2.8.2.1 Prinsip Kerja Sistem Eksitasi Tanpa Sikat (*Brushless Excitation*)

Berikut merupakan rangkaian dari sistem ekstasi tanpa sikat yang di tunjukkan pada gambar 2.13 di bawah ini:



Gambar 2.13 Sistem Eksitasi Tanpa Sikat
(sumber: dunia-listrik.blogspot.com)

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

Besarnya arus berpengaruh pada besarnya arus yang dihasilkan *main exciter*, maka besarnya arus *main exciter* juga mempengaruhi besarnya tegangan yang dihasilkan oleh generator utama.

2.8.2.2 Bagian-Bagian Dari Sistem Eksitasi Tanpa Sikat

Secara garis besar sistem eksitasi tanpa sikat (*brushless excitation*) adalah sebagai berikut :

1) *Pilot exciter*

Pilot exciter merupakan bagian stator exciter, merupakan belitan jangkar. Fungsinya adalah sebagai bahan magnet karena ada arus yang mengalir pada kumparan tersebut dengan menggunakan PMG (*permanent magnet generator*) sebagai sumber tegangan utamanya.

2) *Rotating Rectifier*

Rotating rectifier merupakan rangkaian penyearah gelombang penuh tiga fasa dua arah kirim kembali. Setiap fasa mempunyai dua pasang *rectifier* sebagai jalan keluar masuknya arus.

3) *AC rectifier*

AC rectifier adalah bagian *exciter* yang berputar seporos dengan kumparan jangkar generator. Generator AC yang berfungsi sebagai *AC exciter* adalah generator sinkron.

4) *Permanen Magnet Generator (PMG)*

PMG seporos dengan poros generator utama sehingga PMG dapat menghasilkan daya apabila generator berputar.

5) *Voltage output*

Merupakan pengatur tegangan *excitation*. Alat ini berfungsi untuk mengatur atau menseting besarnya masukan pada AVR yang digunakan untuk mengatur besarnya tegangan generator AC.

6) *Voltage adjuster*

Merupakan pengatur tegangan *excitacy*. Alat ini mengatur atau menyeting besarnya masukan pada AVR yang untuk menentukan besarnya tegangan induksi generator.

7) *Manual voltage regulator*

Digunakan untuk pengaturan tegangan penguatan secara manual. Biasanya alat ini dioperasikan pada saat AVR belum bekerja secara maksimal akibat belum adanya sumber tegangan untuk bekerja secara optimal, yaitu pada

saat pembangkit mulai running atau berhenti (tripping), saat ini tegangan output PMG tidak dapat menyuplai tegangan yang dibutuhkan oleh AVR sehingga *excitation*

2.9. Permanen Magnet Generator (PMG)

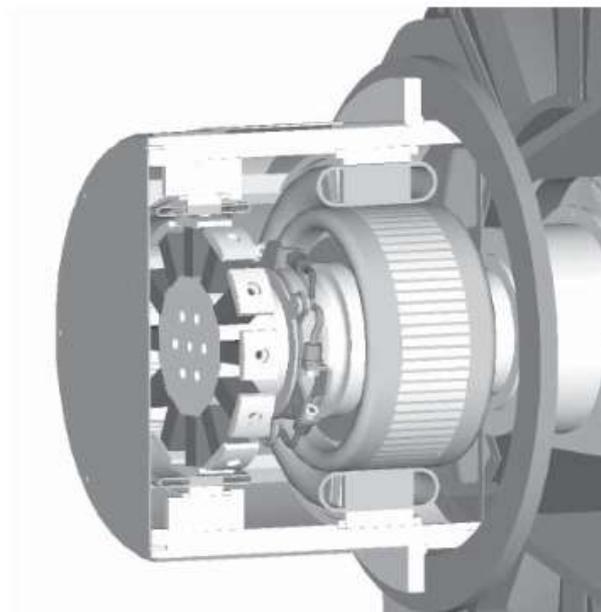
PMG seporos dengan poros generator utama sehingga PMG dapat menghasilkan daya apabila generator berputar. PMG memiliki dua bagian utama, yaitu:

1) Magnit *permanent*

Merupakan bagian rotor dari PMG yang sejenis dengan generator utama yang terbuat dari besi yang memiliki sifat kemagnitan yang kuat atau sering disebut magnit permanent.

2) Stator

Stator merupakan bagian dari PMG yang tidak bergerak dan berfungsi membangkitkan tegangan AC dan tegangan tersebut dipakai untuk beban. Berikut gambar PMG yang di tunjukkan pada gambar 2.14 di bawah ini:



Gambar 2.14 Permanen Magnet Generator
(sumber: manual book kato engineering inc)

2.10. Proteksi Generator

Proteksi terhadap suatu sistem tenaga listrik adalah sistem pengamanan yang dilakukan terhadap peralatan-peralatan listrik yang terpasang pada sistem tenaga listrik tersebut terhadap kondisi abnormal dari sistem itu sendiri. Berikut adalah gangguan yang mungkin terjadi pada generator:

1) Gangguan di luar generator

Adanya hubung pendek, mechanical stress pada gulungan stator. Jika mechanical stress sudah terdapat pada gulungan stator maka operasi selanjutnya akan memperparah kondisi gulungan, kenaikan temperature walaupun perlahan-lahan selama 10 detik akan menaikkan temperature ke kondisi yang membahayakan.

2) *Thermal Loading*

Pembebanan yang berlebih pada generator akan mengakibatkan kenaikan temperatur gulungan stator (*overheating*) sampai isolasi menjadi rusak, sehingga usia pemakaiannya menjadi lebih pendek. Temperatur naik juga disebabkan oleh adanya kegagalan sistem pendingin.

3) **Beban Tak Seimbang (*Unbalanced Loading*) = *Negative Phase Sequence***

Jika generator memikul beban tak seimbang terus menerus, atau arus yang diterimanya melebihi 10% dari rating arus, ini dapat menimbulkan bahaya pada rotor silinder dari generator.

4) **Gangguan Belitan Stator**

Gangguan pada belitan stator akan mempengaruhi gulungan jangkar (armature). Dalam hal ini generator harus segera di shutdown. Yang termasuk gangguan stator adalah:

1. Gangguan fase ke tanah

Gangguan ini umumnya terjadi di celah jangkar (armature slot)

2. Gangguan antar (inter) belitan stator

Hubung pendek antar belitan stator dalam satu coil dapat terjadi apabila stator terbuat dari multi turn coil.

5) Gangguan Belitan Medan (*Field winding* atau Rotor)

Gangguan rotor, termasuk gangguan antar gulungan rotor dan konduktor ke tanah umumnya disebabkan mekanikal atau temperature stress.

6) Kehilangan Eksitasi (*Loss of Field*)

Ini berakibat hilangnya sinkronisasi dan kecepatan naik sedikit. Penyebabnya karena terbukanya sakelar medan (*Field Circuit Breaker*). Kehilangan eksitasi dapat terjadi karena adanya hubung singkat atau circuit terbuka dalam circuit medan atau gangguan dalam AVR (*Automatic Voltage Regulator*).

7) Motoring of Generator (*Reverse Power*)

Ini terjadi bila torsi penggerak (turbin gas) dikurangi sampai dibawah total kerugian (*losses*) generator atau di stop. Daya aktif (*active power*) akan ditarik dala jala-jala untuk mempertahankan sinkronisasi, dan generator bekerja sebagai rotor sinkron dengan turbin sebagai bebannya.

2.11. Automatic Voltage Regulator (AVR)

Unit AVR (Automatic Voltage Regulator) berfungsi untuk menjaga agar tegangan generator tetap konstan dengan kata lain generator akan tetap mengeluarkan tegangan yang selalu stabil tidak terpengaruh pada perubahan beban yang selalu berubah-ubah dikarenakan beban sangat mempengaruhi tegangan output generator.

Prinsip kerja dari AVR adalah mengatur arus penguatan (*excitacy*) pada exciter. Apabila tegangan output generator di bawah tegangan nominal tegangan generator maka AVR akan memperbesar arus penguatan (*excitation*) pada exciter. Dan juga sebaliknya apabila tegangan output Generator melebihi tegangan

nominal generator maka AVR akan mengurangi arus penguatan (*excitation*) pada exciter.

Dengan demikian apabila terjadi perubahan tegangan output Generator akan dapat distabilkan. AVR secara otomatis dikarenakan dilengkapi dengan peralatan seperti alat yang digunakan untuk pembatasan penguat minimum ataupun maximum yang bekerja secara otomatis. AVR dioperasikan dengan mendapat satu daya dari *permanent* magnet generator (PMG) Serta mendapat sensor dari potential transformer (PT) dan current transformer (CT).

2.12. Matlab

Matlab adalah sebuah bahasa dengan (high-performance) kinerja tinggi untuk komputasi masalah teknik. Matlab mengintegrasikan komputasi, visualisasi, dan pemrograman dalam suatu model yang sangat mudah untuk pakai dimana masalah-masalah dan penyelesaiannya diekspresikan dalam notasi matematika yang familiar. Penggunaan matlab meliputi bidang–bidang :

1. Matematika dan komputasi
2. Pembentukan algoritma
3. Akusisi Data
4. Pemodelan, simulasi, dan pembuatan prototype
5. Analisa data, eksplorasi, dan visualisasi
6. Grafik keilmuan dan bidang rekayasa

Matlab merupakan bahasa tingkat tinggi dan lingkungan interaktif yang memungkinkan untuk melakukan tugas-tugas komputasi secara intensif lebih cepat dibandingkan dengan bahasa pemrograman tradisional seperti C, C++ dan Fortran.

Matlab merupakan suatu sistem interaktif yang memiliki elemen data dalam suatu array sehingga tidak lagi kita dipusingkan dengan masalah dimensi. Hal ini memungkinkan kita untuk memecahkan banyak masalah teknis yang terkait dengan komputasi, khususnya yang berhubungan dengan matrix dan

formulasi vektor, yang mana masalah tersebut merupakan momok apabila kita harus menyelesaikannya dengan menggunakan bahasa level rendah seperti Pascall, C dan Basic.

Nama Matlab merupakan singkatan dari *matrix laboratory*. Matlab pada awalnya ditulis untuk memudahkan akses perangkat lunak matrik yang telah dibentuk oleh Linpack dan Eispack. Saat ini perangkat Matlab telah menggabung dengan Lapack dan Blas library, yang merupakan satu kesatuan dari sebuah seni tersendiri dalam perangkat lunak untuk komputasi matrix.

Dalam lingkungan perguruan tinggi teknik, Matlab merupakan perangkat standar untuk memperkenalkan dan mengembangkan penyajian materi matematika, rekayasa dan kelimuan. Di industri, Matlab merupakan perangkat pilihan untuk penelitian dengan produktifitas yang tinggi, pengembangan dan analisisnya. Fitur-fitur Matlab sudah banyak dikembangkan, dan lebih kita kenal dengan nama *toolbox*. Sangat penting bagi seorang pengguna Matlab, toolbox mana yang mendukung untuk *learn* dan *apply* teknologi yang sedang dipelajarinya. Toolbox toolbox ini merupakan kumpulan dari fungsi-fungsi Matlab (M-files) yang telah dikembangkan ke suatu lingkungan kerja Matlab untuk memecahkan masalah dalam kelas particular. Area-area yang sudah bisa dipecahkan dengan toolbox saat ini meliputi pengolahan sinyal, system kontrol, neural networks, fuzzy logic, wavelets, dan lain-lain.

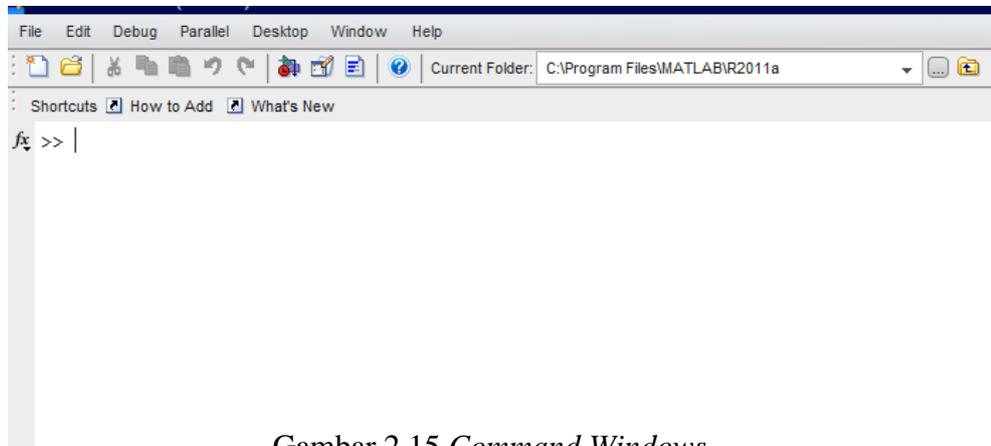
2.12.1 Menu Pada Matlab

Ada beberapa macam windows yang tersedia dalam Matlab yang dapat dijelaskan sebagai berikut:

1) Matlab *Command Windows/Editor*

Merupakan windows yang dibuka pertama kali setiap kali Matlab dijalankan, untuk dapat melakukan akses-akses ke *command-command* Matlab. *Command Windows/Editor* juga digunakan untuk memanggil *tool* Matlab seperti *editor*, *debugger*, atau fungsi. Ciri dari Windows ini adalah Prompt (>>) yang menyatakan Matlab siap menerima perintah.

Berikut tampilan *command windows* atau *editor* pada matlab yang ditunjukkan pada gambar 2.15 di bawah ini:



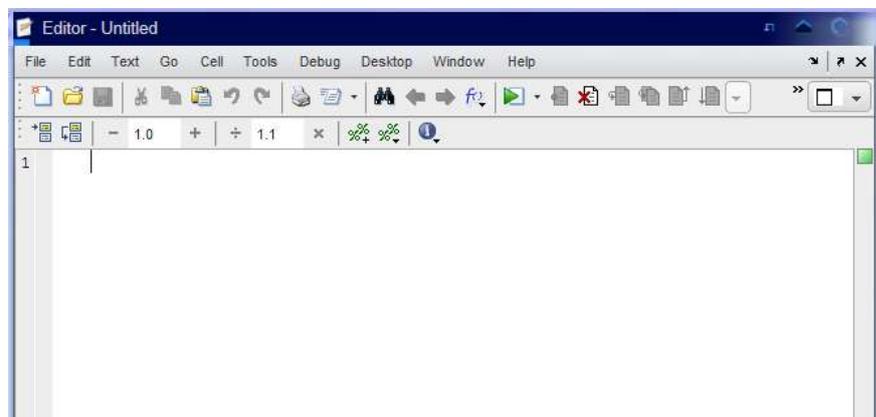
Gambar 2.15 *Command Windows*

2) Matlab *Editor/Debugger* (*Editor M-File* /*Pencarian Kesalahan*)

Windows ini merupakan *tool* yang disediakan oleh Matlab versi 5 ke atas yang berfungsi sebagai *editor script* Matlab (M-File), tapi dapat juga menggunakan *Notepad*, *Wordpad*, bahkan *Word*. Untuk mengakses windows M-File ini dapat dilakukan dengan cara:

1. Memilih File kemudian pilih NEW,
2. Pilih M-File, maka MatlaB akan menampilkan editor windows

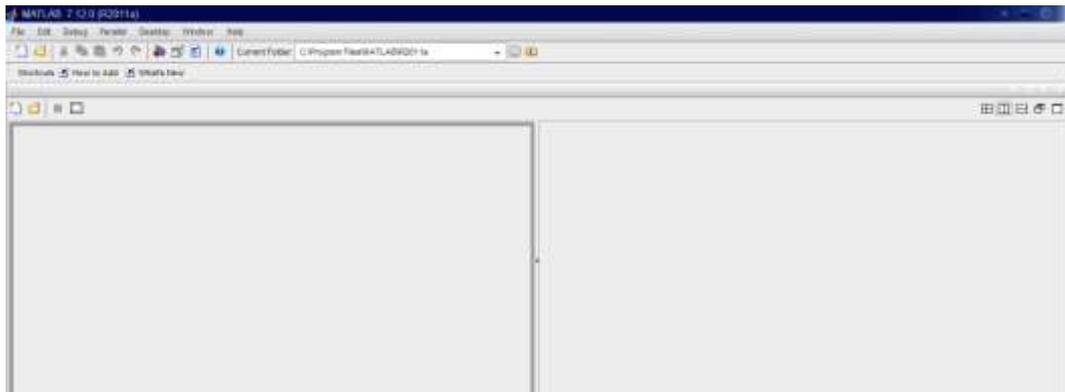
berikut tampilan M-File pada matlab yang ditunjukkan pada gambar 2.16 di bawah ini:



Gambar 2.16 M-file

3) Figure Windows

Hasil *visualisasi script* Matlab. Namun Matlab member kemudahan bagi programmer untuk mengedit windows ini selain berfungsi sebagai visualisasi output dapat juga sekaligus menjadi input yang interaktif. berikut tampilan figure windows pada matlab yang ditunjukkan pada gambar 2.17 di bawah ini:



Gambar 2.17 *Figure Windows*

4) Matlab Help Window

Menyediakan system help yang diakses dengan perintah help. Misalnya, untuk memperoleh informasi mengenai fungsi elfun, trigonometri, eksponensial, kompleks, dan sebagainya. berikut tampilan Help Window pada matlab yang ditunjukkan pada gambar 2.18 di bawah ini:



Gambar 2.18 Help Window

2.12.2 Kelengkapan pada Sistem Matlab

Sebagai sebuah system, Matlab tersusun dari 5 bagian utama:

1) *Development Environment.*

Merupakan sekumpulan perangkat dan fasilitas yang membantu anda untuk menggunakan fungsi-fungsi dan file-file Matlab. Beberapa perangkat ini merupakan sebuah *graphical user interfaces* (GUI). Termasuk didalamnya adalah Matlab *desktop* dan *Command Window*, *command history*, sebuah *editor* dan *debugger*, dan *browsers* untuk melihat *help*, *workspace*, *files*, dan *search path*.

2) *Matlab Mathematical Function Library.*

Merupakan sekumpulan algoritma komputasi mulai dari fungsi-fungsi dasar seperti: *sum*, *sin*, *cos*, dan *complex arithmetic*, sampai dengan fungsi-fungsi yang lebih kompleks seperti *matrix inverse*, *matrix eigenvalues*, *Bessel functions*, dan *fast Fourier transforms*.

3) *Matlab Language.*

Merupakan suatu high-level matrix/array language dengan *control flow statements*, *functions*, *data structures*, *input/output*, dan fitur-fitur object-oriented programming. Ini memungkinkan bagi kita untuk melakukan kedua hal baik "pemrograman dalam lingkup sederhana " untuk mendapatkan hasil yang cepat, dan "pemrograman dalam lingkup yang lebih besar" untuk memperoleh hasil-hasil dan aplikasi yang kompleks.

4) *Graphics.*

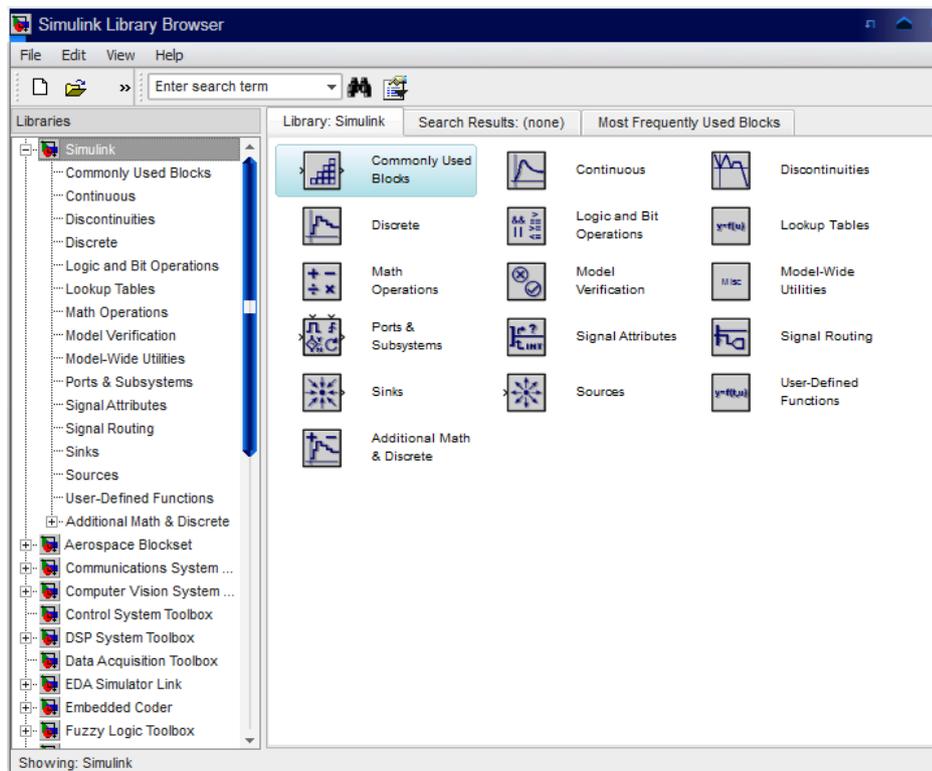
Matlab memiliki fasilitas untuk menampilkan vector dan matrices sebagai suatu grafik. Didalamnya melibatkan high-level functions (fungsi-fungsi level tinggi) untuk visualisasi data dua dimensi dan data tiga dimensi, image processing, animation, dan presentation graphics. Ini juga melibatkan fungsi level rendah yang memungkinkan bagi anda untuk membiasakan diri untuk memunculkan grafik mulai dari bentuk yang sederhana sampai dengan tingkatan graphical user interfaces pada aplikasi Matlab anda.

5) Matlab Application Program Interface (API).

Merupakan suatu library yang memungkinkan program yang telah anda tulis dalam bahasa C dan Fortran mampu berinteraksi dengan Matlab. Ini melibatkan fasilitas untuk pemanggilan routines dari Matlab (dynamic linking), pemanggilan Matlab sebagai sebuah computational engine, dan untuk membaca dan menuliskan MAT-file.

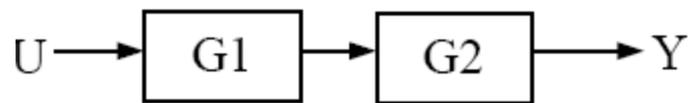
2.12.3 Simulink

Simulink merupakan bagian tambahan dari software Matlab (Mathworks Inc.). Simulink dapat digunakan sebagai sarana pemodelan, simulasi dan analisa dari sistem dinamik dengan menggunakan antarmuka grafis (GUI). Simulink terdiri dari beberapa kumpulan *toolbox* yang dapat digunakan untuk analisa sistem linier dan non-linier. berikut tampilan Simulink pada matlab yang ditunjukkan pada gambar 2.19 di bawah ini:

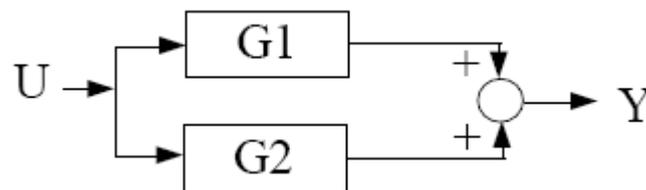


Gambar 2.19 Simulink

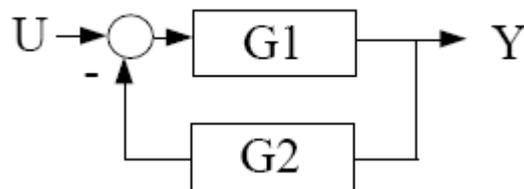
Beberapa library yang sering digunakan dalam sistem kontrol antara lain math, sinks, dan sources. Berikut contoh diagram blok yang di tunjukkan pada gambar 2.20.a, 2.20.b dan 2.20.c.



(a) Hubungan Seri



(b) Hubungan Parallel



(c) Umpan Balik

Gambar 2.20.a.b.c Hubungan Sistem Kendali Seri, Parallel, dan Umpan Balik

Blok diagram menyatakan model dari suatu sistem. Adapun untuk model sistem kontinu yang akan digunakan di sini dapat dinyatakan dalam bentuk polinomial, ataupun dalam bentuk poles dan zeros. Dimana hubungan output dan input dapat dinyatakan sebagai berikut:

1. Hubungan secara Seri

$$\frac{Y}{U} = \mathbf{G1.G2} \quad (2.13)$$

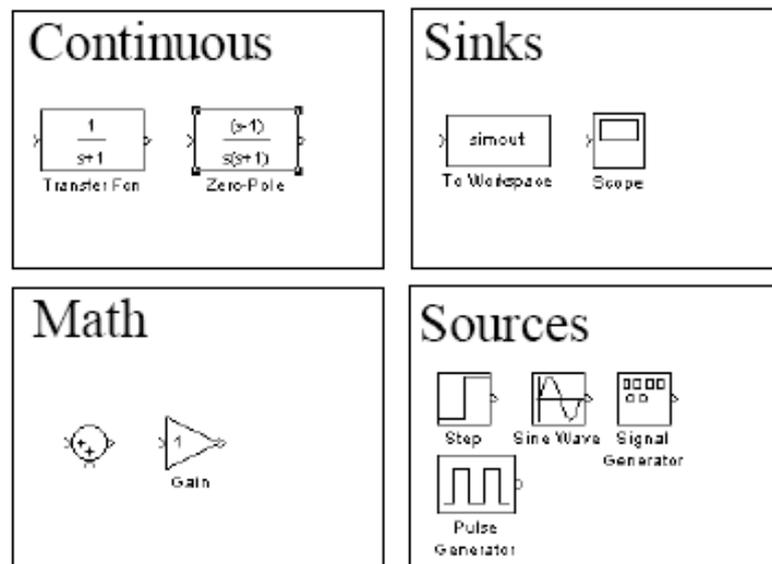
2. Hubungan secara Parallel

$$\frac{Y}{U} = 4 G_1 + G_2 \quad (2.14)$$

3. Dengan Umpan Balik

$$\frac{Y}{U} = \frac{G_1}{1+G_1.G_2} \quad (2.15)$$

Blok diagram menyatakan model dari suatu sistem. Pada blok diagram di atas fungsi G_1 dan G_2 adalah fungsi dalam bentuk polinomial. Blok-blok diagram tersebut kemudian dapat dibuat di dalam simulink seperti di tunjukkan pada gambar 2.21 berikut.



Gambar 2.21 Blok Diagram Dalam Bentuk Simulink

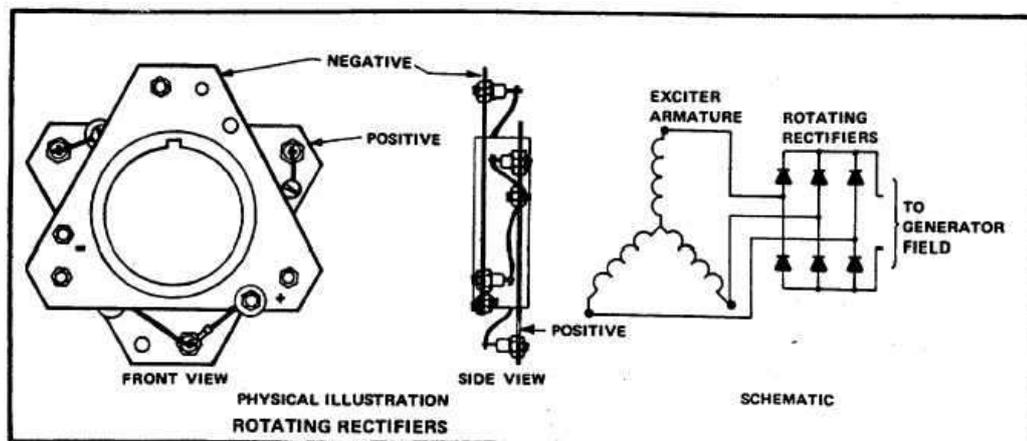
Blok-blok yang biasa digunakan dalam simulink adalah sebagai berikut:

- 1) Transfer function digunakan untuk sistem yang menggunakan persamaan dalam bentuk polinomial, nilai-nilai numerator disingkat num serta denominator disingkat den, dapat diubah dengan cara mengklik gambar dua kali.
- 2) Zero-pole digunakan untuk sistem yang persamaannya merupakan perkalian dari akar-akar polinomial.

- 3) Sum digunakan untuk menjumlahkan dua buah sinyal.
- 4) Scope digunakan untuk melihat sinyal keluaran sistem.
- 5) To workspace digunakan bila kita ingin mengolah sinyal proses diteruskan dengan file *.m.
- 6) Pulse Generator digunakan untuk membangkitkan pulsa.
- 7) Signal Generator digunakan untuk membangkitkan sinyal (sinus, square, sawtooth, random).
- 8) Sine Wave digunakan untuk membangkitkan sinyal sinusoidal.
- 9) Step digunakan untuk membangkitkan sinyal yang berupa fungsi step $u(t)$.

2.13. Dioda (*Rectifier*)

Pada sistem eksitasi generator tegangan yang dibutuhkan untuk penguat medan magnet adalah pasokan listrik *Direct Current* (DC). Untuk itu diperlukan suatu peralatan (rangkaian) yang dapat mengubah tegangan *Alternating Current* (AC) menjadi tegangan *Direct Current* (DC). Dioda (*Rectifier*) berfungsi mengubah tegangan AC menjadi tegangan DC. Komponen utama dalam penyearah gelombang adalah dioda yang dikonfigurasi secara forward bias. Berikut merupakan gambar dioda yang terhubung pada sistem eksitasi generator yang ditunjukkan pada gambar 2.22 di bawah ini:

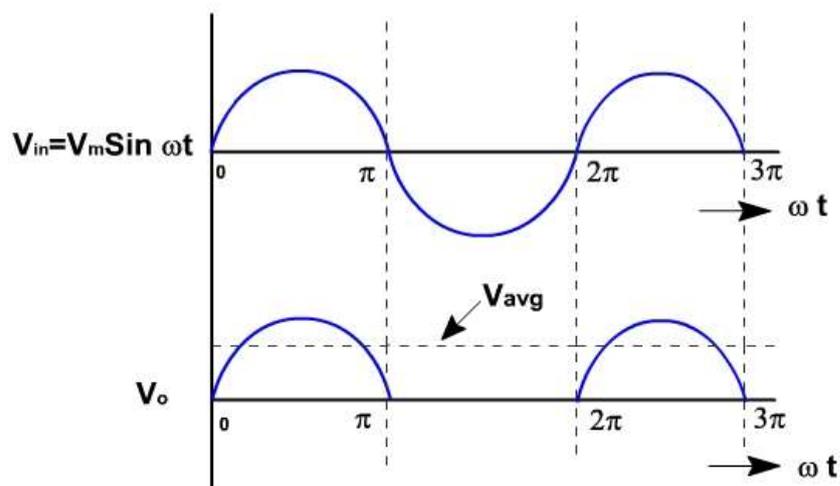


Gambar 2.22 *Rotating Rectifier*

Pada dasarnya konsep penyearah gelombang dibagi dalam 2 jenis yaitu, penyearah setengah gelombang dan penyearah gelombang penuh.

2.13.1 Penyearah Setengah Gelombang (*half wave rectifier*)

Penyearah setengah gelombang (*half wave rectifier*) hanya menggunakan 1 buah diode sebagai komponen utama dalam menyearahkan gelombang AC. Prinsip kerja dari penyearah setengah gelombang ini adalah mengambil sisi sinyal positif dari gelombang AC dari transformator. Pada saat transformator memberikan output sisi positif dari gelombang AC maka diode dalam keadaan forward bias sehingga sisi positif dari gelombang AC tersebut dilewatkan dan pada saat transformator memberikan sinyal sisi negatif gelombang AC maka dioda dalam posisi reverse bias, sehingga sinyal sisi negatif tegangan AC tersebut ditahan atau tidak dilewatkan seperti terlihat pada gambar 2.23 sinyal output penyearah setengah gelombang berikut:



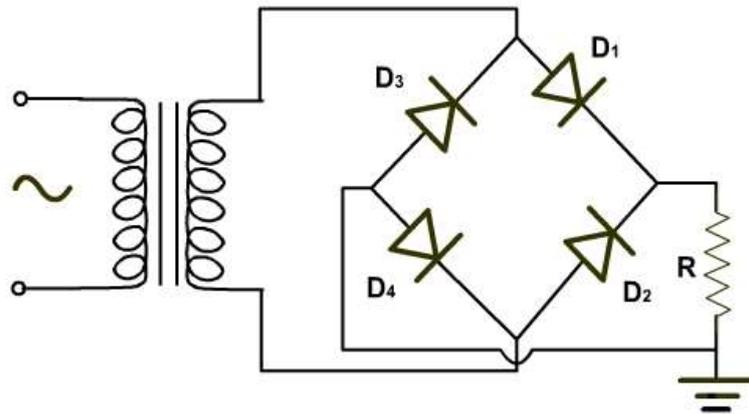
Gambar 2.23 Sinyal *Output* Penyearah Setengah Gelombang

Formulasi yang digunakan pada penyearah setengah gelombang sebagai berikut:

$$V_{avg} = \frac{V_m}{\pi} \quad (2.16)$$

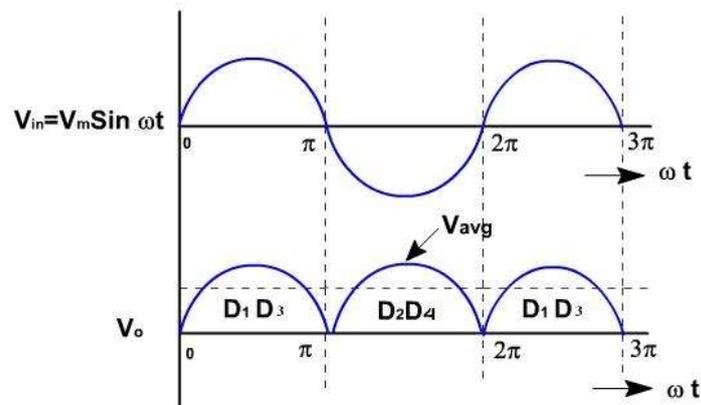
2.13.2 Penyearah Gelombang Penuh(*full wave rectifier*)

Penyearah gelombang penuh dapat dibuat dengan 2 macam yaitu, menggunakan 4 diode dan 2 diode. Untuk membuat penyearah gelombang penuh dengan 4 diode menggunakan transformator non-CT seperti terlihat pada gambar berikut:



Gambar 2.24 Penyearah Gelombang Penuh

Prinsip kerja dari penyearah gelombang penuh dengan 4 diode diatas dimulai pada saat output transformator memberikan level tegangan sisi positif, maka D1, D4 pada posisi forward bias dan D2, D3 pada posisi reverse bias sehingga level tegangan sisi puncak positif tersebut akan di lewatkan melalui D1 ke D4. Kemudian pada saat output transformator memberikan level tegangan sisi puncak negatif maka D2, D4 pada posisi forward bias dan D1, D2 pada posisi reverse bias sehingga level tegangan sisi negatif tersebut dialirkan melalui D2, D4. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada grafik output berikut:



Gambar 2.25 Grafik *Output* penyearah Gelombang Penuh

2.14. Penyearah Terkendali (*Controlled Rectifier*)

Penyearah terkendali (controlled rectifier) atau sering juga disebut dengan konverter merupakan rangkaian elektronika daya yang berfungsi untuk mengubah tegangan sumber masukan arus bolak-balik dalam bentuk sinusoida menjadi tegangan luaran dalam bentuk tegangan searah yang dapat diatur/dikendalikan. Komponen semikonduktor daya yang digunakan umumnya berupa SCR yang beroperasi sebagai sakelar, pengubah, dan pengatur.

Jenis sumber tegangan masukan untuk mencatu rangkaian konverter dapat digunakan tegangan bolak-balik satu fasa maupun tiga fasa. Konverter satu fasa merupakan rangkaian penyearah daya dengan sumber masukan tegangan bolak-balik satu fasa, sedangkan konverter tiga fasa rangkaian penyearah daya dengan sumber masukan tegangan bolak-balik tiga fasa. Berbeda dengan penyearah daya, dalam rangkaian konverter dapat dilakukan dalam bentuk penyearahan terkendali setengah gelombang (halfwave), peyearah gelombang penuh (fullwave) dan semikonverter. Pembebanan pada rangkaian penyearah terkendali juga dipasang beban resistif atau beban resistif-induktif.

2.14.1 Konverter Setengah Gelombang Tiga Fasa

Gambar 2.25 merupakan rangkaian konverter setengah gelombang tiga fasa dengan beban resistif dan bentuk gelombang hasil penyearahan. Terdapat dua proses pengaturan sudut picuan (α), yaitu: (a) operasi konduksi kontinyu ketika $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ atau $0 \leq \alpha \leq \pi/6$, dan (b) operasi konduksi diskontinyu ketika $30^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ atau $\pi/6 \leq \alpha \leq 5\pi/6$. Proses pemicuan pada SCR T₁, T₂, dan T₃ dilakukan secara serempak pada masing-masing fasa.

Nilai tegangan searah rerata (V_{dc}) dan nilai tegangan searah efektif (root mean square-rms), V_L pada operasi konduksi kontinyu dan operasi konduksi diskontinyu dapat ditentukan sebagai berikut :

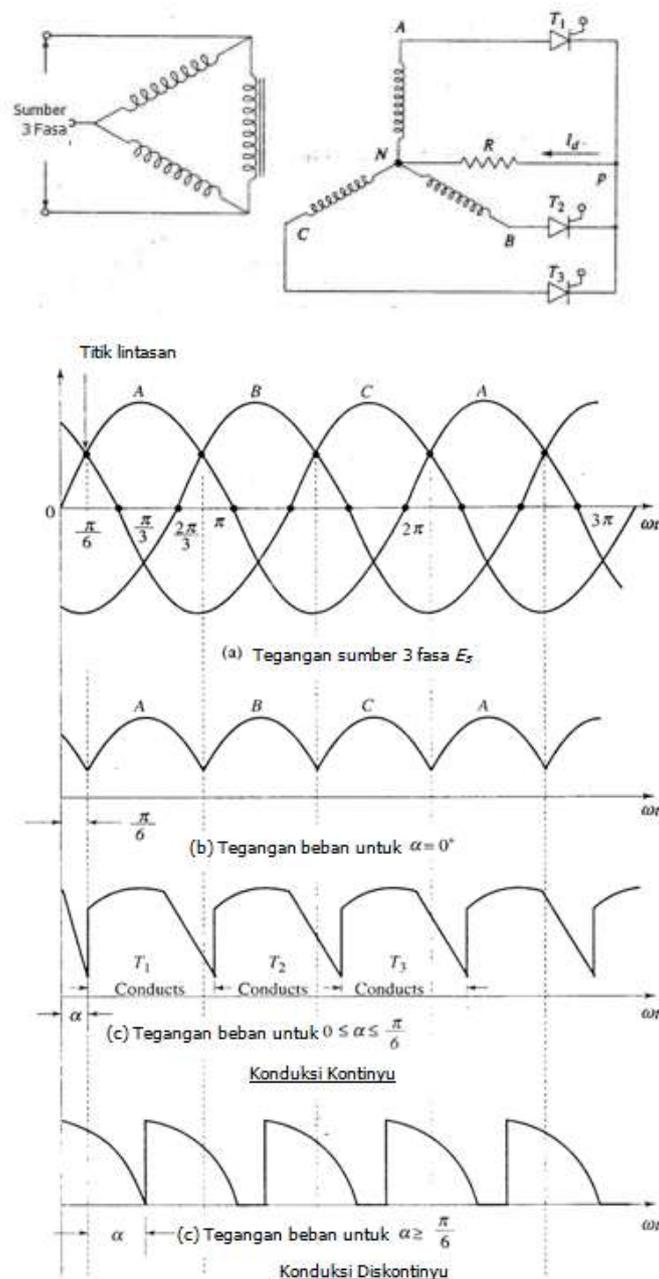
(a) Operasi konduksi kontinyu:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m \cos \alpha \quad V_L = V_m \left[\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{8\pi} \cos 2\alpha \right]^{1/2} \quad (2.17)$$

(b) Operasi konduksi kontinyu:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m \cos(\alpha + 30^\circ) \quad V_L = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} V_m \left[\frac{5\pi - 3\alpha}{3\pi} + \frac{\sin(2\alpha + \pi/3)}{\pi} \right]^{1/2} \quad (2.18)$$

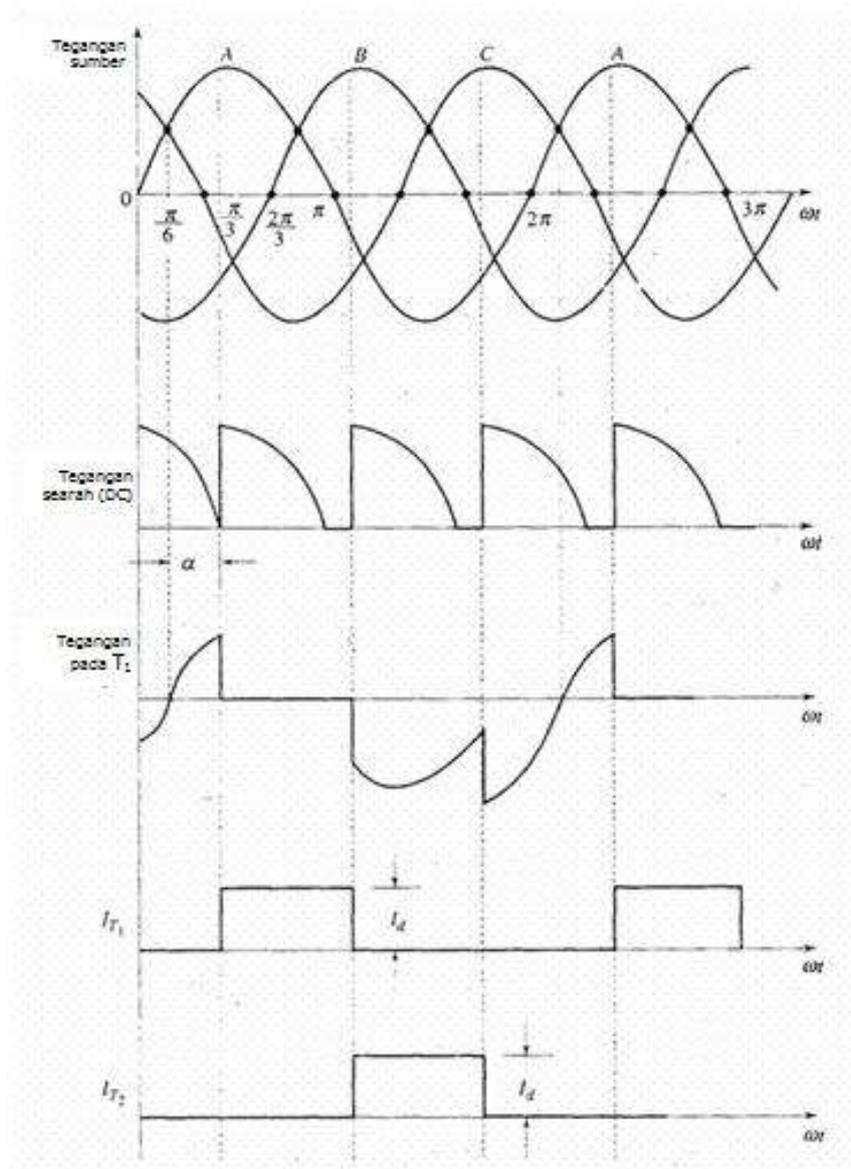
Berikut rangkaian konverter setengah gelombang tiga fasa beban R yang ditunjukkan pada gambar 2.26 di bawah ini:



Gambar 2.26 Rangkaian Konverter Setengah Gelombang Tiga Fasa Beban R

Jika beban R pada rangkaian gambar 2.26 diganti beban RL, maka bentuk gelombang yang dihasilkan seperti ditunjukkan pada gambar 2.27 di bawah ini. nilai tegangan searah (Vdc) dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m \cos \alpha \quad (2.19)$$



Gambar 2.27 Bentuk Gelombang Konverter Setengah Gelombang Tiga Fasa Beban RL

2.14.2 Konverter Gelombang Penuh Tiga Fasa

Gambar 2.25 merupakan rangkaian konverter gelombang penuh tiga fasa dengan beban resistif dan bentuk gelombang hasil penyearahan. Dalam rangkaian ini terdapat dua grup/ kelompok SCR, yaitu: grup positif dan grup negatif. SCR T₁, T₂, dan T₃ merupakan grup positif, sedangkan SCR T₄, T₅, dan T₆ merupakan grup negatif. Grup SCR positif akan ON ketika tegangan sumber berpolaritas positif dan Grup SCR negatif akan ON ketika tegangan sumber berpolaritas negatif.

Proses pemicuan pada rangkaian ini dilakukan secara serempak masing-masing T₁ dan T₅, T₂ dan T₆, serta T₃ dan T₄. Terdapat dua proses pengaturan sudut pemicuan (α), yaitu: (a) operasi konduksi kontinu ketika $0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ atau $0 \leq \alpha \leq \pi/3$, dan (b) operasi konduksi diskontinu ketika $60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$ atau $\pi/3 \leq \alpha \leq 2\pi/3$. Proses pemicuan pada SCR T₁, T₂, dan T₃ dilakukan secara serempak pada masing-masing fasa.

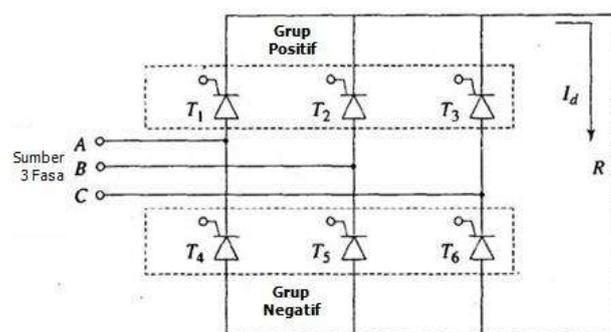
Nilai tegangan searah (V_{dc}) pada operasi konduksi kontinu dapat ditentukan sebagai berikut:

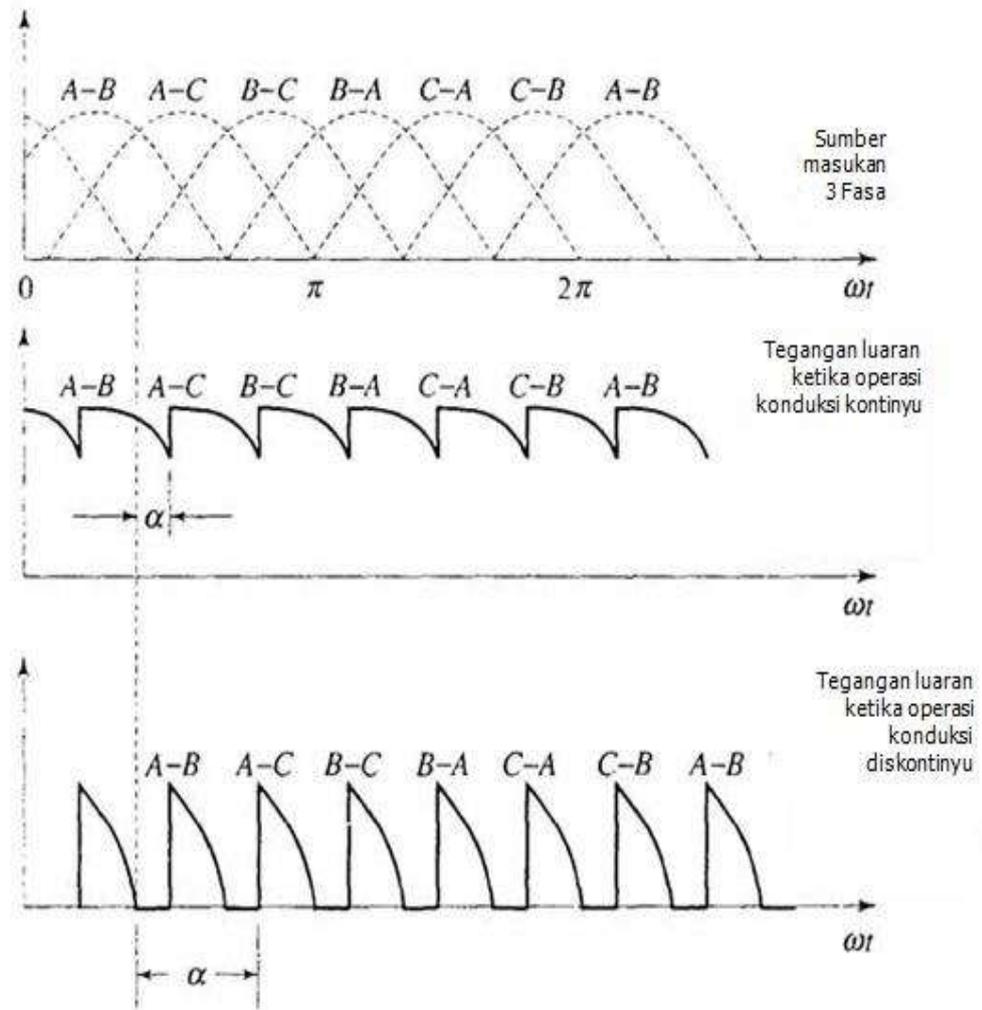
$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \cos \alpha \quad (2.20)$$

Dan operasi konduksi diskontinu:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{m, fasa} \cos \left[1 + \left(\alpha + 60^\circ \right) \right] \quad (2.21)$$

Berikut rangkaian konverter gelombang penuh tiga fasa beban R yang ditunjukkan pada gambar 2.28 di bawah ini:

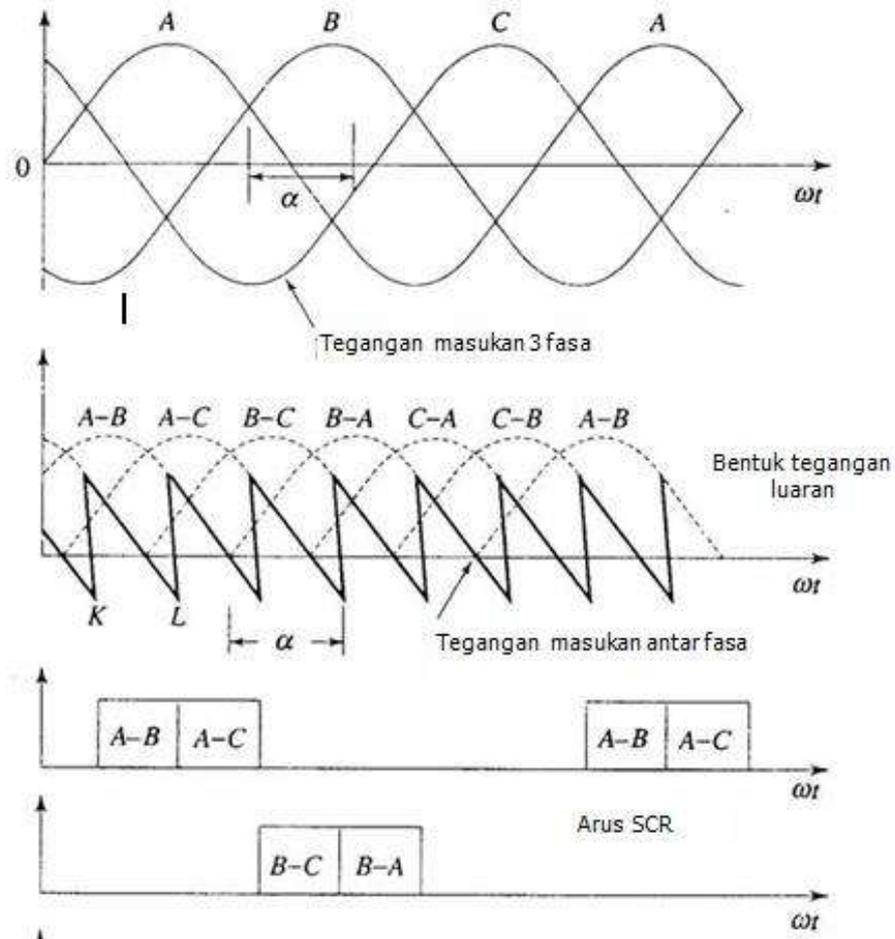




Gambar 2.28 Rangkaian Konverter Gelombang Penuh Tiga Fasa Beban R

Jika beban R pada rangkaian gambar 2.28 diganti beban RL, maka bentuk gelombang yang dihasilkan seperti ditunjukkan pada gambar 2.29. nilai tegangan searah (V_{dc}) dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{m,ph} \cos \alpha \quad (2.22)$$



Gambar 2.29 Bentuk Gelombang Konverter Gelombang Penuh Tiga Fasa Beban RL